La température moyenne annuelle est élevée : 18°2, ce qui traduit des étés chauds (température moyenne mensuelle maximale : 27°), et des hivers doux (température moyenne mensuelle minimale : 11°).

Le climat se caractérise donc par un été chaud sans véritable période sèche, et un hiver doux et très humide.

B. *Géologie*

Le périmètre est situé dans la zone prérifaine, et son histoire géologique se rattache à celle du système alpin méditerranéen.

Une première série de mouvements tectoniques, qui a atteint son paroxysme à la fin de l'Oligocène, affecte la région, provoquant la formation de nombreuses écailles Jurassiques, recouvertes par des marnes. Cette couverture marneuse post-jurassique serait, soit para-autochtone (SUTER G.), soit largement charriée (MATTAUER M.), et proviendrait de la zone la plus interne du sillon rifain.

La deuxième série de mouvements tectoniques affecte surtout les zones internes de la chaîne rifaine. Par suite de la surrection de la zone intrarifaine, la série tertiaire s'est décollée, et a glissé par gravité sur le Prérif, où elle constitue la nappe de Ouezzane.

Les principales roches-mères rencontrées dans le périmètre seront les marnes sableuses grises de l'Eocène supérieur, les marnes jaunâtres interstratifiées de bancs calcaires de l'Oligocène, ces deux formations appartenant à la nappe de Ouezzane, et les marnes bleu du Crétacé.

III. Description des sols

Les différentes séries rencontrées sur ces marnes prérifaines appartiennent aux groupes suivants (CPCS, 1967) :

III/22 — vertisols à drainage externe possible mais nul, et à structure anguleuse

V/11 — rendzines

V/23 — sols calciques mélaniques

V/31 — sols marrons.

Sur un même matériau, la vertisolisation se développe du haut vers le bas de la colline, par augmentation de l'humidité dans le profil ; corrélativement il y a diminution du lessivage oblique.

On peut schématiser la répartition des trois premiers groupes par la séquence suivante :

— sur le sommet se développe une rendzine ;

— le versant porte les sols calciques mélaniques ;

— en bas de pente, en même temps que les marnes cèdent la place à un colluvium marneux, il y a passage progressif des sols calciques mélaniques aux vertisols.

Les sols marrons se développent dans une situation topographique comparable à celle des sols calciques mélaniques, mais sur une roche-mère dont la teneur en calcaire est beaucoup plus faible. Il n'y aurait donc pas de lien génétique entre ces deux groupes.

Les sols présentés dans cette note appartiennent, soit au groupe des sols calciques mélaniques, soit à des unités intergrades avec des groupes d'autres sous-classes.

A. Principales caractéristiques des sols calciques mélaniques et des unités intergrades voisines.

Les sols décrits, sur les marnes du Prérif, sont profonds. Ils possèdent un horizon superficiel, d'une épaisseur moyenne de 20 cm, très riche en matière organique. Cet horizon, à structure polyédrique fine est semblable à l'horizon de self-mulching des vertisols. Cet horizon plus ou moins décarbonaté, a toujours un complexe adsorbant saturé en calcium et le pH eau reste supérieur à 7.

Les horizons inférieurs à teneurs en argile et en calcaire variables suivant la roche-mère, mais toujours très élevées, ont le plus souvent une structure massive.

1. Série du profil 2, sur marnes crétacées. (TABL. I a et b)

Altitude : 285 m

Végétation : doum, lentisque, asphodèle

Topographie : pente faible, versant nord

0 cm : Horizon Al_1 noir (2,5 Y 3/0), humifère. Argileux, non calcaire structure polyédrique fine. Inclusions calcaires. Nombreuses racines.

20 cm : Horizon Al_2 passant progressivement du brun-foncé au brun-jaune (2,5 Y 5/1). Argileux calcaire. Structure polyédrique à angulaire. Nombreux rhyzomes et racines de doum.

50 cm : Horizon Bca_1 jaune (2,5 Y 7/3). Argileux. Calcaire. Structure massive à débit angulaire. Revêtements peu nets. Quelques concrétions calcaires. Nombreuses grosses racines.

70 cm : Horizon Bca_2 jaune (2,5 Y 7/3). Argileux. Calcaire. Structure massive à débit angulaire. Revêtements. Quelques amas de calcaire pulvérulent. Racines assez nombreuses.

95 cm : Horizon C/Bca_2 jaune (5 Y 7/2). Argileux. Calcaire, légèrement bariolé de rouille. Cette argile calcaire entoure des agrégats marneux gris bleu, compacts, secs, à cassure conchoïdale.
Très nombreux amas de calcaire pulvérulent, de plusieurs mm d'épaisseur, et de taille moyenne 5 x 2 cm. Ces amas sont parfois humides à la fin de la saison pluvieuse, alors que le reste de l'horizon est sec. Peu de racines.

150 cm : Horizon C. les agrégats marneux gris bleu prennent une importance prépondérante par rapport à l'argile jaune. Les amas de calcaire pulvérulent sont toujours très nombreux. Rares racines.

TABLEAU I-a

Prof.	Granulométrie %					Matière organique %				pH	
cm	Sg	Sf	Lg	Lf	A	MO	C	N	C/N	pâte	eau
0-20	3,0	4,5	8,0	23,0	54,0	6,71	3,90	0,26	15,2	6,7	7,5
20-50	4,0	5,0	7,5	31,0	48,5	2,06	1,20	0,12	9,8	7,5	8,0
50-70	2,5	4,5	7,8	38,0	45,0	46,0	0,48	0,07	6,4	7,7	8,3
70-95	4,0	4,5	7,5	40,0	43,0	—	—	—	—	7,8	8,2
95-130	3,0	4,0	8,0	39,5	42,0	—	—	—	—	7,7	8,2
130-160	2,0	4,5	7,0	39,0	46,0	—	—	—	—	7,7	8,7

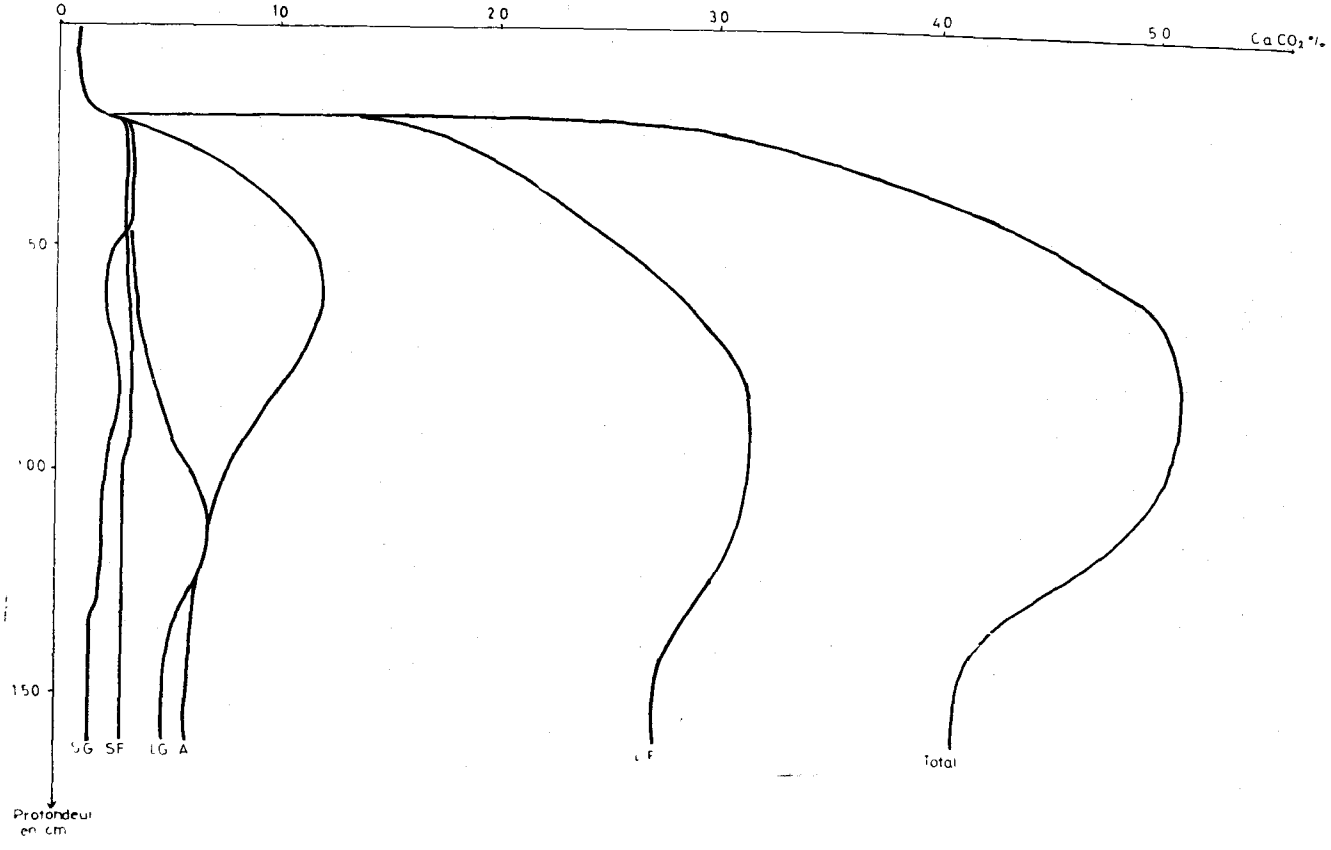
TABLEAU I-b

Prof.	$CaCO_3$ %		Cat. échang. méq/100 g					S	Ca	Humidité
cm	tot	act	Ca	Mg	K	Na	T	T	Mg	% flétr.
0-20	0	0	47,7	1,75	1,28	0,7	48,2	sat	27	24,8
20-50	37,0	17,5	32,8	1,0	0,61	1,0	36,3	98	33	14,8
50-70	48,5	19,5	24,3	1,0	0,33	1,0	32,1	83	24	13,6
70-95	49,0	19,0	22,5	1,25	0,25	1,0	24,3	sat	18	13,5
95-130	47,5	18,5	21,3	1,50	0,25	1,0	23,9	sat	14	13,2
130-160	39,0	17,5	22,8	2,50	0,25	1,0	26,1	sat	9	14,0

La capacité d'échange élevée traduirait un pourcentage d'argile de type montmorillonite, voisin de 60 % (LEPOUTRE et SAUVAGEOT, 1967).

FIGURE I

Profil 2 - Distribution du calcaire par classe granulométrique



La perméabilité est faible ; l'étude d'un profil hydrique situé près du P2 (FIG. 1) montre sous végétation naturelle un engorgement temporaire des horizons superficiels en février-mars, et une sécheresse très prononcée de ces mêmes horizons en juillet-août.

La matière organique, temporairement saturée d'eau, liée intimement à l'argile, serait un anmoor calcique.

Les résultats consignés dans le tableau précédent ont été obtenus à partir d'échantillons prélevés le 14 mars. Des prélèvements effectués le 27 juillet, en période sèche, ont donné les chiffres suivants.

Profondeur	Matière organique %				C/N	
cm	MO calcination	MO Anne	C	N	Calcination	Anne
0-20	9,8	8,3	4,81	0,29	19,5	16,4
20-50	4,2	3,0	1,71	0,14	17,2	12,0

Les conditions climatiques défavorables (engorgement hivernal, été sec et chaud) entravent l'humification et la minéralisation. La période favorable à la décomposition de la matière organique est très courte, et se situerait après la période des pluies, au début du printemps.

Le pH de ce sol est très élevé, en liaison avec la teneur en calcaire actif.

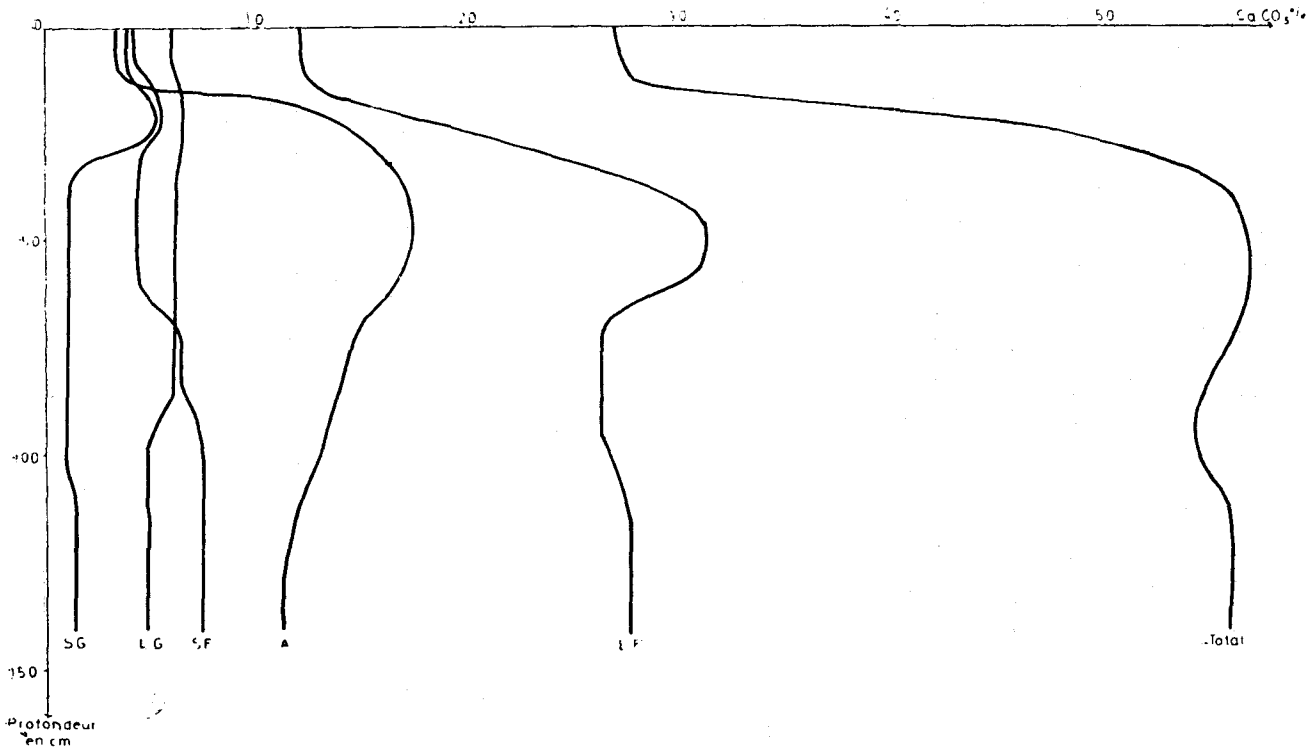
Le taux de calcaire total montre un lessivage en cet élément, avec accumulation maxima dans l'horizon 70-95 cm. Cependant, la distribution de ce calcaire par classes granulométriques (FIG. 2), calculée à partir de la granulométrie après décalcarisation, montre que le pourcentage maximum de calcaire dans une classe granulométrique devient de plus en plus superficiel, au fur et à mesure que les particules deviennent plus petites. Il y aurait donc, soit réarrangement du calcaire en particules plus grosses après lessivage, sous l'action de la dessiccation, soit altération de plus en plus poussée de la roche-mère à la surface du sol.

2. Série du profil 10, sur marnes éocènes. (TABL. II a et b)

Altitude : 325 m
Végétation, doum, lentisque
Topographie : sommet de butte : pente très faible.

FIGURE II

Profil 10 - Distribution du calcaire par classe granulométrique



0 cm : Horizon A^1_1 noir (5 Y 4/1), lumière. Argileux. Calcaire. Structure polyédrique fine. Forte cohésion. Nombreux rhyzomes de doum.

15 cm : Horizon Al_2 passant du brun-foncé au brun-jaune (5 Y 5/2). Argileux. Calcaire. Structure massive à débit polyédrique fin. Forte cohésion.

30 cm : Horizon Bca_1 gris-jaune (5 Y 7/4). Argileux. Très calcaire. Structure angulaire plus ou moins fondue. Faible cohésion.

65 cm : Horizon Bca_2 gris-jaune (5 Y 7/4). Argileux. Très calcaire. Structure angulaire plus ou moins fondue. Cohésion moyenne. Quelques agrégats à faces conchoïdales.

Quelques taches rouilles diffuses.

90 cm : Horizon C/Bca_2 gris-jaune légèrement bleuté (5 Y 8/3). Argileux. Très calcaire. Agrégats de structure polyédrique et conchoïdale. Très forte cohésion. Quelques veines rouilles parallèles strient l'horizon.

105 cm : Horizon C : Marnes gris-bleu (5 Y 8/3, à cassure conchoïdale. Très forte cohésion. Bandes rouillées (10 YR 6/8, plus ou moins parallèles.

TABLEAU II a

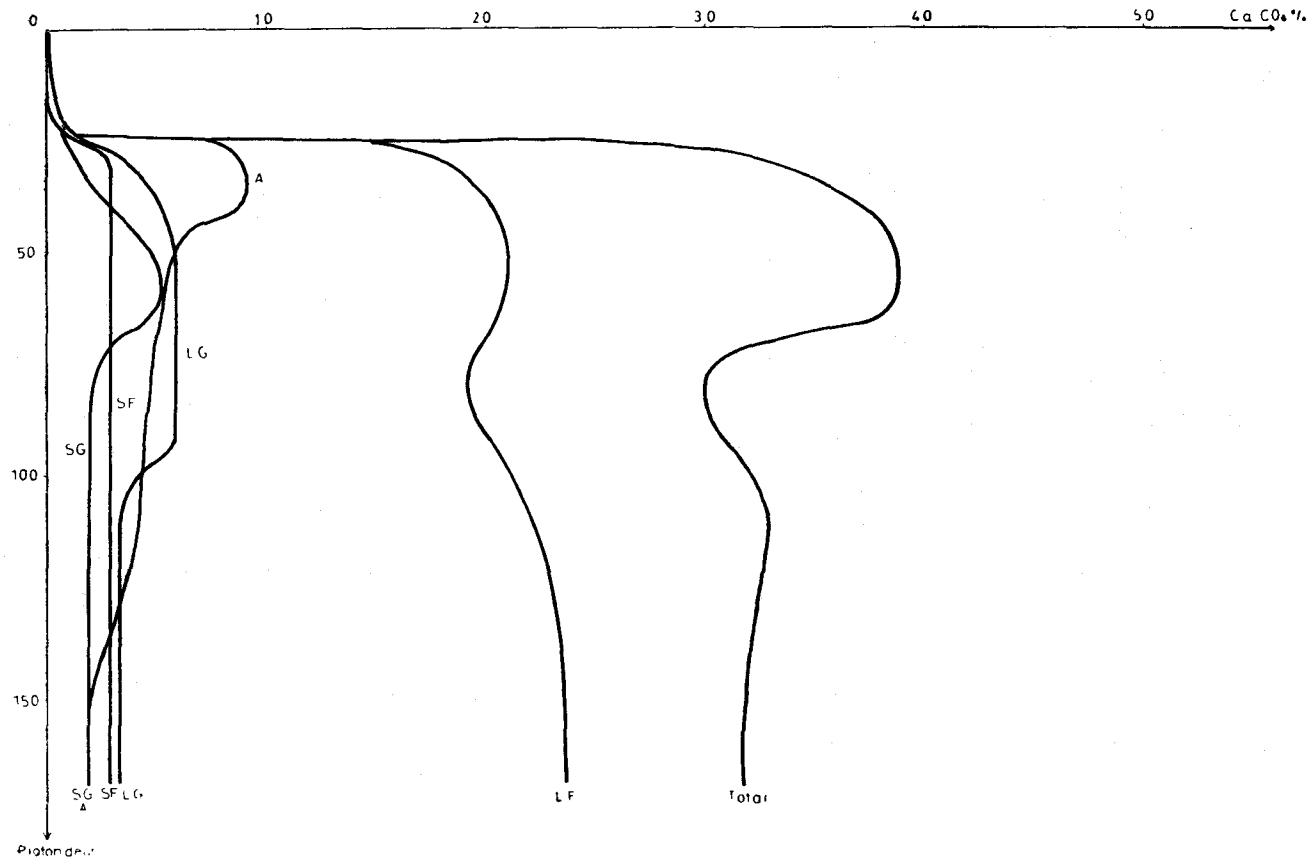
Prof.	Granulométrie %					Matière organique %				pH	
	Sg	Sf	Lg	Lf	A	MO	C	N	C/N	pâte	eau
0-15	5,5	5,5	9,5	25,0	49,0	5,8	3,36	0,30	11,2	7,5	7,5
15-30	6,5	6,0	8,5		50,0	3.2	1,83	0,16	10,2	7,5	7,6
30-65	2,0	5,0	7,0	36,0	49,5	1,2	0,71	0,07	10,3	7,8	8,1
65-90	2,0	7,0	7,0	33,0	46,5	0,5	0,30	0,04	6,9	7,8	8,2
90-105	2,0	8,0	6,0	34,0	45,0	—	—	—	—	7,8	
105-140	2,0	9,5	7,0	36,0	43,0	—	—	—	—	7,8	8,3

TABLEAU II b

Prof.	$CaCO_3$ %		Cat. échang. méq/100 g					S	Ca	Humidité
cm	tot.	act.	Ca	Mg	K	Na	T	T	Mg	% flétr.
0-15	27,5	12,5	37,0	1,3	1,2	0,8	41,2	98	28	20,8
15-30	45,0	19,0	28,1	1.3	0,6	0,6	30,8	sat.	22	18,8
30-65	56,5	20,0	20,4	0,5	0,3	0,6	21,4	sat.	41	14,2
65-90	55,0	20,0	21,3	1,0	0,2	0,6	20,5	sat.	21	14,4
90-105	54,0	18,5	20,0	0,9	0,2		19,6	sat.	22	10,0
105-140	56,0	17,5	18,9	1,4	0,3	0,6	19,4	sat.	13	11,8

FIGURE III

Profil 8 - Distribution du calcaire par classe granulométrique



Comme pour la série précédente, on peut estimer à partir de la capacité d'échange, que la montmorillonite est voisine de 60 %.

Le remarquable parallélisme et la rectitude des courbes des profils hydriques (FIG. 3) montrent la perméabilité élevée de ces sols. Dans ces conditions, les horizons superficiels ne s'engorgeront pas, et l'eau s'infiltrera très profondément sans ruisseler.

La matière organique pourra se décomposer plus facilement, profitant d'une période favorable plus longue. Ceci conduit à classer cet humus dans un type intermédiaire entre le mull calcique et l'anmoor calcique.

Les analyses du calcaire total mettent en évidence une décalcarification partielle des horizons humifères de surface. Mais comme aucun horizon ne montre d'enrichissement par rapport à la roche-mère, il faut admettre un lessivage oblique des horizons de surface. Cependant, le pourcentage de calcaire des fractions argile et limon fin (FIG. 2) montre un maximum vers 50 cm. Il y aurait donc un très faible lessivage vertical.

3. Série du profil 8, sur marnes oligocènes. (TABL. III a et b)

Altitude : 415 m

Végétation : doum, lentisque

Topographie : pente moyenne, versant ouest

0 cm : Horizon Al_1 noir (2,5 Y 3/1), humifère. Argileux. Non calcaire. Structure polyédrique fine. Quelques inclusions calcaires. Nombreux rhyzomes de doum (*Chamaerops humilis*)

15 cm : Horizon Al_2 passant du brun-foncé au brun-jaune (2,5 Y 5/4). Argileux. Calcaire. Structure fondue à débit polyédrique. Revêtements peu marqués. concrétions calcaires (ϕ = 1 à 2 mm). Nombreuses racines.

45 cm : Horizon Bca_2 brun-jaune (2,5 Y 6/4). Argileux. Calcaires. Structure polyédrique avec revêtements peu marqués. Quelques concrétions calcaires (ϕ = 1 à 2 mm). Nombreuses racines.

70 cm : Horizon B_3g gris bleuté avec taches rouilles. Argileux. Calcaire. Structure polyédrique grossière. Quelques amas de calcaire pulvérulent. Peu de racines.

90 cm : Horizon IIC_1. Zone discontinue de calcaire gris bleu à pâtine jaune gréseuse.

100 cm : Horizon III C_2g bleuté. Nombreuses veines rouilles. Argileux à argilo-limoneux. Calcaire. Structure polyédrique grossière, parfois conchoïdale. Nombreux amas de calcaire pulvérulent (1/2 cm x quelques mm) en placage sur les agrégats.

Dans ces sols, où le taux de montmorillonite est toujours voisin de 60 % de la fraction argileuse, l'humus serait de type mull calcique,

TABLEAU III a

Prof.	Granulométrie %					Matière organique %				pH	
cm	Sg	Sf	Lg	Lf	A	MO	C	N	C/N	pâte	eau
0-15	4,0	15,0	12,0	19,0	44,5	5,7	3,30	0,30	10,8	7,2	7,4
15-25	2,0	9,5	10,5	18,0	56,0	3,7	2,16	0,19	11,2	7,0	7,5
25-45	3,5	7,0	10,0	33,0	44,0	0,5	0,30	0,08	3,7		8,1
45-70	6,0	7,0	10,0	34,5	40,0	0,6	0,36	0,07	5,4	7,8	8,1
70-90	3,5	6,0	10,0	36,0	42,5	0,2	0,12	0,07	—	7,9	8,2
100-120	5,0	5,0	6,5	38,0	42,0	—	—	—	—	7,9	8,3
150-170	3,0	7,0	8,0	42,0	35,5	—	—	—	—	7,9	8,3

TABLEAU III b

Prof.	$CaCO_3$ %		Cat. échang. méq/100 g					S	Ca
cm	tot.	act.	Ca	Mg	K	Na	T	T	Mg
0-15	tr.	tr.	34,7	1,8	1,3	0,5	38,2	sat.	19
15-25	tr.	tr.	37,4	1,9	1,2	0,7	40,2	sat.	20
25-45	35,0	17,5	23,0	1,1	0,4	0,6	23,6	sat.	21
45-70	38,0	16,5	22,5	1,2	0,4	0,6	22,5	sat.	19
70-90	30,0	16,5	23,1	1,2	0,4	0,6	24,1	sat.	19
100-120	33,0	17,5	—	—	0,3	0,6	—	—	—
150-170	32,0	16,5	—	—	0,3	0,6	—	—	—

La perméabilité des horizons supérieurs de ces sols est assez forte. L'eau s'infiltre rapidement jusqu'au premier banc de calcaire (FIG. 5), où elle stagne plus ou moins, en donnant naissance à un pseudogley, avant de s'écouler latéralement, en suivant les plans des dalles calcaires.

La répartition du calcaire est marquée par cette dynamique de l'eau : les horizons supérieurs sont lessivés et $CaCo_3$ se dépose de 25 à 70 cm au-dessus ; lessivage latéral le long des bancs calcaires.

Le schéma de la distribution du calcaire par classes granulométriques (FIG. 3), montre, mais de façon moins nette, le phénomène déjà observé dans les sols développés sur marnes crétacées : le pourcentage maximum de calcaire dans une classe granulométrique devient de plus en plus superficiel au fur et à mesure que les particules deviennent plus petites.

Mais de plus on remarque que c'est surtout le calcaire de la taille des limons fins qui est soumis au lessivage oblique dans l'horizon B_3g.

Les mouvements du calcaire étant limités au-dessus du banc calcaire, les amas de calcaire pulvérulent qui apparaissent dans la roche-mère, plus en profondeur, doivent être attribués à une diffusion sur place. Ceci avait été également mis en évidence, de façon semblable dans les sols marrons sur marnes oligocènes.

B. *Interprétation des résultats et hypothèse sur la genèse des sols calciques mélaniques*

La nature de la matière organique et la dynamique du calcium sont les deux faits essentiels qui permettent d'élaborer une théorie sur la formation des sols calciques mélaniques.

1. Matière organique

La morphologie de *l'horizon humifère de surface* est très caractéristique, et la belle structure polyédrique fine se retrouve quelle que soit la roche-mère, sur une épaisseur à peu près uniforme de 20 cm. On remarque de plus la constance des principaux résultats analytiques :

— la teneur en matière organique, déterminée par la méthode Anne sur des échantillons prélevés en mars 1968, est toujours très élevée, variant de 5 à 8 % ;

— le rapport C/N oscille entre 11 et 15 ;

— le pH pâte entre 7 et 7,5 ;

— le complexe absorbant est toujours saturé, mais on s'aperçoit de plus que les teneurs en cations sont uniformes, 1,25 méq K^+/100 g, 1,3 à 1,8 méq Mg^{++}/100 g et 35 à 45 méq Ca^{++}/100 g.

Tout ceci incite à penser que le type de matière organique est toujours le même,

Cette matière organique se formerait aux dépens de l'enracinement et des apports du couvert végétal dense, en particulier ceux du doum (*Chamaerops humilis*). Sa décomposition serait fonction des conditions d'humidité rencontrées.

Tous ces sols calciques mélaniques sont soumis en été à des conditions de sécheresse identiques qui empêchent toute humification, tandis qu'en hiver des différences apparaissent dans le degré et la longueur de la période d'engorgement.

Deux séries de prélèvements effectués, à la fin de la période des pluies, et en période sèche (en particulier pour le profil 2), montrent d'ailleurs une variation du rapport C/N d'une unité :

— 16 en été contre 15 en hiver pour l'horizon de surface ;

— et 12 en été contre 10 en hiver pour l'horizon sous-jacent.

Il y aurait donc décomposition de la matière organique pendant la période humide.

D'autre part il existe des variations du rapport C/N entre les différents sols, dont les causes doivent être recherchées dans les conditions hivernales.

En effet, on constate que les sols sur marnes crétacées, qui s'engorgent de façon très prononcée, ont un humus à rapport C/N de 15, tandis que les sols sur marnes Eocènes et Oligocènes, plus perméables en surface, ont des rapports C/N voisins de 11.

La décomposition de la matière organique et la formation du complexe argilo-humique ne pourront donc s'effectuer que pendant une période limitée, fonction du taux d'humidité du sol.

Pour chaque type de sol, la durée favorable sera alors variable, la plus courte ayant lieu dans les sols imperméables sur marnes Crétacés, la plus longue dans les sols perméables sur Eocène.

Mais le processus fondamental de la formation du complexe argilo-humique n'est pas élucidé. On avait d'abord pensé avec SINGH (1956), que l'humus très noir, intimement lié à l'argile, ne pouvait se former qu'en milieu légèrement acide, cette faible acidité locale étant provoquée par les conditions anaérobies saisonnières. Or des prélèvements effectués en janvier 1969 pendant la période d'engorgement ont démenti cette hypothèse : il n'existe pas de variations du pH pâte. Cependant, la belle structure polyédrique de l'horizon de surface en opposition à la structure grumeleuse d'un mull

calcique, conduit à attribuer une importance prépondérante dans la formation du complexe à la période d'engorgement, en accord avec B. LEPOUTRE (1969).

Ce régime hydrique affectant les horizons de surface joint aux valeurs caractéristiques vues au début de ce chapitre, permettrait de classer actuellement ce type d'humus comme hydromull calcique, en attendant des vérifications fournies par des analyses sur la composition chimique.

2. Calcaire

Les mouvements de Ca^{++} sont régis par les mêmes phénomènes que ceux qui prévalent à la formation du complexe argilo-humique, c'est-à-dire par les alternances d'humectation et de dessiccation.

L'étude des courbes de la distribution du calcaire met en évidence deux faits contradictoires : c'est dans les sols sur marnes crétacées, qui sont les plus imperméables, que l'on remarque l'accumulation de calcaire la plus importante et la plus profonde ; les sols très perméables sur marnes Eocènes par contre ne montrent pas d'accumulation nette de calcaire, et de décarbonatation des horizons de surface incomplète.

Cette contradiction peut être levée si on considère que la période d'engorgement de surface est nécessaire pour la solubilisation du calcaire et son entraînement. Durant cette période, où la tension de CO_2 serait plus élevée en raison de la décomposition de la matière organique abondante, du bicarbonate se formerait à partir du carbonate de calcium.

Par la suite, en raison de la longue période d'engorgement, l'humectation s'effectuera profondément dans les marnes les plus imperméables, mais au-dessous d'un certain taux d'humidité, le calcium se déposera.

Après précipitation, des particules fines s'agglomèreront. La profondeur de pénétration de l'eau étant variable, et fonction de la pluviométrie annuelle, la période de dessiccation sera plus longue en profondeur, et la distribution du calcaire par classe granulométrique dans les horizons d'accumulation en traduira le résultat.

En effet si l'élévation des teneurs en calcaire dans un horizon provenait d'une altération de plus en plus poussée de la roche-mère, un ventre du profil calcaire pour une classe granulométrique donnée

serait compensé par une diminution de la teneur en Co_3Ca des classes de texture plus grossière, la teneur totale restant constante.

Le lessivage vertical que nous venons d'envisager n'est pas le seul à se produire, car on ne retrouve pas dans les horizons d'accumulation le taux de calcaire perdu par les horizons supérieurs. Il existe donc un lessivage oblique, qui est d'ailleurs beaucoup plus compréhensible dans ces sols sur pente.

Il faut maintenant envisager la formation des *amas de calcaire pulvérulent* qui correspondraient aux « nodules farineux » de J.H. DURAND, et aux « taches calcaires » de A. RUELLAN.

Ces amas ne se retrouvent que dans les sols sur marnes Crétacées et Oligocènes.

Il a été vu au profil 8 que les amas n'apparaissent que sous les horizons d'accumulation du calcaire, tandis qu'au profil 2 sur Crétacé, l'accumulation du calcaire se poursuit partiellement dans les horizons à amas pulvérulent contenant des agrégats marneux.

De plus des analyses ont montré qu'il n'y a pas de différence significative sur la teneur en calcaire de ces horizons, prélevés avec ou sans amas.

Les amas de calcaire pulvérulent proviendraient donc d'une diffusion de $CaCO_3$ à partir des agrégats marneux, sous l'influence d'une microhydromorphie. Cette microhydromorphie se traduit aussi par la présence de taches rouilles inférieures à 1 mm dans les agrégats marneux.

Il faut enfin noter un résultat annexe à cette dynamique du calcium. Les analyses nous ont montré que *le pourcentage de calcaire actif* varie peu d'un sol à l'autre, et que cette teneur toujours élevée, ne semble pas être une fonction simple du calcaire de la taille des argiles et limons fins.

IV. Classification des séries de sols décrites

Les sols du périmètre de Bou Daroua diffèrent des sols calciques mélaniques décrits précédemment (CPCS 1967) essentiellement par leur profondeur, liée à la nature de la roche-mère. Toutes les autres caractéristiques étant communes, il semble donc actuellement logique de les considérer comme intergrades entre les rendzines humifères et les sols calciques mélaniques.

Le type modal sur marne serait représenté par la série du profil 2. La série du profil 8, sur marnes Oligocènes entrerait dans un sous-groupe hydromorphe à pseudogley.

La série du profil 10, en raison de la décarbonatation incomplète des horizons de surface ne devrait pas entrer dans la sous-classe des sols saturés. Cependant aussi bien en raison des nombreux caractères communs, que de leur proximité dans l'espace, nous classerons ce sol dans les calciques mélaniques. Mais il serait plus exact de le considérer comme un intergrade entre les rendzines humifères et les sols calciques mélaniques.

Dans une toposéquence les sols calciques mélaniques se placent entre les rendzines et les vertisols à drainage externe possible. Leur genèse diffère essentiellement de celle des vertisols par le régime hydrique, et donc par la dynamique du Ca^{++} (HESS et SCHOEN, 1964), mais tous les intermédiaires existent entre les deux types de sol dès l'instant où les conditions d'humidité s'accentuent.

Le groupe des sols calciques mélaniques devrait donc être considéré comme une unité intergrade entre les sols calcimagnésiques, et les vertisols.

Manuscrit déposé le 23 janvier 1969

بـــــودورة

درس الباحث فى ناحية وزان الاراضى واقـــام خريطة لدراســـة تكوين الاثربة فى محيط بودروة (مشروع منظمة التغذية العالمية) F.A.O.

وقد أظهر العلاقـــة الموجودة بين مختلف شـــروط البيئة ونـــوع الاراضى الارزيـــن Rendzines أراضى الكلسية المائية المتحولة الـــى التيرس. وفى هذا البحث يدرس الباحث بصفة خاصة الاراضى الكلسيـــة المائية وتوزيع الكلسيوم فى مختلف الطبقات المكونة ـــ وكذالـــك سرعـــة الماء فى المظهر الجانبى ـــ ويقترح أخيرا بعض التعديلات فى التصنيف .

RÉSUMÉ

Dans la région d'Ouezzane, l'auteur étudie les sols et dresse la carte pédologique du périmètre de Bou Daroua (projet FAO).

Il montre la liaison qui existe entre les différentes conditions de milieu et le type de sol : rendzines, sols calciques mélaniques, sols vertiques.

Dans cette note, il étudie particulièrement les sols calciques mélaniques et la répartition du calcium dans les différentes classes texturales, ainsi que le régime de l'eau dans le profil.

Il propose enfin quelques amendements de classification.

RESUMEN

En la región de Ouezzan, el autor estudia los suelos y prepara el mapa pedológico del perímetro de Bou Daroua (Proyecto FAO).

El autor muestra el enlace que existe entre las diferentes condiciones del medio y el tipo de suelo : redzinas, suelos cálcicos melánicos, suelos vérticos.

En este trabajo, el autor estudia particularmente los suelos cálcicos melánicos y la repartición del calcio en las diferentes clases texturales así como el régimen del agua en el perfil.

El autor propone al final algunas modificaciones en la clasificación.

SUMMARY

On the pre-Rif mountains of Ouezzane, the author studies and inventaries the soils on the Bou-Daroua F.A.O. project.

The shows the relationship between different ecological conditions and types of soils : rendzinas, calcique melanique soils, and vertisoils. The «calcique-melanique» soils are his main topic, and the author gives some analytical results concerning the distribution of the calcareous partiels among the different horizons and teptural classes.

The also studies the movement of water in the soil during the year.

Finally he proposes some modifications in the soil classification system.

BIBLIOGRAPHIE

AUBERT, G. — 1965. Classification des sols. Cahiers ORSTOM, Pédologie.

BREWER, R. — 1960. Cutans : Their definitions, recognition, and interpretation. — Journal of Soil Science, **11**, pp. 280-292.

DURAND, J.H. — 1953. Etude géologique, hydrologique et pédologique des croûtes en Algérie. — Serv. des Etudes Sci., 209 p., Alger.

— 1956. Les croûtes calcaires s.l. d'Afrique du Nord étudiées à la lumière de la Bio-Rhexistasie. — Serv. des Etudes Sci. Pédologie et Agrologie, Bulletin n° **2**.

DURAND, R. — 1968. Etude pédologique du périmètre de Bou Daroua. — Ann. Rech. For. Maroc, (en préparation).

HESS, C. et U. SCHOEN. — 1964. Tirsification et classification des vertisols. Apport de l'analyse minéralogique des argiles à la connaissance des tirs. — Al Awamia, **13**, pp. 49-92.

LEPOUTRE, B. et A. SAUVAGEOT. — 1967. Une détermination des capacités d'échange et des taux de saturation respectifs de la matière organique et des minéraux argileux dans le complexe absorbant des sols. — Cahiers ORSTOM, Pédologie, vol. V, n° **2**, pp. 219-240.

LEPOUTRE, B. — 1969.Les sols formés sur marnes helvétiennes et tortoniennes de la région de Fes et leurs vocations forestières. — Ann., Rech. For. Maroc., T. **10** (en préparation).

RUELLAN, A. — 1968. Les horizons d'individualisation et d'accumulation du calcaire dans les sols du Maroc. — Comm. 9e Congrès Intern. Science du Sol, Adelaïde.

SERVAT, E. — Cours de pédologie. — Ensa Montpellier.

SINGH, S. — 1956. The Formation of Dark-Coloured Glay — Organic Complexes in Black Soils. — Journal of Soil Science, Vol. 7, n° **1** pp. 43-58.

SUTER, G. — 1965. La région du moyen Ouerrha (Rif, Maroc) : étude préliminaire sur la stratigraphie et la tectonique. — N. et M. Serv. Géol. Maroc n° **183**, pp. 7-17.

SUTER, G. et G.G. FIECHTER. — 1966. Le rif méridional atlantique (Maroc : aperçu structural sur la région de Zoumi-Ouezzane et le pays du Habt (Larache). — Ibid n° **188**, pp. 15-18.

TRAVAUX CPCS. — 1967. Classification des sols.

L'EROSION HYDRAULIQUE AU MAROC : SON CALCUL ET SON CONTROLE

B. HEUSCH *

SOMMAIRE

Introduction
I. Estimation quantitative du transport solide
A. Etude du transport solide sur grands bassins versants
B. Etude du transport solide sur petits bassins versants
1. Considérations générales
2. Erosion mesurée sur les petits bassins versants du Pré-Rif
C. La perte en terre des versants, par ruissellement diffus ou concentré
II. Contrôle de l'érosion
A. Bilan de l'érosion
B. Contrôle de l'érosion agricole
C. Contrôle de l'érosion globale
Conclusion

Introduction

Le terme d'érosion hydraulique désigne un ensemble de processus par lesquels deux agents, la pluie et le ruissellement, détachent et transportent les particules terreuses. L'érosion a pour conséquence une exportation de terre qui, si elle n'est pas compensée par une

* Directeur-ingénieur, Sation de Recherches Forestières, Rabat.
Al Awamia, 36, pp. 39-63, juillet, 1970.

régénération du sol à partir de la roche-mère sous-jacente, se traduit par un appauvrissement du milieu et une réduction de la production agricole. Mais d'autre part les eaux de percolation entraînent avec elles différentes substances. Un certain rajeunissement du sol par décapage pourrait donc être souhaitable, afin de contrebalancer le phénomène du lessivage, si l'essentiel des éléments fertilisants n'est pas localisé en surface.

Pour maintenir l'érosion entre certaines limites il est nécessaire de pouvoir évaluer avec un minimum de précision l'influence de chacun des facteurs de l'érosion sur ce phénomène. Mais ces différents facteurs - sol, pente, couverture végétale... ne sont pas des variables indépendantes. L'écologie étudie les corrélations partielles qui lient ces différents paramètres entre eux. Il en résulte qu'il est possible de proposer des formules approchées de calcul de l'érosion avec un nombre réduit de variables. Ce sera l'objet de la première partie de cette étude. Afin de pouvoir modifier efficacement le taux d'abrasion, il est nécessaire de disposer de méthodes de contrôle simples, s'appuyant sur une idée précise du mécanisme érosif. Ce sera l'objet de la deuxième partie de l'étude.

I. Estimation quantitative du transport solide

Les valeurs extrêmes se compensant naturellement, la mesure du transport solide sur un fleuve important donne une indication précise sur l'érosion globale moyenne de la région drainée. Grâce aux corrélations naturelles, le nombre de paramètres qu'il est nécessaire de faire intervenir pour expliquer les taux d'abrasion observés décroît lorsque la taille du bassin versant augmente. Nous étudierons donc d'abord l'érosion sur grands bassins.

A. Etude du transport solide sur bassins versants de plus de 500 *km²*

Nous avons rassemblé sur le tableau 1 l'ensemble des données disponibles au Maroc, en ce qui concerne le transport solide, avec les abréviations suivantes :

S = superficie en km²

P = précipitation moyenne annuelle, en mm/an,

Qla = lame d'eau ruisselée, moyenne annuelle, en mm/an, transport solide moyen annuel ou érosion globale en mm/an,

Qsa = t/km²/an,

TABLEAU 1

Oued	Station	S	P	Qla	Qsa	T
Sebou	Aïn Timedrine	4 429	655	156,2	590	3,76
Moulouya	Mechra Klila	51 500	306	30,5	130	4,26
Sebou	Pont du Mdez	3 474	667	72,6	320	4,36
Sebou	Azib es Soltane	16 276	684	135,6	650	4,85
Sebou	Pont du Sebou	12 985	730	152,2	750	4,90
N'Fiss	Cavagnac	1 707	513	87,4	430	4,91
Sra	Pont du Sker	486	1 391	683,3	3 500	5,15
Aoulaï	Rhafsaï	776	1 153	565,3	2 960	5,26
Beht	El Kansera	4 536	541	79,2	450	5,68
Inaouene	Touaba	3 324	831	167,0	1 110	6,68
Ouerrha	Ourtzarh	4 398	1 074	459,3	3 340	7,10
Aoudour	Tafrannt	1 039	1 179	490,2	3 850	7,85
Ouerrha	Mjara	6 183	1 065	441,3	2 460	7,93
Lebène	Tissa	792	836	280,2	2 250	8,06
Ouerrha	Bab Ouender	1 756	966	325,6	3 590	11,03

T = Qsa/Qla = turbidité moyenne de l'eau, en g/l,
R = coefficient de corrélation.

Débits solides mesurés au Maroc, classés par turbidité croissante

L'étude de ce tableau montre que la turbidité moyenne de l'eau varie de 4 g/l pour des bassins peu cultivés, à 11 g/l pour des bassins marneux très érodés, autour d'une médiane de 5 g/l. La quantité de terre érodée est essentiellement fonction de la lame d'eau ruisselée. La corrélation :

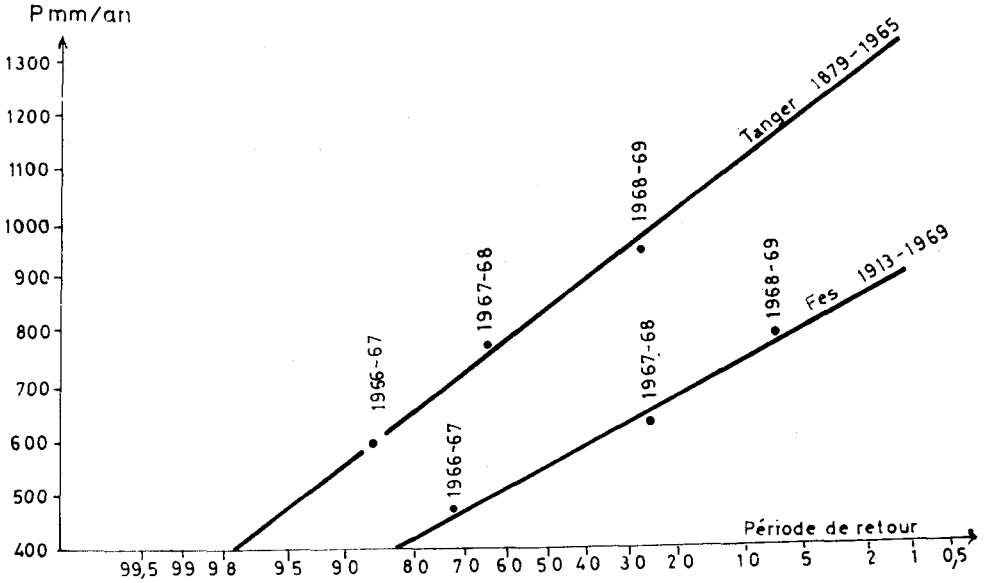
$$\log Qsa = 1{,}16 \log Qla + 0{,}411 \quad (I)$$

où $Qsa = 2{,}58 . Qla^{1,16}$ est vérifié avec un coefficient de corrélation $R = 0{,}973$

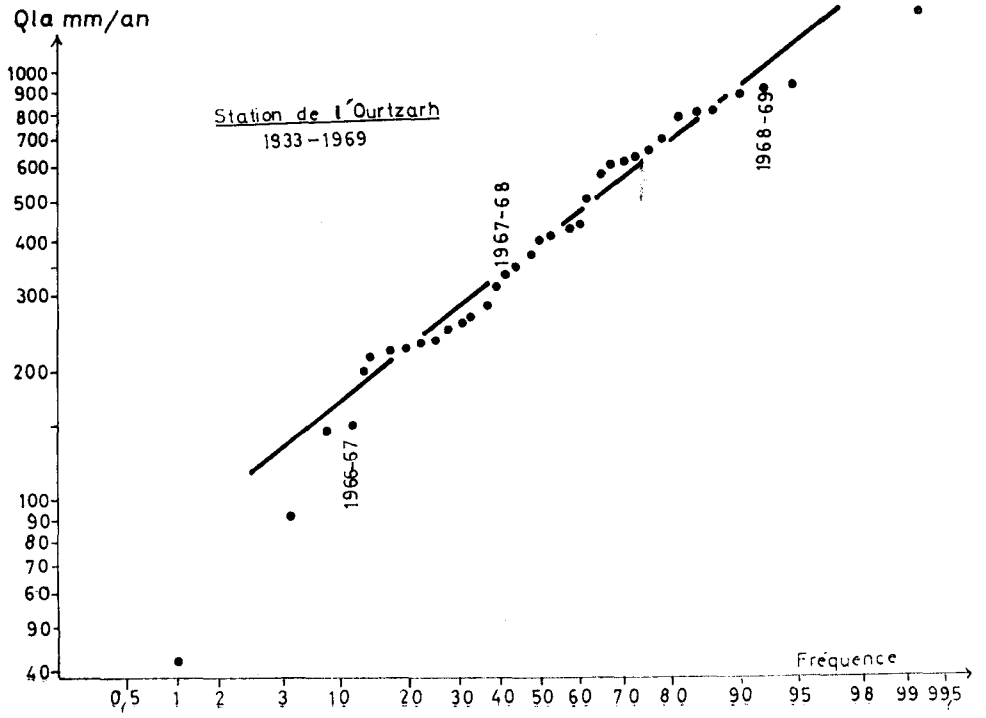
La lame d'eau ruisselée varie en fonction des précipitations ; 4 ajustements statistiques ont été étudiés entre P et Qla avec l'une des 4 hypothèses suivantes :

FIGURE 1

Distribution fréquentielle des précipitations annuelles



Distribution fréquentielle du ruissellement annuel



1. Nous constatons que la distribution fréquentielle des pluies annuelles (année agricole) semble obéir à la loi de Laplace-Gauss ou loi normale, et que le logarithme du débit annuel semble obéir à la même loi (FIGURE 1). Si les événements pluies et les événements débits de même fréquence se produisent au même moment la relation entre P et Qla pourrait être de la forme :

$$P = a \log Qla - b$$

2. Si le coefficient de ruissellement augmente proportionnellement aux précipitations, on aurait $Qla/P = a\ P\text{-}b$
où $Qla = a\ P^2\text{-}bP$;

3. Si le coefficient de ruissellement est constant on aura : $Qla = aP\text{-}b$;

4. Le coefficient de ruissellement tend vers une asymptote (voisine de 1) pour une précipitation infinie. L'hyperbole d'équation :

$Qla = (aP\text{-}b)^2/P$ obéit à cette hypothèse.

Dans les 4 cas le coefficient b doit être négatif car il faut une certaine quantité d'eau pour amener le sol à la capacité de rétention après les sécheresses de l'été. Les coefficients a, b et R ont été calculés dans chaque hypothèse et l'on obtient les relations suivantes, qui vérifient les données du tableau 1.

1. le logarithme : $P = 614 \log Qla - 560$ $R = 0{,}943$
2. la parabole : $Qla = 4{,}5.10^{-4}.P^2 - 9.10^{-2}.P$ $R = 0{,}954$
3. la droite : $Qla = 0{,}66.P - 270$ $R = 0{,}969$
4. l'hyperbole : $Qla = (0{,}96\ P\text{-}360)^2/P$ (II) $R = 0{,}9915$

On remarque que les quatre coefficients R sont tous satisfaisants.

A partir de la carte des précipitations moyennes annuelles (GAUSSEN, DEBRACH et JOLY, 1958), à l'aide de la relation (I) reliant Qsa à Qla, et de la relation (II) reliant P à Qla, une carte des érosions du Maroc a été dressée. Un planimétrage expédié a permis de dresser le tableau 2.

Le Rif occidental, qui ne couvre que 2 % du Maroc fournirait à lui seul 40 % de la terre érodée. L'étude du tableau 2 permet aussi de proposer les équivalences suivantes, valables à l'échelle régionale, entre la turbidité moyenne de l'eau, et les formes dominantes d'érosion :

Ravinement généralisé	10 g/l
Solifluxion humide	8 g/l
Entailles et ravines fréquentes	6 g/l
Entailles sporadiques	4 g/l.

FIGURE 2

Relations entre valeurs classées

(Graphiques schématiques, coordonnées logarithmiques)

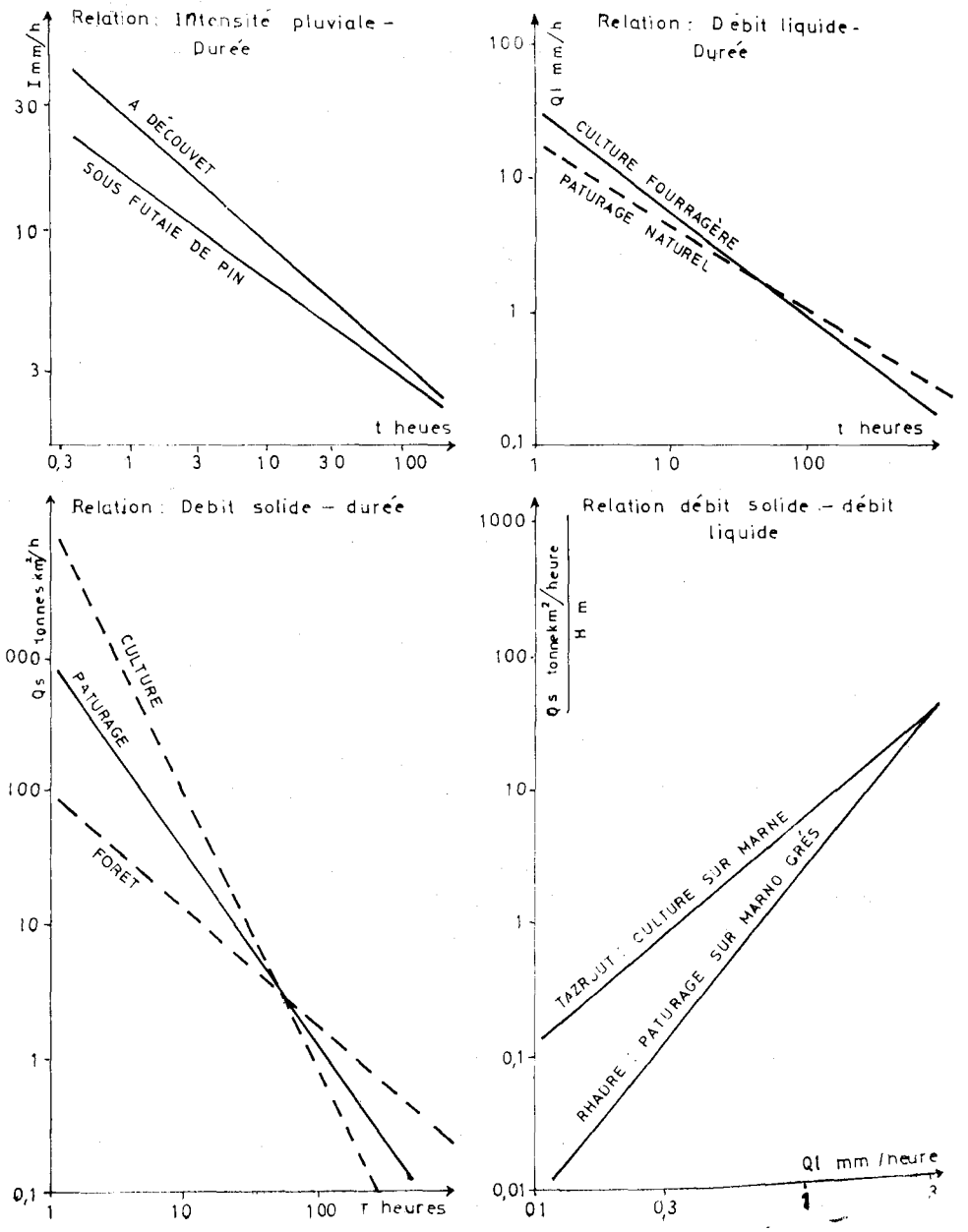


TABLEAU 2

Région	Forme d'érosion	Erosion t/km²/an	En % du total superficie	perte en terre
Anti-Atlas, Sahara, plaines de la Moulouya et du Souss	Remaniements locaux	25	66	8
Plaines du Tensift, de l'Oum er Rbia, du Bou Regreg et du Sebou	Erosion lente	150	17	10
Rif Oriental, Moyen Atlas tabulaire, pateau Central, Haut-Atlas	Entailles sporadiques	400	11	20
Moyen-Atlas plissé, bordure atlantique du Rif	Entailles et ravines fréquentes	700	2	7
Bordure méditerranéenne du Rif, Pré-Rif	Ravinements généralisés	1 700	2	16
Rif Occidental	Solifluxion	3 500	2	39

B. L'étude du transport solide sur petits bassins

1. Considérations générales

L'observation montre une très inégale répartition des marques de l'érosion. L'existence des sapements de berges et de pieds de montagne démontre que l'érosion ne se produit pas seulement sur les versants. La région du Pré-Rif occidental qui présente une érosion moyenne, a été retenue pour une étude détaillée du phénomène. Au cours de ces investigations un certain nombre de relations qui paraissent avoir une portée générale, ont été mises en évidence (FIG. 2).

Soit I l'intensité pluviométrique en mm/heure, Ql le débit liquide instantané en mm/heure Qs le débit solide instantané en tonnes/km²/heure, nous observons que les intensités et débits classés en fonction du temps t obéissent à des relations du type :

$$y = a.x^n, \text{ a et n étant des paramètres variables.}$$

Une relation semblable relie Qs à Ql.

Il en résulte que le débit solide annuel Qsa mesuré à une station de jaugeage varie en fonction du débit liquide annuel suivant la relation :

$$Qsa = a \cdot Qla^n$$

En ce qui concerne les oueds de la région rifaine, n est compris entre 1,5 et 2,5.

Justification des relations observées

Si l'on observe une relation $I = a.t^n$, cela pourrait expliquer la relation $Ql = a.t^n$, le ruissellement étant sous la dépendance de la pluie.

Par ailleurs $Qs = a.Ql^n$; le débit solide croît plus vite que le débit liquide, ou si l'on préfère la turbidité $Qs/Ql = a\ Ql^{n-1}$ croît en fonction du débit. Ceci est dû comme on va le voir, au fait que la fraction d'énergie W" disponible pour l'érosion et le transport, augmente lorsque l'énergie globale W augmente, c'est-à-dire Ql croît.

Nous savons que :

$$W = S.V.i = Ql.i$$

S = section mouillée,
V = vitesse moyenne de l'eau,
i = pente de l'eau.

D'après la formule de Manning

$R = S/P$ R = rayon hydraulique b = constante
$V = b.R^{2/3}.i^{1/2}$ P = périmètre mouillé a = constante

Il en résulte $W = P.b.R^{5/3}.\ i^{1/2}$.

D'autre part, soit W' l'énergie dissipée en frottement contre les rugosités du lit. On sait que : $W' = a.P.i$.

On en déduit $W/W' = (b.i.^{0,5}/a)\ R^{5/3}$. Le terme entre parenthèse peut-être considéré comme une constante C.

Puisque $W = W' + W''$, on a $W''/W = 1 - W'/W$
$W''/W = 1 - R^{-5/3}/c$

Lorsque le débit Ql augmente, le rayon hydraulique R croît, l'expression W"/W croît jusqu'à une asymptote égale à 1. On peut en conclure que W" croît plus vite que W lorsque Ql croît.

Les autres relations évoquées en début du paragraphe B découlent du fait que la primitive de la fonction $y = a.x^n$ est une fonction semblable $y = a.x^{n+1}/n+1$.

2. L'érosion mesurée sur les petits bassins versants du Pré-Rif

Les mesures ont été effectuées en utilisant l'appareillage décrit par KILPATRICK (1965) et les calculs menés suivant les méthodes

décrites dans le paragraphe précédent I.B. Les résultats sont présentés dans le tableau 3, avec les abréviations suivantes :

S = superficie du bassin versant, en km^2

Qla = lame d'eau ruisselée au cours de l'année (1/9-31/8) en mm/an,

H = hauteur moyenne de bassin versant, en m,

Qsa = érosion globale annuelle en $t/km^2/an$.

H se calcule comme la différence entre l'altitude moyenne du bassin versant et l'altitude de la station de jaugeage. L'altitude moyenne du bassin est définie comme étant la courbe de niveau qui sépare la surface du bassin versant en deux parties égales. Qla se calcule en divisant le volume d'eau écoulé pendant l'année agricole, mesuré à la station de jaugeage, par la superficie du bassin versant. Qsa est le débit solide spécifique annuel ayant transité par la station de jaugeage au cours de la même période.

Les petits bassins versants (moins de 25 km^2) sont tous situés dans la région d'Ouezzane. On y a mesuré le charriage de fond, à l'aide de fosses à sédiments : il avoisine généralement 7 % du transport solide en suspension.

L'analyse graphique (FIG. 3) et le calcul statistique conduisent à la corrélation suivante :

$$Qsa = 1{,}13.10^{-3}.Qla^{1,6}.H^{1,003} \quad \text{(III)}$$

ou

$$\log Qsa = 1{,}61 \log Qla + 1{,}003 \log H - 2{,}947$$

avec un coefficient de corrélation R = 0,97. En simplifiant, cette relation peut s'écrire : $Qsa = 10^{-3}.Qla^{1,6}.H = 10^{-3}.W.Qla^{0,6}$.

Les écarts entre valeurs mesurées et valeurs calculées qui atteignent en moyenne 15 % du chiffre mesuré sont évidemment causés par le fait que l'on néglige de tenir compte des autres caractéristiques physiques des bassins. Le Pré-Rif étant relativement homogène en ce qui concerne les sols et la végétation et ces deux facteurs étant partiellement sous la dépendance du climat et du relief, il ne peut y avoir de gros écarts par rapport à la moyenne.

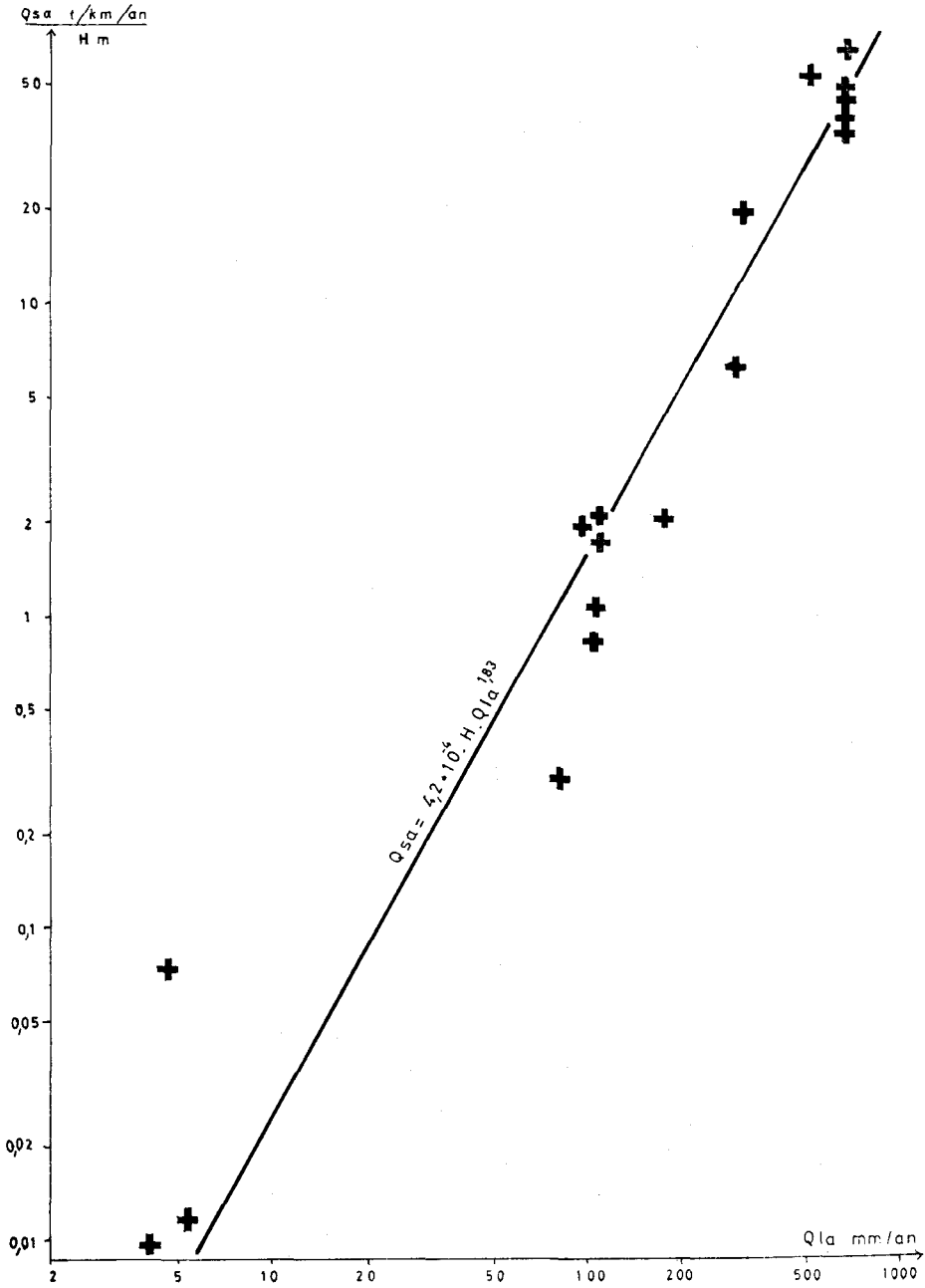
On remarque que les 18 valeurs disponibles qui vérifient cette corrélation couvrent le domaine suivant :

— S est compris entre 0,8 ha et 3 300 km^2,

— H est compris entre 18 et 530 mètres,

FIGURE 3

Analyse graphique de la relation entre l'érosion (Qsa), la lame d'eau ruisselée (Qla) et la hauteur moyenne (H) du bassin versant



— Qla est compris entre 4 et 640 mm/an, ce qui correspond, tant pour la pluviométrie que pour le ruissellement, a des années pouvant largement s'écarter de la moyenne (FIG. 1),

— Qsa est compris entre 0,3 et 4 500 t/km², et croît lorsque la taille du bassin versant augmente.

TABLEAU 3

Erosion spécifique mesurée dans le Pré-Rif

Bassin versant	Période	S	Qla	H	Qsa
Tazrout	66-67	0,909	5,4	24,3	9,3
Rhadra	66-67	0,883	4,2	67,8	0,7
D'Har Ktatan	67-68	0,008	78	18	5
Mda	66-67	24,3	4,6	122,9	9
Jorf Taaleb	67-68	0,188	100	30	25
Tazrout	67-68	0,909	104,6	24,3	52
Rhadra	67-68	0,883	101,2	67,8	74
Cheikh	67-68	1,565	103,9	66,6	116
Mda	67-68	24,3	93,3	122,9	247
D'Har Ktatan	68-69	0,008	484	18	1 000
Tazrout	68-69	0,909	624	24,3	1 000
Inaouene	33-62	3 324	167	530	1 110
Bou Deroua	36-62	8,27	295	60	1 200
Jorf Taaleb	68-69	0,188	625	30	2 000
Lebene	33-62	792	280,2	355	2 250
Rhadra	68-69	0,883	630	67,8	3 230
Cheikh	68-69	1,565	640	66,6	3 420
Mda	68-69	24,3	620	122,9	4 480

Sachant que l'énergie potentielle du ruissellement W = Qla.H, la corrélation (III) obtenue signifie que l'érosion est fonction de l'énergie de ruissellement, multipliée par un coefficient d'efficacité qui croît en fonction de la lame d'eau ruisselée. On peut en conclure que l'énergie absorbée pour le transport du matériel solide est minime par rapport à l'énergie déployée pour enlever ce matériel. Si l'énergie cinétique des gouttes de pluie intervenait pour expliquer l'érosion, il aurait été nécessaire d'en tenir compte dans la relation (III). Or cela n'est pas nécessaire. En effet l'énergie cinétique des pluies, calculée

par la formule de LAWS et PARSONS (1943), est égale à 16,5 joules/mm/m². Rappelons que l'eau de ruissellement déploie une énergie potentielle de 9,82 joules/mm/m² lorsque la hauteur H du bassin versant est égale à 1 mm.

L'existence de cette corrélation (III) implique que le réseau hydrographique ne peut être assimilé à un collecteur d'égout, évacuant les matières solides érodées sur les pentes. Il joue un rôle dynamique et commande l'évolution des versants.

En appliquant une relation simplifiée :

$$Qsa = a.Qla^{1,6}.H.10^{-4}$$

aux données du tableau 1, on obtient les valeurs extrêmes de a suivantes :

Aïn Timedrine (bassin non cultivé sur calcaire karstique) a = 1,8

Tissa (bassin cultivé sur marne tendre) a = 7,7

En ce qui concerne les bassins sur schistes ou marnes schisteuses, le coefficient a varié de 2 à 5 suivant la densité de la couverture végétale

(Rhafsaï a = 2,1 ; El Kansera a = 5,4)

C. La perte en terre des versants, par ruissellement diffus ou concentré

20 parcelles de mesure d'érosion sous pluie naturelle ayant fonctionné pendant trois ans à la station du Mda, près d'Ouezzane et 60 essais sur parcelles au simulateur de pluie ont permis un certain nombre de mesures.

L'équipement des parcelles fixes est conforme à l'appareillage décrit par FOURNIER (1955). La valeur médiane des pertes mesurées annuellement se rapproche de la valeur calculée à partir de la corrélation du pagraphe I.C (chiffres de perte en terre en t/km²/an).

TABLEAU 4

Erosion moyenne des versants

Campagne de mesure	1966-67	1967-68	1968-69
Valeur calculée	0,0001	0,65	600
Médiane mesurée	0	7,0	836

En tout point du versant l'érosion varie en fonction du ruissellement et de la pente suivant la relation :

$Qs = 24{,}4.\ Ql.e^{0{,}05\,i}$ (KALMAN, 1970) avec

Ql = débit liquide instantané en mm/h

Qs = débit solide instantané en t/km²

i = pente en %.

Il n'a pas été possible de calculer Ql à partir des pluies, mais les constatations suivantes ont été faites.

Sur un versant la lame d'eau ruisselée Q est égale à la somme du ruissellement de surface Ql, et du ruissellement hypodermique. Le débit Q croît en fonction de l'intensité I de la pluie, et de la longueur L du versant, mesurée à partir de la crête. Lorsque I est inférieur à la vitesse d'infiltration de l'eau dans le sol, toute la pluie pénètre, à condition que la circulation hypodermique soit suffisamment rapide. Cette vitesse de circulation est sous la dépendance de la loi de Darcy ; elle augmente avec la charge hydraulique, c'est-à-dire l'intensité pluviale et la pente du terrain. Pratiquement, avec les faibles intensités pluviales que l'on observe au Maroc (0,5 - mm/heure), le ruissellement de surface n'est important qu'en bas de versant. C'est dans cette zone que transite le maximum d'eau, et avec des vitesses faibles, puisque la pente est faible. Dans ces conditions le sol est gorgé d'eau et le ruissellement de surface s'installe.

L'érosion sera fonction de la lame d'eau ruisselée, et de son énergie.

L'exemple suivant illustre ces affirmations, il concerne trois groupes de deux parcelles échelonnés le long d'un même versant.

TABLEAU 5

Influence de la pente et de la position topographique sur l'érosion mesurée à la parcelle

(total pluviométrique annuel 725 mm, sol nu sur marne)

Distance de la ligne de crête, en m	120	160	220
Pente en %	35	25	12
Ruissellement cumulé en mm	0,1	1,0	12,9
Energie du ruissellement, en joules/m²	4	27	169
Erosion en t/km²	5,8	8,7	342

La manipulation de la couverture végétale et le travail du sol modifient la perméabilité K, le ruissellement Qla, et l'érosion Qsa comme on le constate avec les exemples suivants :

TABLEAU 6

Erosion et mise en valeur des sols sur marne à argile sodique

Précipitations 1 180 mm, pente 25 %	K mm/heure	Qla mm/an	Qsa t/km²/an
Végétation naturelle (maquis)	50	4,6	30
Sol nu en jachère	38	5,4	68
Labour à l'araire (blé dur)	18	21,5	196
Labour au tracteur (blé dur, fumure)	6	52,0	543

Le labour, particulièrement à la charrue à disque crée une semelle de labour peu perméable, et diminue la cohésion du sol. L'érosion croît avec l'intensité de la mise en valeur. Le remplacement d'une espèce végétale par une espèce analogue de même type, par exemple pin des Canaries et chêne-liège, maquis et pâturage, blé dur et alpiste, modifie peu les pertes en sol ; par contre la productivité du terrain peut être considérablement améliorée. De même la modification des méthodes de travail du sol, l'emploi d'engrais et de variétés sélectionnées augmentent les rendements, sans beaucoup influer sur les taux d'abrasion. En éliminant la culture des versants, et en intensifiant la production sur les terrains plats, on peut espérer réduire l'érosion agricole du bassin versant, sans modifier le revenu des habitants dans les mêmes proportions.

Les griffes d'érosion

En dehors d'une érosion diffuse par des filets d'eau plus ou moins individualisés, on observe fréquemment sur les versants de véritables griffes d'érosion, soit rigoles peu profondes qu'effacent les labours d'automne (rills) soit véritables ravines qui entaillent les versants (gullies). Les unes et les autres sont les indices d'une érosion accélérée.

Plusieurs parcelles ont présenté des traces d'érosion des rigoles, les pertes annuelles en terre étant comprises entre les extrêmes suivants :

TABLEAU 7

Erosion en rigoles

Campagne	1967-68	1968-69
Ruissellement de surface, en mm/an	15,7	323
Erosion, en t/km²/an	508	5 495

L'érosion en ravines est particulièrement préoccupante. L'une de celles-ci draine un bassin versant de 6 ha, dont 1,5 ha environ sur marne profondément disséquée par les ramifications de la ravine. La turbidité moyenne annuelle des eaux qui s'écoulent est voisine de 200 g/l. L'érosion, extrêmement vigoureuse, se traduit par les dégradations spécifiques du bassin versant du tableau 8.

TABLEAU 8

Erosion par ravines : bassin de l'Oued Zelzala

Campagne	1966-67	1967-68	1968-69
Précipitations, en mm/an	564,5	681,7	1 143,1
Ruissellement, en mm/an	4,5	102,5	578
Erosion, en t/km²/an	200	4 187	27 900

Les berges instables de l'Oued s'éboulent ou glissent au fond de la ravine et les matériaux sont repris par le ruissellement.

Des turbidités moyennes presque aussi fortes ont été observées sur des oueds drainant des bassins versants plus importants, par exemple l'oued Amassine, près de Tahar Souk — Bassin versant 45 km², turbidité 50 g/l — ou l'oued Fodda, Algérie — Bassin versant 770 km², turbidité 28,5 g/l — Ces bassins sur roches tendres présentent les traces d'une érosion intense.

II. Le contrôle de l'érosion

Une lutte efficace contre l'érosion exige l'élaboration d'un plan d'action rationnel. Il faut intervenir au bon endroit, aux moindres frais, en fonction du but recherché.

A. Un bilan de l'érosion

A titre indicatif, le tableau 9 indiquant les origines des matériaux transportés par l'Oued Mda, a été dressé à partir de nos observations.

TABLEAU 9

Provenance de l'érosion, en %

Campagne	1966-67	1967-68	1968-69
	année sèche	année moyenne	année humide
Versants	0,01	3	19
Ravines (gullies)	67	52	19
Sapement de berges	33	45	62
Total	100	100	100

Le sapement de berges a été calculé par différence. Il correspond d'une part à un élargissement actuel du lit des rivières, consécutif au défrichement qui augmente l'amptitude des crues, et d'autre part à la poussée des versants sur les berges à la suite de glissements de terrains. La destruction de la végétation naturelle et son remplacement par une couverture de céréales, entraîne la disparition progressive de l'armature fournie par un puissant réseau de racines solides, ce qui diminue la cohésion du versant et facilite le glissement du manteau d'altération vers le bas.

Le tableau 9, montre que si l'on supprime l'érosion par ruissellemenet de surface sur les versants sans modifier la vitesse d'écoulement des eaux, l'érosion globale ne sera que faiblement atténuée.

En effet l'énergie potentielle du ruissellement s'extériorise essentiellement en dehors des versants, le long du réseau hydrographique.

B. Le contrôle de l'érosion agricole

L'érosion agricole se traduit par une érosion en nappe ou en rigoles, qui entraîne une perte de fertilité du terrain, et par une érosion en ravines, qui diminue la superficie cultivable.

La première n'est dangereuse que si la vitesse de régénération du sol à partir de la roche-mère sous-jacente est inférieure à la vitesse de l'érosion. La vitesse d'altération des roches est très mal connue, et paraît varier en fonction de la pluviométrie. En première approxi-

mation, d'après nos observations, nous proposons les vitesses de régénération suivantes :

Calcaire compact	1 cm en 2 000 ans
Schiste	1 cm en 300 ans
Marne	1 cm en 10 ans

sous une pluviométrie moyenne annuelle de 500 mm.

L'érosion en nappe ou en rigoles est surtout dangereuse dans les terrains ou la pédogenèse s'effectue au ralenti — Pluviométrie inférieure à 400 mm, roches peu altérables — et dans les régions où les orages d'été à forte intensité pluviale sont fréquents. Dans ces conditions il est difficile de maintenir une couverture végétale dense autre que le maquis ou la steppe. Si les nécessités imposent la culture, il est possible de diminuer la force vive des eaux sauvages en modelant le versant par des terrasses en escalier. La banquette de rétention où les eaux troubles se décantent et s'infiltrent est efficace en terrain limoneux. C'est ainsi que les 9/10 des terrains traités en banquettes aux U.S.A. sont, pour des raisons climatiques * et pédologiques ** situés en Oklahoma, Kansas et Nebraska. Lorsque des pierres sont disponibles, la correction torrentielle peut être envisagée, en consolidant les atterrissements par la plantation d'arbres. Le traitement des zones affouillables des cours d'eau est toujours d'un coût très élevé, et son efficacité est limitée aux sections traitées.

Sous climat humide il est préférable de s'orienter vers des méthodes biologiques — boisement par des arbres forestiers, fruitiers ou taillis d'arbres fourragers ; enherbement — de coût moins élevé. La banquette a plus tendance à modifier la forme de l'érosion qu'à diminuer son intensité. Dans bien des cas, une érosion par ruissellement de surface se transforme, soit en érosion par solifluxion si l'on implante des banquettes de rétention, soit en érosion par ravines si l'on implante des banquettes de diversion. Les méthodes biologiques impliquent le remplacement d'une agriculture primitive — culture itinérante sur brulis ou céréaliculture extensive — par une économie montagnarde évoluée associant l'élevage sur terrains argileux à l'exploitation forestière ou arboricole sur terrains plus cohérents, ou plus stables.

---

* La lame d'eau ruisselée annuellement varie de 10 à 70 mm.

** Sols sur limon éolien à structure instable.

C. *Le contrôle de l'érosion globale*

La végétation contribue fortement à régulariser la circulation de l'eau et transforme une précipitation violente et discontinue en un écoulement relativement stable. Le défrichement et la mise en culture des versants montagneux se traduisent par une augmentation de l'amplitude des crues. Les lits des oueds s'élargissent pour laisser le passage à un débit maximum en augmentation, et corrélativement le débit solide augmente à son tour par sapement de berges. Le tableau 10 compare la fréquence des inondations graves dans la plaine du Rharb au cours des deux périodes 1904-1937 et 1937-1970, à la fréquence des années à forte pluviométrie à Tanger et Essaouira, seules stations disponibles, qui malheureusement ne font qu'encadrer le bassin versant.

TABLEAU 10

Fréquence comparée des précipitations et des inondations

Période	1904-1937	1937-1970
Rharb : Nombre d'inondations à volume de débordement supérieur à 100 hm^3	4	12
Tanger : Nombre d'années à pluviométrie supérieur à 1 000 mm	7	11
Essaouira : Nombre d'années à pluviométrie supérieure à 400 mm	4	5

Il ressort de ce tableau que la fréquence des inondations a augmenté pendant la deuxième période, le coefficient d'accroissement étant de 3,5 ; la fréquence des années à forte pluviométrie est également en augmentation, le coefficient moyen d'accroissement étant seulement de 1,4. La différence des taux d'accroissement serait sans doute à imputer au défrichement des montagnes du Rif et de l'Atlas, consécutif à un accroissement démographique anormalement élevé.

L'accroissement du débit solide global et l'augmentation de l'amplitude des crues gênent peu le montagnard. N'en supportant pas les conséquences, il cherche peu à y remédier. Par contre l'envasement accéléré des barrages, la désorganisation du réseau de communications, la destruction des récoltes par l'inondation, le comblement des ports d'estuaires touchent l'ensemble de la communauté. Pour lutter contre

l'érosion globale, il faut envisager une solution efficace globalement. Sur le plan technique on peut :

— atténuer les fortes intensités pluviométriques ;

— laminer les pointes de crue ;

— augmenter la cohésion du sol et diminuer la turbidité des eaux (FIG. 2).

Modification des intensités pluviométriques

Les pluies dont l'intensité est très variable dans le temps, sont interceptées par le feuillage. Les pointes pluviométriques sont atténuées par un stockage temporaire et partiel sur l'écran foliaire. Au contraire les pluies de faible intensité durent plus longtemps sous forêt qu'en plein air. Ce phénomène d'observation courante a été vérifié à l'aide de pluviographes disposés sous divers espèces végétales. La densité du feuillage, la forme et la disposition des feuilles interviennent évidemment sur le phénomène.

Modification des débits liquides

La vitesse du ruissellement sur les versants peut être modifiée en intervenant sur le ruissellement de surface et sur le ruissellement hypodermique. L'absence de litières augmente la vitesse du ruissellement de surface. La modification de la porosité — compactage de la surface, semelle de labour... — diminue la quantité d'eau susceptible de s'infiltrer. Enfin certaines observations faites en cases lysimétriques à Coshocton (HARROLD et DREIBELLIS, 1958) montrent que la vitesse de percolation est augmentée par le labour.

Le travail du sol modifie considérablement la répartition des débits liquides, par une transformation de la porosité du sol. Cette altération de la structure paraît d'autant plus grave que les façons culturales sont conduites avec énergie. L'utilisation des désherbants sélectifs, la suppression du labour ou sa limitation à la mise en place de la semence sont des techniques dont le retentissement sur l'intensité du débit liquide reste à étudier.

La régularisation du débit liquide a non seulement pour effet de diminuer la fréquence des gros débits instantanés, mais aussi, comme on peut le constater sur le tableau 11, de diminuer l'importance du transport solide global.

S'il avait été possible d'écouler les 24 000 m^3 de la tranche horaire 6 000 - 9 000 en 500 heures au lieu de 4, le transport solide

TABLEAU 11

Oued Rhadra — Campagne 1968-69. Tableau des débits horaires classés

Tranche de débit m³/heure	Durée en heures	Débit liquide en m³	Débit liquide en % du total	Débits solides en tonnes	Tubidité moyenne en g/l
0- 100	500	39 000	7	1	0,025
100-1000	1 380	310 000	56	71	0,72
1000-2000	80	86 000	15	183	2,1
2000-4000	26	56 000	10	435	7,8
4000-6000	10	41 000	7	999	24,3
6000-9000	4	24 000	5	1 161	48,4

annuel aurait été réduit de 40 % et le débordement de la rivière évité.

Modification de la turbidité de l'eau

La turbidité est égale au quotient Qs/Ql. Nous avons vu, en I.B., que $Qs = aQl^n$ avec n voisin de 2 ; il en résulte que $Qs/l = a\,Ql^{n-1}$. La turbidité est particulièrement forte en ce qui concerne les forts débits, comme on le constate sur le tableau 11. En diminuant l'amplitude des crues on diminuera également le débit solide moyen annuel.

Mais d'autre part il est également possible d'agir sur le paramètre a et l'exposant n de la relation $Qs = a.Ql^n$. Ces paramètres, fonctions des caractéristiques physiques du bassin versant, traduisent l'efficacité avec laquelle la lame d'eau qui ruisselle arrive à éroder. En modifiant la porosité, le taux de matière organique ou la structure, on transforme l'aptitude du sol à résister à l'érosion, c'est-à-dire que l'on modifie a et n.

En définitive une diminution de la turbidité moyenne annuelle peut être obtenue (FIG. 2) :

— directement, en réduisant la sensibilité du sol à l'érosion ;

— indirectement, par atténuation des pointes pluviométriques et par régularisation de l'écoulement du débit liquide.

Ce résultat peut être obtenu, soit par des traitements mécaniques localisés aux zones d'érosion intense, soit par traitements biologiques sur l'ensemble du bassin versant.

Efficacité du traitement des bassins versants

Il existe très peu d'études portant sur la modification du taux d'érosion. Le tableau 12 rassemble quelques données permettant une appréciation de l'efficacité de différents traitements de petits bassins versants (TELLER, 1968).

TABLEAU 12

Influence de traitements sur l'érosion spécifique globale

Bassin versant	Pays		Erosion spécifique t/km²/an	
			avant traitement	après traitement
Harz	Allemagne	Déboisement	18,6	58,6
Oued Fodda	Algérie	Banquettes sur 20 % de la superficie	4 600	4 600
Parker Branch	U.S.A.	Aménagements agricoles	695	246
Sperbelgraben		Forêt	—	65
Rappengraben	Suisse	Pâturage	—	208
Pine Tree Branch	U.S.A.	Reboisement	5 443	246

On a vu que la modification de la couverture végétale a une influence extrêmement nette sur l'érosion des versants par ruissellement de surface, mais celle-ci ne participe que pour une faible part à l'érosion globale. Le tableau 12 montre que l'influence indirecte du traitement biologique sur l'érosion globale est beaucoup plus importante que ce que l'on aurait pu déduire des mesures sur parcelles.

Les observations faites sur de petits bassins versants peuvent-elles être extrapolées à des bassins de grande taille ? Dans ce cas il ne peut être question d'expérimentation directe. L'étude de corrélations apporte une réponse indirecte affirmative. L'amplitude d'une crue décroît à mesure que la taille du bassin versant augmente, essentiellement parce que les crues des différents affluents ne sont pas synchrones. Généralement ce laminage suit une loi statistique du type.

$$Ql = A.S^n$$

avec A : débit de crue du bassin versant de surface unitaire,

Ql : débit de crue du bassin de surface S,

n : $^1/_3$ dans la région méditerranéenne (SOKOLOVSKY, 1967).

Il est évident que toute modification du régime hydrologique A se répercute sur le débit Ql. En ce qui concerne directement le transport solide, différents auteurs, en particulier LANGBEIN (1958), ont montré que celui-ci était sous la dépendance de la densité du couvert végétal.

S'il paraît désirable, par exemple pour diminuer la vitesse d'envasement d'un barrage, de réduire le taux d'érosion global, il convient de localiser les zones d'intervention et d'établir un calendrier des opérations en fonction des urgences.

Les zones prioritaires sont situées dans les régions à forte pluviométrie, sur les terrains à pente forte, dans les zones de roche tendre et à végétation déficiente. Le plus souvent il faudra choisir entre :

— un traitement mécanique par stabilisation des ravins, fixation des glissements de terrain, protection de berges. Ces travaux sont extrêmement coûteux, de construction et d'entretien. La dépense n'est pas justifiée par la valeur vénale du terrain, sauf s'il s'agit d'une voie de communication ;

— un traitement biologique par un aménagement rationnel du terrain, abandon de la surexploitation et déplacement de la population en surnombre. Le traitement mécanique vise simplement à contrecarrer les effets de l'érosion. Le traitement biologique, plus subtil, agit en modifiant les causes qui ont déclenché l'accélération de l'érosion ; l'existence de multiples coefficients multiplicateurs entraîne une série de réactions en chaîne.

Conclusion

Dans de nombreux pays les pluies tombent essentiellement en été, sous forme d'orages locaux à forte intensité. Dès que l'on sort de la zone arrosée, les eaux de ruissellement s'infiltrent dans la terre sèche. L'érosion spécifique est maximum à la parcelle et décroît progressiment, du fait des atterrissements intermédiaires, à mesure que la taille du bassin versant augmente.

Au Maroc les pluies sont essentiellement le fait de perturbations hivernales, de type frontal à faible intensité. Le phénomène d'in-

filtration progressive ne se produit pas, le débit liquide spécifique reste constant, lorsque la taille du bassin versant augmente. Il en résulte non seulement que la force vive des eaux est toujours suffisante pour transporter les alluvions en transit, mais que bien souvent la rivière dispose d'un supplément d'énergie disponible pour approfondir son lit ou élargir sa vallée. Dans ces conditions l'érosion spécifique augmente à mesure que la taille du bassin versant augmente. Cette particularité climatique nous a conduit à rejeter un grand nombre de techniques de conservation des sols appliquées avec succès sous d'autres climats.

C'est un exemple de la nécessité, qui subsiste dans nombre de cas, de comprendre les impératifs locaux avant de procéder à un transfert brutal de techniques élaborées dans d'autres pays.

Manuscrit déposé le 7 Mars 1969

ملخص

اعتمادا على نتائج صبيب جامد قدر على خمسة عشر سفوح أحواض المغرب — بين الباحث بصفة متوالية وجود علاقات بين الصبيب الجامد والسائل القليل من الماء — وبين ذلك السائل القليل من الماء والكمية الضئيلة المنصبة — ان خارطة معدل سقوط الامطار سنويا تمكن حينئذ حسب الارقام تقدير الجرف فى أهم النواحى المغربية .

وان اعتبارات متشابهة انجزت على سفوح صغار الاحواض قد دفعت بالباحث على ان يثبت أهمية السائل تحت الارض بالنسبة للسائل على سطح الارض — وذلك حسب الموقع الطبوجرافى وبعض العمليات الزراعية .

وأخيرا ان بعض الاجراءات الدقيقة قد مكنتنا من تحديد فى الزمان والمكان قوة الجرف — وان هذا التقدير قد دفعنا باختيار موقع التدخل وطرق محاربة جرف المياه .

RÉSUMÉ

Se fondant sur les résultats de débits solides mesurés sur quinze bassins versants du Maroc, l'auteur met successivement en évidence l'existence de corrélations entre le débit solide et la lame d'eau ruisse-

lée, puis entre la lame d'eau ruisselée et la lame d'eau précipitée. La carte des précipitations moyennes annuelles permet alors une estimation chiffrée de l'érosion dans les principales régions du Maroc.

Des considérations analogues faites sur petits bassins versants le conduisent à préciser l'importance du ruissellement hypodermique par rapport au ruissellement de surface en fonction de la position topographique et de quelques interventions agricoles.

Enfin des mesures précises ont permis de localiser dans le temps et dans l'espace, l'intensité de l'érosion. Cette dernière estimation conduit alors au choix du lieu d'intervention et des méthodes de lutte antiérosive.

Resumen

Fundándose en los resultados de caudales sólidos medidos sobre quince cuencas vertientes de Marruecos, el autor pone sucesivamente en evidencia la existencia de correlación entre el caudal sólido y la cascade de agua fluente, después entre la cascada de agua fluente y la cascada de agua precipitada.

El mapa de las precipitaciones medias anuales permite tener une estimación en cifras de la erosión, en las principales regiones de Marruecos.

Algunas considecaiones análogas hechas sobre pequeñas cuencas vertientes, le conducen a precisar la importancia de la fluencia hypodérmica con relación a la fluencia de superficie en función de la posición topográfica y de algunas intervenciones agriícolas.

Por fin, algunas medidas precisas han permitido localizar en el tiempo y en el espacio, la intensidad de la erosión. Esta última estimación conduce entonces a la elecctón del lugar de intervención y de los métodos de lucha antierosiva.

Summary

Based on the siltation measurements data obtained from fifteen watersheds in Morocco, the author descovers the existance of a series of correlations between siltation and the sheet of water runoff, then between the sheet of water run off and the sheet of water produced by precipitation.

He concluded that an estimate of erosion in the principal regions of Morocco can be worked out from an average annual precipitation map. Analogous considerations made for small watersheds allow us to state exactly the importance of hypodermic runoff with regard to surface runoff, and to take into account the topographic situation and the agricultural interventions.

Finally these precise measurements have allowed us to locate in time and space the intensity of soil erosion, such appraisal will help to select the zone of intervention and the methods adequate to fight erosion.

BIBLIOGRAPHIE

FOURNIER, F. — 1955. Etudes sur l'érosion et la conservation des sols. — Bulletin Scientifique N° **6**, pp. 38-88, Centre technique d'Agronomie tropicale, Nogent-sur-Marne.

GAUSSEN, H., J. DEBRACH et F. JOLY — 1958. Précipitations annuelles — Cartes et notice, Atlas du Maroc II, 4a, Institut scientifique chérifien, Rabat.

HARROLD, L.L. et F.R. DREIBELBIS — 1958. Evaluation of agricultural hydrology by monolith lysimeters. — U.S.D.A., Tech. Bull., **1179**, Washington.

KALMAN, R. — 1972. Ruissellement et érosion en nappe (expérimentation ou simulation de pluie). — Annales de la Recherche Forestière au Maroc, Tome **12**, Rabat.

KILPATRICK, F.A. — 1965. Surface water techniques: Use of flumes in measuring discharge at gaging stations. — U.S. Geological Survey, **1-16**, pp. 1-27.

LANGBEIN, W.B. — 1958. Yield of sediment in relation to mean annual precipitation. — Trans A.G.U., **39-6**, pp. 1076-1084.

LAWS, J.O. et D.A. PARSONS — 1943. The relations of drop size to intensity. — Trans. A.G.U. **24**, pp. 452-460.

SOKOLOVSKY — 1967. Actes du colloque sur les crues A.I.H.S. U.N.E.S.C.O. Leningrad.

TELLER, H.L. — 1968. Influence de la forêt sur les crues et inondations — Unasylva, **22** - 1,88, pp. 18-20. F.A.O. Rome.

UNE CAUSE DE LA SATURATION MAGNESIENNE DES ARGILES DANS LE SOL : L'HYDROMORPHIE TEMPORAIRE DE SAISON CHAUDE

B. LEPOUTRE * et A. SAUVAGEOT **

SOMMAIRE

I. Introduction
II. Sol
III. Recherches effectuées
A. Hypothèses
B. Etude des complexes adsorbants
a. Exposé des résultats
b. Essai d'interprétation
C. Vérification des hypothèses
a. Relation entre le pH du sol et la valeur du rapport Ca/Mg
b. Relation entre le pH du sol et la désaturation calcique
c. Vérification globale au laboratoire
D. Conséquences agro-pédologiques
a. Sur le plan agronomique
b. Sur le plan pédologique
IV. Conclusion

* Directeur de recherches O.R.S.T.O.M., Chef de la Section d'Ecologie - Pédologie à la Station de recherches forestières de Rabat.

** Licenciée ès-Sciences, Chef du laboratoire de Chimie à la Station de Recherches Forestières, Rabat.

Al Awamia, **36**, pp. 65-88, juillet, 1970.

I. Introduction

On ne s'étonnera pas de ce que l'objet initial des travaux de recherche qui ont conduit à l'élaboratoin de cette note ne concernait pas directement le sujet qui va être traité. En effet, la recherche forestière aborde tout naturellement les problèmes sous l'angle forestier les autres aspects de la recherche ne s'inscrivant qu'ensuite à l'intérieur de ce cadre.

C'est ainsi que l'étude des causes d'échec et de succès d'une plantation des peupliers noirs et blancs, faite à N'Krazza sur limons quaternaires de la plaine du Tadla, fut soumise à la section de pédologie et d'écologie de la Station de Recherches ; au cours de cette étude, les caractères particuliers de certains profils de sols nous ont amenés à étendre les recherches dans le domaine pédologique et à mettre en évidence des phénomènes dont une explication a été tentée. C'est celle-ci qui fera l'objet de ce mémoire.

Les problèmes forestiers et pédologiques sont parfaitement illustrés sur le cliché ci-joint. On y aperçoit la plantation sur un terrain rectangulaire, presque plat, situé derrière les bâtiments de la ferme ; on notera que le quart de la surface situé à droite au premier plan, est planté avec *Populus alba* tandis que les trois autres quarts le sont avec *Populus nigra*. C'est surtout dans cette dernière partie qu'une très nette hétérogénéité de la plantation se manifeste, pouvant aller de la réussite totale à l'échec complet.

Les questions que l'on peut se poser sont les suivantes :

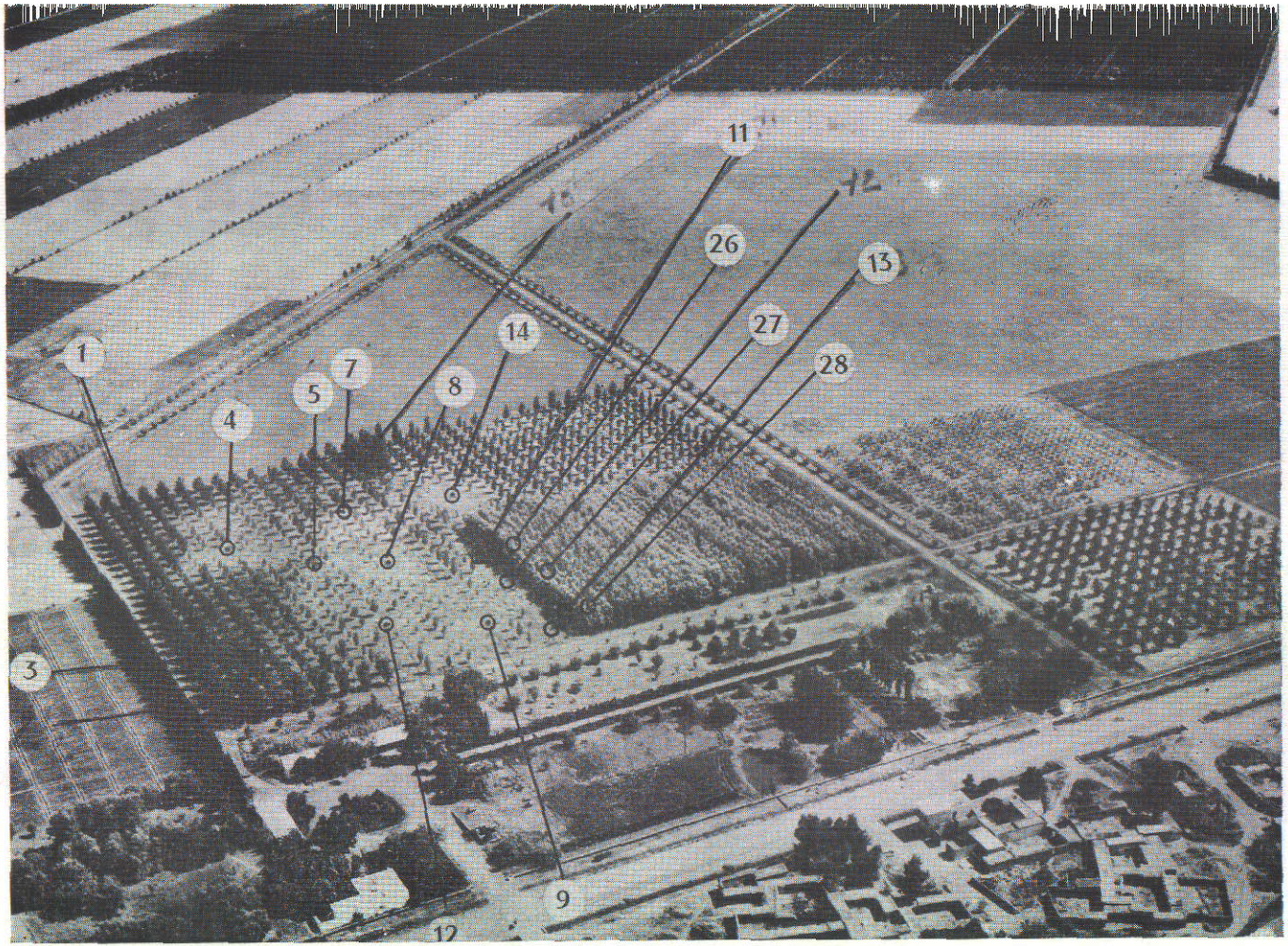
1. Quelles sont les causes de l'hétérogénéité de la plantation ?

2. Pour quelles raisons le peuplier blanc réussit-il si bien ? Est-ce une adaptation spécifique ou le sol est-il de nature différente ?

II. Sol

L'ensemble de la parcelle plantée est situé sur un ancien emplacement de zone inondée de la plaine du Tadla *, aujourd'hui assainie par des réseaux de drains. Partout alentour, les sols, formés sur limons quaternaires ou sur calcaires lacustres, sont cultivés dans le cadre d'un aménagement général et irrigués en été grâce aux réserves d'eau du barrage de Bin el Ouidane, lui-même situé dans le massif du Moyen Atlas voisin. Le cliché donne un aperçu de cette mise en valeur avec, au dernier plan, des plantations d'agrumes.

* Près d'Afourer (Beni-Moussa).



Vue aérienne des parcelles étudiées

Les sols paraissent identiques sur les 28 profils examinés. Il s'agit de sols hydromorphes à très faible tendance vertique en surface sur 40 ou 50 cm de profondeur (7,5 Y R 5/2) et à horizon grumulosique sur les deux premiers centimètres (7,5 Y R 5/1).

En dessous d'une profondeur de 50 cm on trouve un horizon humide sans structure caractérisée, brun rougeâtre à orange sombre (5 Y R 6/4) qui s'éclaircit au niveau de la nappe phréatique. On y trouve quelques petites concrétions calcaires ferrugineuses (5 Y R 4/1) dans lesquelles il semble que le fer ait précipité plus facilement à un premier stade, donnant un noyau sombre et le calcaire plus fortement ou plus isolément à un deuxième stade, donnant sur la coupe d'une concrétion une auréole plus calcaire. Il s'agit toujours de petites concrétions plus ou moins arrondies, dont la taille dépasse rarement 5 à 6 mm de diamètre. On les trouve surtout à partir de 50 cm de profondeur et davantage à 80, mais on peut en isoler de plus petites et de plus rares entre 30 et 50 cm.

Le chroma de /1 (code Munsell), la présence des concrétions ferrugineuses calcaires, et, à un moindre degré, la structuration grossière des horizons organiques sont les indices qui autorisent à classer ces sols dans la classe des sols hydromorphes. Nous verrons plus loin qu'un autre caractère pourrait être pris en considération pour motiver ce choix.

Les données analytiques figurent dans le tableau I.

Le profil se résume finalement à la description suivante :

Description du profil

0 - 2 cm : Grumosolique gris brunâtre (7,5 Y R 5/1) argileux, humifère gris brunâtre (7,5 Y R 5/1) à structure prismatique moyenne, les fentes de retrait s'atténuant progressivement jusquà 40 cm .

45 - 90 cm : Argileux humide (frange capillaire) paraissant massif de couleur nettement et brutalement plus claire et plus rougeâtre (5 Y R 6/4, à 5,5 Y R 6/4) avec début de concrétionnement ferrugineux calcaire à 50 cm., qui s'accentue vers 80 cm. Ces argiles mises à sécher se rétractent très fortement.

100 cm : Nappe phréatique temporaire estivale.

Il n'est pas sans intérêt de signaler aussi, que du fait de l'irrigation souvent abondante de la plaine en été, la nappe phréatique remonte à cette période de l'année jusqu'à 0,80 - 1,00 m de la surface du sol, alors qu'elle se situe vers 1,50 m en hiver.

En ce qui concerne la variation des facteurs édaphiques à l'intérieur de la plantation, on note simplement un très léger abaissement de la surface topographique vers la partie centrale de la parcelle (profil 9). Des emplacements comme ceux des profils 14 et 4 ne sont pas marqués sur le terrain par une dénivelée topographique visible.

Dans le sol, la nappe phréatique d'été semble se stabiliser partout à la même profondeur à 10 cm près, tout au moins à la date des observations. On notera cependant qu'avant l'assainissement les parties plus basses, emplacements des profils 9, 13 et 28 étaient submergées en hiver.

Enfin, les enracinements de trois peupliers noirs mal venants qui ont été examinés, montrent une localisation du système radiculaire dans les 50 cm de surface du sol avec de très rares racines descendant au-delà. Il semble à première vue que les systèmes radiculaires trouvent, à ce niveau un obstacle à une pénétration plus profonde bien que le sol soit humide.

III. Recherches effectuées

A. *Hypothèses*

Ces hypothèses de travail ont été examinées successivement afin d'orienter la recherche analytique ; on peut les formuler et les discuter de la façon suivante :

a. La mortalité des peupliers pourrait être causée par une remontée excessive de la nappe phréatique

Cette hypothèse ne semble pas pouvoir être retenue car il n'a pas été noté de variations de profondeur de cette nappe supérieure à 10 cm en été. D'autre part il existe un horizon humide dégagé de la nappe et qui reste inexploité par les racines quand les arbres sont mal venants, c'est-à-dire dans les zones d'échec. Par ailleurs, les renseignements oraux, recueillis auprès du gérant d'exploitation, confirment que d'autres cultures saisonnières sans enracinement profond, telles que les céralicultures, ont déjà subi l'échec sur ces mêmes emplacements. Enfin, il n'est pas concevable dans le cas où on voudrait retenir cette hypothèse, que les peupliers blancs, réputés plus sensibles à l'excès d'eau se soient mieux adaptés aux mêmes conditions de nappe comme le montre le cliché aux abords des profils

TABLEAU I

Résultats analytiques des profils de N'Krazza

N° d'enregistrement SRF	N° sondage	Profondeur	Cl Na %	CO_3Ca %	Matière organique %	Comp'exe adsorbant mev/100 g							Analyse granulométrique				pH
						Ca	Mg	Ca/Mg	K	Na	S	T	Argile	Limon	S fins	S gros	
6 431	1	0,25	0,292	33,4	1,81	7,7	9,3	0,83	0,24	0,26	17,5	17,0	46,8	26,6	19,0	2,8	
2		0,50	0,292	36,9	0,91	2,0	12,3	0,16	0,19	0,29	14,8	14,5	46,8	24,8	17,3	3,3	8,5
3		0,75	0,0	44,6	0,44	1,9	11,1	0,17	0,15	0,21	13,4	13,5	48.6	27,2	16,6	3,2	8,1
4		1,00	0,0	50,1	0,31	4,6	7,3	0,63	0,14	0,30	12,3	12,0	42,0	32,8	15,5	6,0	8,1
6 441	2	0,25	traces	28,7	2,70	20,3	5,5	3,69	0,34	0,30	25,1	25,0	47,0	25,5	17,8	2,5	
2		0,50	0,444	34,3	1,36	8,8	11,8	0,77	0,20	0,34	21,1	20,5	51,2	23,4	14,8	3,2	8,0
3		0,75	0,175	42,0	0,60	7,1	10,7	0,66	0,17	0,24	18,2	18,5	51,9	24,8	15,3	3,5	8,1
4		1,00	0,0	48,0	0,31	7,1	8,8	0,80	0,16	0,41	16,9	17,0	46,2	27,8	15,7	5,3	8,1
6 451	3	0,50	traces	32,6	1,96	3,7	14,0	0,26	0,20	0,43	18,3	18,4	49,6	25,1	16,2	2,9	
2		0,50	0,234	42,0	1,05	1,8	12,0	0,15	0,20	0,43	14,4	14,6	52,4	24,3	17,5	2,1	8,4
3		0,75	0,175	53,1	0,60	2,6	9,9	0,26	0,14	0,29	12,9	12,0	50,8	30,6	11,8	2,9	8,4
4		1,00	0,100	51,4	0,31	3,4	8,1	0,42	0,14	0,26	11,9	11,3	39,4	35,4	14,9	6,9	8,2
6 461	4	0,25	traces	30,8	2,67	7,7	8,0	0,90	0,56	0,43	16,7	16,0	44,5	26,9	19,9	2,9	
2		0,50	»	37,3	1,05	0,8	11,8	0,06	0,30	0,50	13,4	13,0	48,3	27,7	14,9	3,4	
3		0,75	»	45,0	0,45	1,2	14,0	0,08	0,33	0,21	15,7	16.0	47,0	31,2	14,7	3,9	8,65
4		1,00	»	51,0	0,31	2,6	8,9	0,28	0,26	0,18	11,9	12,0	40,0	35,6	14,1	7,1	
6 471	5	0,25	0,292	29,6	3,29	6,5	13,5	0,46	0,53	0,24	20,8	20,8	43,2	26,8	19,3	3,0	
2		0,50	0,175	37,7	1,05	2,1	14,4	0,14	0,34	0,35	17,2	17,6	51,8	23,3	15,1	2,9	8,5
3		0,75	traces	47,6	0,44	2,8	11,2	0,25	0,29	0,24	14,5	15,0	49,0	30,8	11,5	3,5	8,3
4		1,00	»	54,0	0,31	5,0	8,6	0,58	0,28	0,28	14,2	14,5	38,0	38,5	11,9	7,3	8,1
6 481	6	0,25	0,374	30,8	2,82	5,0	13,8	0,36	0,33	0,83	20,0	20,5	46,0	25,6	17,7	2,8	
2		0,50	0,100	38,2	0,89	0,3	15,1	0,02	0,21	0,82	16,4	16,8	52,4	23,6	15,7	3,0	8,75
3		0,75	traces	47,1	0,44	2,64	11,9	0,22	0,16	0,50	15,2	15,0	50,4	26,5	14,6	3,6	8,3
4		1,00	»	51,4	0,31	3,2	9,6	0,33	0,15	0,35	13,3	13,5	41,0	34,0	13,7	7,6	8,2

6 491	7	0,25	traces		1,91	4,0	13,6	0,29	0,66	0,26	18,5	18,4	45,0	26,4	18,3	3,5	
2		0,50	0,175		1,03	1,8	13,5	0,13	0,53	0,16	16,0	16,5	48,2	25,8	16,9	2,9	8,35
3		0,75	0,397		0,58	2,5	12,0	0,20	0,29		15,1	15,0	45,8	28,9	16,0	4,8	8,2
4		1,00	0,100		0,38	4,6	9,4	0,49	0,26	0,17	14,4	14,5	38,8	32,0	15,5	9,2	8,1
6 501	8	0,25	traces		2,58	7,6	6,7	1,13	1,51	0.23	16,0	16,5	41,8	29,8	18,3	3,4	
2		0,50			0,77	0,6	10,3	0,06	1,41	0,33	12,6	12,5	48,0	28,9	16,0	4,2	8,8
3		0,75			0,46	0,8	10,6	0,07	0,65	0,13	12,2	12,8	51,2	24,0	18,2	2,5	
4		1,00			0,31	3,9	8,3	0,47	0,33	0,26	12,8	12,5	40,0	35,0	15,1	7,4	8,2
6 511	9	0,25	0,351	31,7	2,24	3,3	14,0	0,23	0,66	0,56	18,5	18,0	47,4	24,0	19,2	2,6	
2		0,50		40,7	0,69	1,2	12,8	0,09	0,33	0,24	14,6	14,5	54,0	23,4	14,9	2,6	8,6
3		0,75		47,6	0,46	2,4	12,0	0,20	0.24	0,17	14,8	15,0	53,6	26,1	13.2	2,9	
4		1,00		50,6	0,31	4,5	9,4	0,47	0,21	0,20	14,3	14,0	41,8	30,8	15,6	8,2	8,3
6 521	10	0,25	0,187	26,6	2,89	12,0	8,4	1,42	0,42	0,41	21,2	21,0	44,4	24,8	21,5	3,0	
2		0,50	0,421	27,4	1,82	6,0	14,7	0,40	0,28	0,30	21,3	21,0	45,0	25,2	19,6	3,2	8,1
3		0,75	traces	36,0	0,91	5,9	9.7	0,60	0,25	0,19	16,0	16,5	44,0	25,5	19,9	4,6	8,2
4		1,00	4	45,0	0,60	7,2	6,4	1,16	0,24	0,19	14,0	14,4	39,2	30,8	17,3	7,9	8,15
6 531	11	0,25	0,292		2,44	4,1	11,1	0,36	1,02	0,22	16,4	16,6	41,6	28,0	19,0	3,7	
2		0,50	0,234		1,22	0,7	12,3	0,05	0,51	0,71	14,2	14,5	47,1	25,7	15,4	3,5	8,7
		0,75	0,234		0,53	1,0	12,1		0,28	0,39	13,8	14,0	46,4	28,0	16,4	4,7	
		1,00	0,234		0,45	2,6	9,9	0,26	0,25	0,30	13,1	13,0	39,2	38,6	16,6	9,1	
6 541	12	0,25	0,234		1,75	2,7	11,6	0,23	0,81	0,78		16,0	46,4	25.8	19,4	3,3	
2		0,50	0.234		0,76	0,4	10,6	0,03	0,39	0,56	12,0	12,5	49,0	26,0	16,3	3,3	8,6
3		0,75	0,292		0,38	1,2	9,8	0,12	0,25	0,44	11,7	12,0	44,2	31,5	15.8	5,0	
4		1,00	0,234		0,22	3,1	8,2	0,37	0,23	0,15	11,7	11,5	38,0	36,0	15,9	8,0	
6 551	13	0,25	0,585		2,05	5,4	10,7	0,50	0,77	0,43	17,3	17,5	40,2	28,6	19,7	3,3	
2		0,50	0,292		0,77	0,9	13,4	0,06	0,43	0,52	15,3	15,5	49,6	24,6	16,3	2,9	8,55
3		0,75	0,234		0,62	1,1	11,9	0,08	0,29	0,54	13,8	14,0	49,4	28,8	14,2	3,4	
4		1,00	0,175		0,46	4,7	10,2	0,46	0,24	0,31	15,5	16,0	43,0	31,2	16,8	6,3	8,35
6 561	14	0,25	0,100	27,8	2.32	6,7	10,9	0.61	0,68	0,28	18,6	19,0	42,4	26,6	19,2	3.7	
2			0,292	33,4	0,77	0,7	12,7	0,05	0,51	0.47	14,4	14,5	48.0	24,0	19,1	2,9	8,5
3			0,100	40,7	0,44	2,3	11,0	0,21	0,30	0,24	13,8	14,0	43,2	28,0	18,6	5,2	8,2
4		1,00	traces	46,7	0,31	4,1	7,7	0,53	0,23	0,17	12,2	12,0	33,4	33,6	19,0	10,5	8,05

26, 27 et 28 et précisément en limite de la zone d'échec du peuplier noir (emplacements 11, 12 et 13).

b. Si l'hypothèse précédente ne peut être retenue, il faut alors invoquer des facteurs propres à la chimie du sol et on peut penser à la salure d'autant plus que la culture de l'artichaut a pu être réussie, sur les mêmes emplacements.

— L'analyse des sels solubles faite sur quatorze profils n'a pu confirmer cette nouvelle hypothèse (voir TABLEAU I).

En effet, non seulement les taux de chlorures sont faibles, mais encore, ils sont plus élevés dans les 50 premiers cm, c'est-à-dire dans les zones d'enracinement, et, il n'est d'ailleurs pas possible de les relier statistiquement à l'échec ou à la réussite du peuplier noir. Inversement, ils sont toujours plus faibles là où les racines accèdent plus difficilement.

c. L'hypothèse d'une compacité due à une teneur en argile supérieure en profondeur dans les zones d'échec doit être rejetée également au vu de l'homogénéité texturale révélée par l'analyse (voir TABLEAU I).

d. La réaction du sol paraît par contre particulièrement basique puisque les pH mesurés sur *pâte saturée* s'échelonnent presque tous entre 7,7 et 8,8. Cette réaction mesurée au laboratoire passe très souvent par un maximum dans les prélèvements faits au voisinage de 50 cm de profondeur, et les valeurs les plus fortes se situent dans les sols où le peuplier noir subit l'échec.

Compte tenu de cette dernière constatation, il est normal de supposer un milieu édaphique très défavorable à la nutrition minérale et susceptible de provoquer des chloroses.

Cette conclusion paraît d'autant plus plausible que ces chloroses se sont effectivement manifestées pour d'autres essences arbustives dont les agrumes, qu'elles ont lieu en été, et qu'enfin, on a pu y remédier (pour cette dernière culture en particulier) à l'aide de pulvérisations de sulfate de zinc mais surtout de chelates de fer.

Sur le plan agronomique, cette très forte basicité des sols qui s'accentue dans les zones d'échec fournit un argument solide pour expliquer l'hétérogénéité et l'échec de la plantation sans qu'il soit sans doute nécessaire de pousser davantage les recherches. Il est cependant curieux de constater une différence aussi importante dans le comportement des essences. Dans ces conditions l'absence d'une corrélation

nette ne nous a pas satisfait du point de vue de la recherche proprement dite. D'autres résultats devaient éclaircir davantage le problème.

B. *Etude des complexes adsorbants*

a. Exposé des résultats

Orientée dans l'espoir de trouver des caractères propres au type d'argile, cette étude devait aboutir rapidement à constater une saturation anormalement élevée en magnésium et relativement basse en calcium dans les horizons humides. Le dépouillement des analyses du tableau I est traduit graphiquement pour chaque profil dans la figure 1.

Deux observations sont frappantes dans cette figure :

a. La forme très régulière et très particulière, pour chaque profil, des courbes du rapport Ca^{++}/Mg^{++} en fonction de la profondeur.

On constate en effet des valeurs élevées sinon fortes de ce rapport dans les horizons de surface, puis une décroissance régulière du même rapport vers la profondeur, avec un minimum qui s'accuse presque systématiquement à 50 cm, précisément dans les horizons suspects quant au développement du système radiculaire des arbres. Plus en profondeur, le rapport Ca^{++}/Mg^{++} tend à reprendre des valeurs un peu plus élevées, jusqu'au niveau de la nappe phréatique estivale.

La valeur minimale de Ca^{++}/Mg^{++} est exceptionnellement basse pour certains profils.

b. Si on regroupe les différentes courbes par classes de croissance des arbres comme il a été fait sur la même figure, on constate curieusement que toutes les stations de bonne venue du peuplier noir sont représentées par les courbes dont les valeurs de Ca/Mg sont les plus élevées dans tous les horizons des profils. A l'inverse, les zones d'échec se signalent par les valeurs les plus faibles du même rapport.

Sans vouloir prétendre qu'il y a là une relation directe de cause à effet entre le type de saturation des argiles et la plus ou moins bonne réussite des peupliers, il convient de constater le parallélisme remarquable entre les résultats analytiques et le comportement de l'essence.

Il convient, aussi, de penser que les mêmes facteurs écologiques qui font disparaître les arbres sont ceux qui ont créé cette remarquable disparité dans les variations du rapport Ca^{++}/Mg^{++}. Il nous faut donc rechercher à présent des facteurs dont l'action peut aboutir à une telle modification du type de saturation des argiles.

b. Essai d'interprétation

1. Exposé du problème

Si on se fonde sur la répartition des valeurs basses du rapport d'adsorption Ca^{++}/Mg^{++} dans les profils, les facteurs qui en sont la cause (ou qui en ont été la cause) doivent avoir un effet maximum là où ces valeurs sont les plus basses ; c'est donc dans l'horizon 50 - 60 cm puisque pour chaque profil, c'est à ce niveau que la saturation magnésienne est la plus forte. Or, nous venons précisément de voir que ce niveau correspondait au sommet de la frange capillaire. Il est donc probable que les facteurs que nous recherchons se situent au niveau où l'évaporation de la nappe phréatique se fait en été ; il faut d'ailleurs noter que ceci est aussi probable dans les profils où l'échec se manifeste (en traits pleins sur la figure 1) que dans les autres où les phénomènes perdent de leur intensité.

Que peut-il se passer à ce niveau, qui contribue ainsi à faire baisser le rapport Ca^{++}/Mg^{++} des qualités de calcium et de magnésium fixées sur le complexe adsorbant ?

2. Recherche d'un équilibre sol-eau

Il est normal de concevoir d'abord un équilibre entre la composition cationique des eaux de la nappe et celle de l'argile. Si on étudie cet équilibre, on s'aperçoit que celui-ci tend à s'établir dans les horizons profonds qui sont au contact de la nappe proprement dite suivant une relation de la forme

$$\left(\frac{Ca^{++}}{Mg^{++}}\right)_{sol} = 0{,}208 \left(\frac{Ca^{++}}{Mg^{++}}\right)_{eau}^{2{,}06}$$

pour la majorité des mesures (11 horizons profonds suivent cette loi sur 14 analysés). Les eaux de la nappe sont en effet très magnésiennes avec un rapport de Mg^{++} à Ca^{++} soluble de l'ordre de 4.

Un tel équilibre n'apparaît par contre d'aucune manière dans les horizons situés à 75 cm ou à 50 cm de profondeur. On peut donc affirmer que la saturation magnésienne du complexe dans ces horizons est provoquée par des phénomènes d'échange avec une solution du

FIG. 1. — **Variations du rapport Ca/Mg dans le sol en fonction de l'intensité de l'hydromorphie et de la réussite de *Populus Alba* et *Populus Nigri***

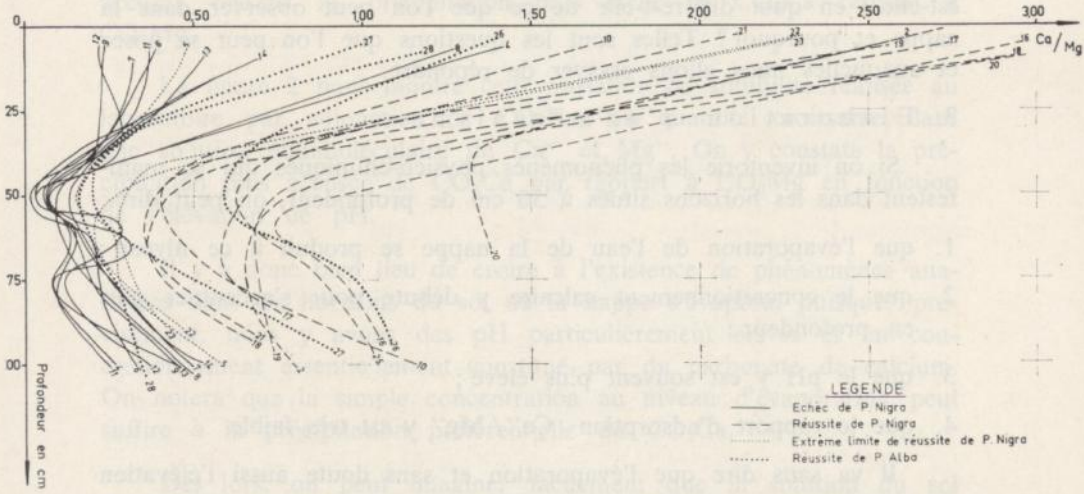
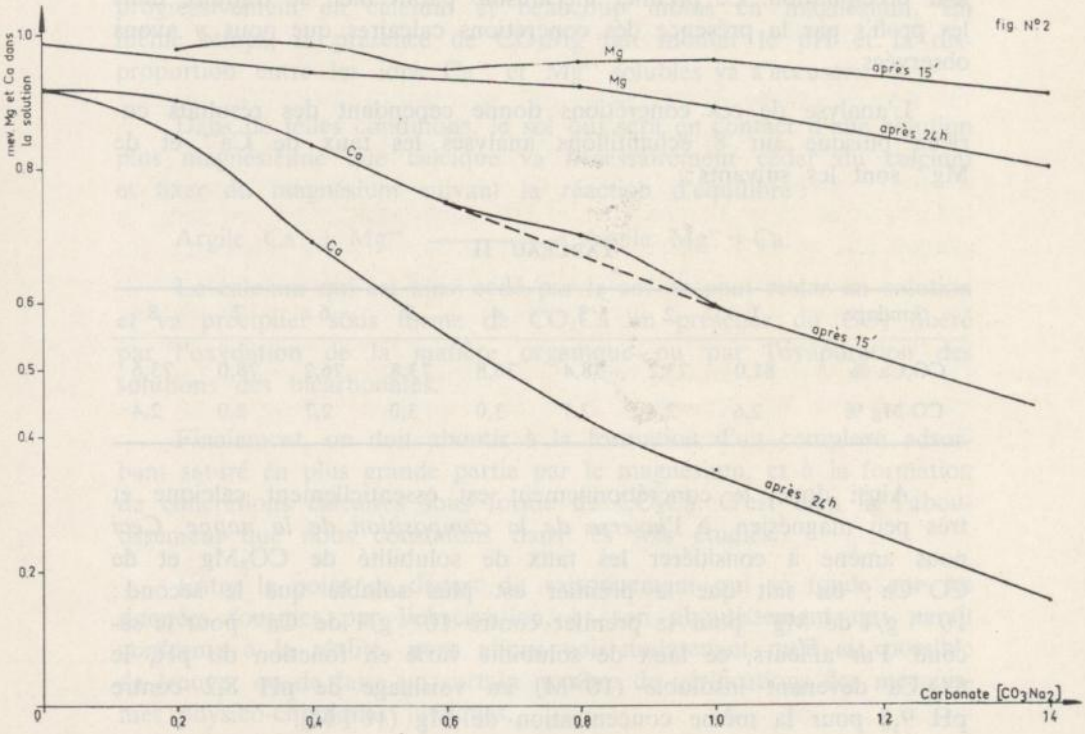


FIG. 2. — **Précipitation de CO_3Mg et CO_3Ca en milieu alcalin CO_3Na_2 ajouté à une solution équimoléculaire de Ca/Mg**



sol dont la composition doit être nécessairement différente. Quelle est-elle ? en quoi diffère-t-elle de ce que l'on peut observer dans la nappe et pourquoi ? Telles sont les questions que l'on peut se poser et auxquelles nous allons essayer de répondre.

3. Elaboration d'un mécanisme

Si on inventorie les phénomènes physico-chimiques qui se manifestent dans les horizons situés à 50 cm de profondeur, on peut dire :

1. que l'évaporation de l'eau de la nappe se produit à ce niveau ;
2. que le concrétionnement calcaire y débute pour s'accentuer plus en profondeur ;
3. que le pH y est souvent plus élevé ;
4. que le rapport d'adsorption Ca^{++}/Mg^{++} y est très faible.

Il va sans dire que l'évaporation et sans doute aussi l'élévation de température — surtout l'été — libèrent une certaine quantité de CO_2, provoquant en premier lieu la formation de carbonate, puis leur précipitation. Ce premier mécanisme paraît bien se traduire dans les profils par la présence des concrétions calcaires que nous y avons observées.

L'analyse de ces concrétions donne cependant des résultats curieux puisque sur 8 échantillons analysés les taux de Ca^{++} et de Mg^{++} sont les suivants :

TABLEAU II

Sondage	1	2	3	4	5	6	7	8
CO_3Ca %	81,0	73,2	78,4	76,8	73,8	76,2	78,0	73,6
CO Mg %	2,6	2,4	2,7	3,0	3,0	2,7	2,0	2,4

Ainsi donc, le concrétionnement est essentiellement calcique et très peu magnésien, à l'*inverse de la composition de la nappe. Ceci* nous amène à considérer les taux de solubilité de CO_3Mg et de $CO^{++}Ca$; on sait que le premier est plus soluble que le second : 10^{-18} g/l de Mg^{++} pour le premier contre 10^{-4} g/l de Ca^{++} pour le second. Par ailleurs, ce taux de solubilité varie en fonction du pH, le CO_3Ca devenant insoluble (10^{-2}M) au voisinage de pH 8,2 contre pH 9,5 pour la même concentration de Mg (10^{-2} M).

L'alcalinité du milieu, surtout si on atteint pH 8,2 doit donc accuser encore la précipitation plus facile de CO_3Ca rapport à CO_3Mg.

La figure 2 nous montre cette variation de solubilité réalisée au laboratoire par adjonction de CO_3Na_2 en quantité croissante dans une solution équimoléculaire de Ca^{++} et Mg^{++}. On y constate la précipitation plus accusée de CO_3Ca par rapport à CO_3Mg en fonction de l'élévation de pH.

Il y a donc bien lieu de croire à l'existence de phénomènes analogues dans les horizons du sol où la nappe s'évapore, puisque, précisément, nous y avons des pH particulièrement élevés et un concrétionnement essentiellement constitué par du carbonate de calcium. On notera que la simple concentration au niveau d'évaporation peut suffire à la précipitation préférentielle du CO_3Ca.

Dès lors, on peut imaginer facilement que la solution du sol dans les niveaux d'évaporation est particulièrement déséquilibrée en ce qui concerne le rapport Ca^{++}/ Mg^{++} soluble puisqu'elle se décharge progressivement en calcium et beaucoup moins en magnésium. En même temps, la présence de CO_3Mg fait monter le pH et la disproportion entre les ions Ca^{++} et Mg^{++} solubles va s'accuser.

Dans de telles conditions, le sol qui sera en contact d'une solution plus magnésienne que calcique va nécessairement céder du calcium et fixer du magnésium suivant la réaction d'équilibre :

$$\text{Argile } Ca^{++} + Mg^{++} \longrightarrow \text{Argile } Mg^{++} + Ca.$$

Le calcium qui est ainsi cédé par le sol ne peut rester en solution et va précipiter sous forme de CO_3Ca en présence du CO_2 libéré par l'oxydation de la matière organique ou par l'évaporation des solutions des bicarbonates.

Finalement, on doit aboutir à la formation d'un complexe adsorbant saturé en plus grande partie par le magnésium, et à la formation de concrétions calcaires sous forme de CO_3Ca. C'est bien là l'aboutissement que nous constatons dans les sols étudiés.

Entre le point de départ du raisonnement qui se fonde sur les données fournies par l'observation, et son aboutissement qui paraît conforme à la réalité, nous allons voir maintenant qu'il est possible de trouver ou de faire un certain nombre de vérifications des mécanismes physico-chimiques invoqués.

C. *Vérification des hypothèses faites sur le mécanisme de saturation magnésienne du complexe adsorbant*

a. Relation entre le pH du sol et la valeur du rapport d'adsorption Ca^{++}/Mg^{++} du complexe absorbant

Cette relation est traduite par la figure 3. On peut y constater une diminution de la valeur du rapport Ca^{++}/Mg^{++} lorsque le pH s'élève ce qui correspond bien à la théorie qui fait intervenir la variation parallèle de la solubilité de CO_3Ca et CO_3Mg.

b. Relation entre le pH du sol et la désaturation calcique du complexe adsorbant

Dans la figure 4 on peut constater la relation entre le pH et la teneur en calcium échangeable ; cette dernière diminue lorsque le pH augmente. Ce résultat montre que la diminution du rapport Ca^{++}/Mg^{++} qui vient d'être étudiée est sûrement due, en partie, à la décalcification du complexe adsorbant. Ce dernier point confirme le mécanisme de désaturation calcique qui aboutit au concrétionnement calcaire (CO_3Ca).

c. Vérification globale au laboratoire

1. désaturation calcique en présence de CO_3Na_2

5 g de sol ont été agités avec 25 cc d'une solution contenant 0,5 meq. de Mg^{++} sous forme de sulfate et des quantités variables de CO_3 (CO_3Na_2) de 0 à 1 meq. On a fait deux agitations successives à chaque fois et on a analysé ensuite l'état du complexe adsorbant. La figure 5 donne les résultats de cette expérience. Sans qu'il soit besoin de faire varier le taux de magnésium de la solution, mais simplement en faisant varier le pH on s'aperçoit que les taux de Mg^{++} et de Ca^{++} fixés varient dans le sens où le calcium précipite tandis que le magnésium se fixe lentement. C'est exactement ce qui paraît se produire dans le sol dans les conditions naturelles.

2. Evolution de l'eau de la nappe soumise à l'évaporation

50 cc d'eau de la nappe phréatique prélevés en décembre et analysés préalablement ont été soumis à une évaporation lente. Le volume s'est ainsi réduit pour passer successivement à 38,30 et 18 cc. A chacun de ces stades des analyses dont les résultats sont réunis dans le tableau ci-après ont été faites.

FIG. 3. — **Relation entre le rapport Ca^{++}/Mg^{++} des teneurs en Ca et Mg échangeables du complexe adsorbant et le pH du sol**

(Mesures faites à saturation)

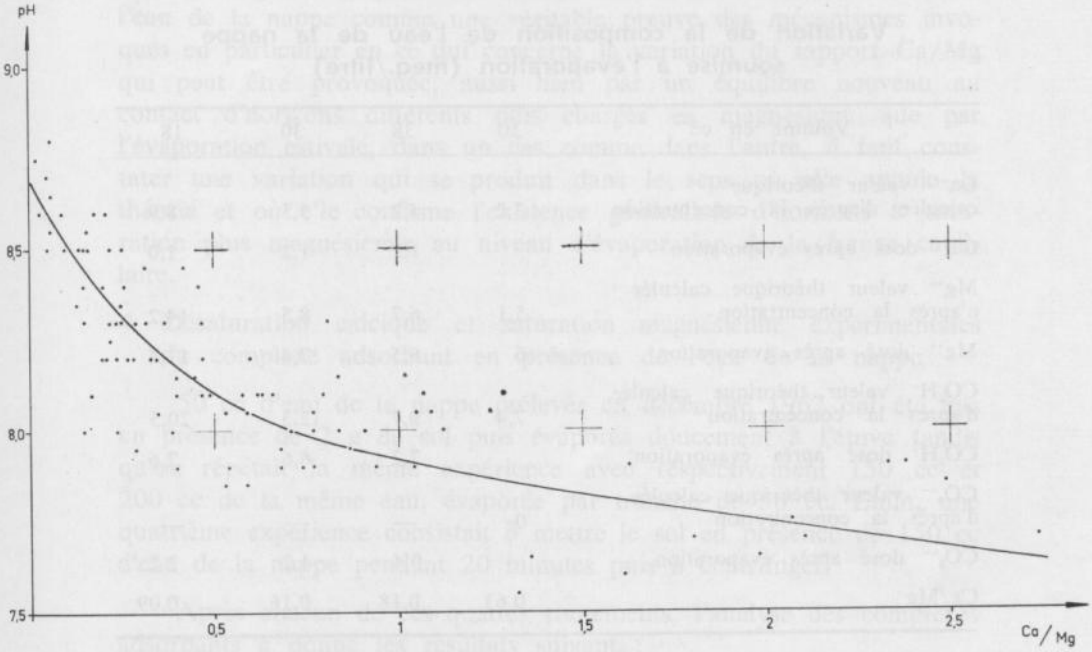


FIG. 4. — **Relation entre le Ca échangeable et le pH du sol**

(Mesures faites à saturation)

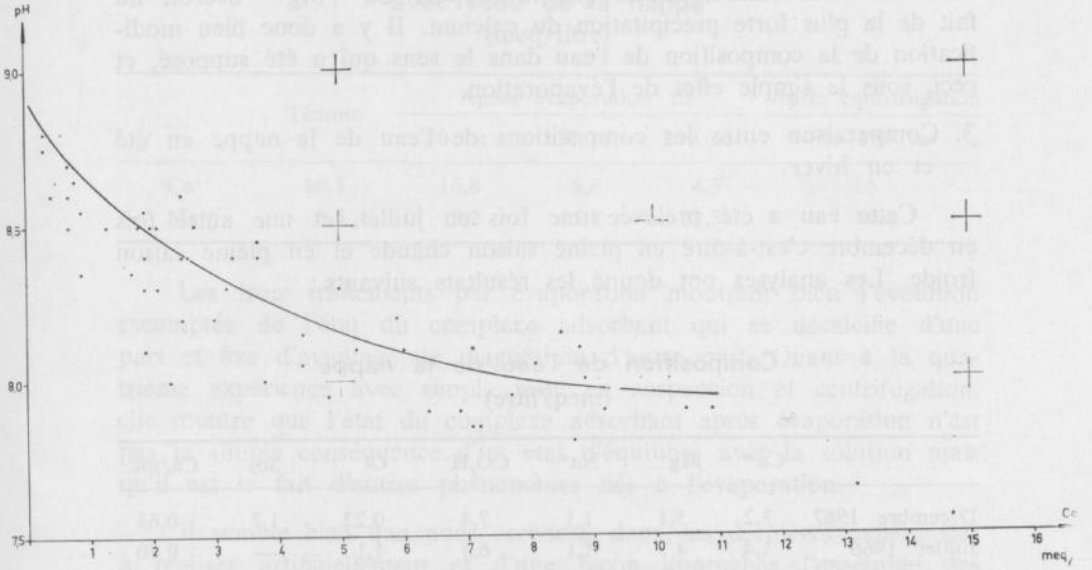


TABLEAU III

Variation de la composition de l'eau de la nappe soumise à l'évaporation (meq./litre)

Volume en cc	50	38	30	18
Ca^{++} valeur théorique calculée d'après la concentration	3,2	4,2	5,3	8,9
Ca^{++} dosé après évaporation		1,2	1,2	1,0
Mg^{++} valeur théorique calculée d'après la concentration	5,1	6,7	8,5	14,2
Mg^{++} dosé après évaporation	6	6,5	7,4	11,4
CO_3H^- valeur théorique calculée d'après la concentration	7,4	9,7	12,3	20,5
CO_3H^- dosé après évaporation		7,2	6,6	7,6
CO_3^{--} valeur théorique calculée d'après la concentration	0	—	—	—
CO_3^{--} dosé après évaporation		0,4	1,2	2,2
Ca/Mg	0,63	0,18	0,16	0,09

On y constate l'apparition de carbonates et la diminution du taux des bicarbonates, tandis que le rapport Ca^{++}/Mg^{++} décroît du fait de la plus forte précipitation du calcium. Il y a donc bien modification de la composition de l'eau dans le sens qui a été supposé, et ceci, sous le simple effet de l'évaporation.

3. Comparaison entre les compositions de l'eau de la nappe en été et en hiver

Cette eau a été prélevée une fois en juillet, et une autre fois en décembre c'est-à-dire en pleine saison chaude et en pleine saison froide. Les analyses ont donné les résultats suivants :

Composition de l'eau de la nappe (meq/litre)

	Ca^{++}	Mg^{++}	Na^+	CO_3H^-	Cl^-	So_4	Ca/mc
Décembre 1967	3,2	5,1	1,1	7,4	0,22	1,7	0,63
Juillet 1966	1,4	4,7	1,1	6,3	1,1	—	0,30

Sans que l'on puisse considérer cette variation des teneurs de l'eau de la nappe comme une véritable preuve des mécanismes invoqués en particulier en ce qui concerne la variation du rapport Ca/Mg qui peut être provoquée, aussi bien par un équilibre nouveau au contact d'horizons différents plus chargés en magnésium, que par l'évaporation estivale, dans un cas comme dans l'autre, il faut constater une variation qui se produit dans le sens où elle appuie la théorie et où elle confirme l'existence généralisée d'horizons à saturation plus magnésienne au niveau d'évaporation de la frange capillaire.

4. Désaturation calcique et saturation magnésienne expérimentales du complexe adsorbant en présence de l'eau de la nappe

50 cc d'eau de la nappe prélevés en décembre 1967 ont été mis en présence de 2 g de sol puis évaporés doucement à l'étuve tandis qu'on répétait la même expérience avec respectivement 150 cc et 200 cc de la même eau, évaporée par tranche de 50 cc. Enfin, une quatrième expérience consistait à mettre le sol en présence de 150 cc d'eau de la nappe pendant 20 minutes puis à centrifuger.

Après chacun de ces quatres traitements, l'analyse des complexes adsorbants a donné les résultats suivants :

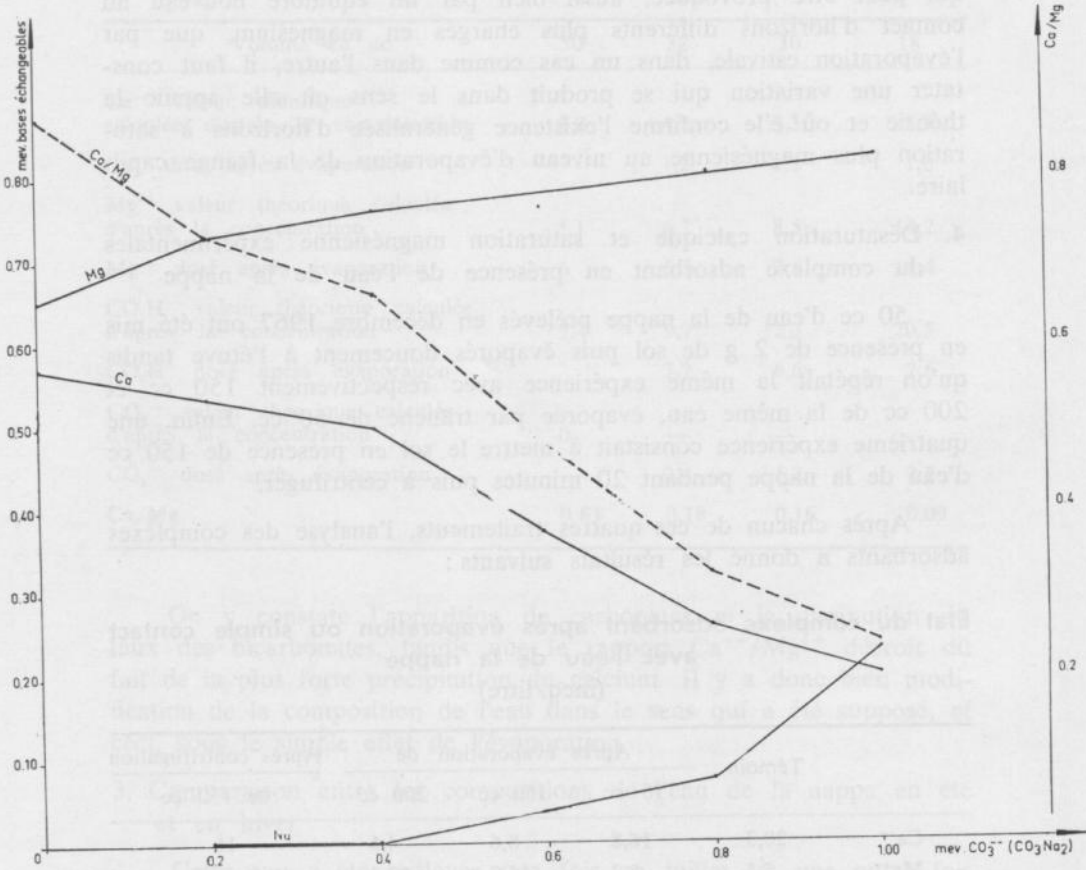
Etat du complexe adsorbant après évaporation ou simple contact avec l'eau de la nappe
(meq/litre)

	Témoin	Après évaporation de			Après contrifugation
		50 cc	150 cc	200 cc	de 150 cc
Ca^{++}	20,3	16,8	8,6	4,5	16
Mg^{++}	5,5	8,2	15,8	23,3	10,5

Les trois traitements par évaporation montrent bien l'évolution escomptée de l'état du complexe adsorbant qui se décalcifie d'une part et fixe d'avantage de magnésium d'autre part. Quant à la quatrième expérience avec simple mise en suspension et centrifugation, elle montre que l'état du complexe adsorbant après évaporation n'est pas la simple conséquence d'un état d'équilibre avec la solution mais qu'il est le fait d'autres phénomènes liés à l'évaporation.

Il semble bien que nous arrivions dans ces dernières expériences à réaliser artificiellement et d'une façon approchée l'ensemble des

FIG. 5. — **Désaturation calcique du complexe adsorbant en présence de CO_3Na_2**



mécanismes qui se produisent dans le sol au niveau d'évaporation de la frange capillaire.

D. *Conséquences agro-pédologiques*

a. Sur le plan agronomique

Les problèmes posés par l'adaptation du peuplier aux conditions de sol de N'Krassa peuvent trouver à présent deux réponses :

— il ne fait pas de doute que l'alcalinité du milieu est provoquée dans le sol par une influence de la nappe actuelle suivant des mécanismes d'autant plus efficaces qu'ils se produisent en été. Les taches de mortalité de peupliers noirs où ces phénomènes sont les plus intenses supportent sans doute la présence plus longue de la nappe avant et après la période d'irrigation comme en témoignent les caractères particulièrement nets des profils des valeurs du rapport d'adsorption Ca^{++}/Mg^{++} (figure 1).

— Au vu de la même figure, il est fortement probable que le peuplier blanc s'accomode mieux de ce milieu puisque sur les trois profils de sol étudiés dans ces peupliers (P-26, P-27, P-28), deux d'entre eux : P-27 et P-28 montrent des conditions de sol identiques à celles des plus mauvaises stations de peupliers noirs.

b. Sur le plan pédologique

1. Le mécanisme proprement dit

La régularité des résultats analytiques des 28 profils de la figure 1 montre bien qu'il existe au niveau de la nappe phréatique des sols de N'krazza des phénomènes particuliers propres à la présence d'une nappe phréatique et à sa surface d'évaporation.

Ces phénomènes semblent pouvoir se succéder suivant le mécanisme ci-après :

Evaporation de la nappe transformant les teneurs en carbonates et bicarbonates et provoquant la précipitation du CO_3Ca. La solution du sol s'enrichit en magnésium.

Un nouvel équilibre s'établit entre cette solution du sol modifiée et le complexe adsorbant pour aboutir à la création d'un complexe très magnésien en partie décalcifié.

Le calcium du complexe passe dans la solution précipitée sous forme de CO_3Ca en présence de CO_2 ou sous la seule influence de l'alcalinité du milieu.

Ces phénomènes sont accusés par des températures élevées, une alcalinité du milieu, la présence de CO_3Na_2 et une alimentation de la solution du sol en magnésium.

2. L'intensité du mécanisme

— D'un profil à l'autre, on constate dans la figure 1 une variation de l'intensité du mécanisme de saturation magnésienne. On voit

ainsi que les sols situés dans les zones légèrement plus basses ont subi cette action plus intensément et sur toute leur épaisseur depuis la surface, tandis que d'autres, situés à peine plus haut topographiquement, ont conservé des complexes adsorbants plus fortement calciques et peu magnésiens.

A l'intérieur d'un même profil qui subit l'action de la nappe, on constate également que les horizons de surface, toujours plus drainés, arrivent à échapper partiellement ou totalement à la décalcification du complexe.

Nous croyons donc pouvoir affirmer que les valeurs plus ou moins basses du rapport Ca^{++}/Mg^{++} du complexe adsorbant des sols traduisent l'intensité plus ou moins forte d'une hydromorphie temporaire, pourvu que la solution du sol présente une certaine richesse en Mg^{++} et que la température extérieure soit assez forte. En effet il s'agirait plutôt d'une hydromorphie de saison chaude puisqu'il est nécessaire que la nappe s'évapore.

Devraient donc présenter ce type de complexe magnésien tous les sols qui conservent une certaine humidité au moment où l'évaporation est intense. Il s'agirait donc d'abord des sols qui possèdent une nappe permanente ou semi permanente. On peut en trouver un bel exemple dans le profil n° 17 présenté près de Fes au cours de la tournée au Maroc du Congrès de pédologie méditerranéenne.

Il s'agit d'un sol dont la qualification d'hydromorphe était contestée malgré la présence d'une nappe phréatique presque permanente à faible profondeur. On relève les données analytiques suivantes qui concernent ce sol :

A propos de ce sol on peut citer les observations du pédologue (1) : « il (le sol) est gorgé d'eau, au moins en profondeur pendant une partie de l'année, à cause de la remontée de la nappe, à laquelle s'ajoute une stagnation temporaire de l'eau de pluie, il y a trente ans, avant l'approfondissement de l'oued Fes, cet engorgement devait être d'ailleurs quasi total et permanent. »

Il est remarquable de retrouver ici l'ensemble des données qui ont fait l'objet de nos observations dans les sols de N'krazza. On y retrouve les valeurs très basses du rapport d'adsorption Ca^{++}/Mg^{++} en même temps qu'une élévation du pH et l'augmentation du taux de calcaire dans les mêmes horizons où on a supposé un engorgement très récent ou constaté une nappe actuelle.

TABLEAU VIII

Profondeur	pH eau	Complexe meq./100 g				Observations
		Ca	Mg	Ca/Mg	Co_3Ca%	
0-10	7,8	22,0	11,4	1,90	33	
10-20	8,0	9,2	15,3	0,60	51,5	
20-30	8,5	5,2	13,6	0,38	60,6	
30-40	8,8	4,2	11,3	0,37	65,0	gley peu net
40-55	8,8	3,4	10,6	0,32	71,0	
55-70	8,8	2,0	7,4	0,37	72,0	
75-95	8,7	2,8	5,8	0,48	76,8	concrétion calco-fer-
95-105	8,6	3,6	2,0	1,80	76,0	riques et niveau de
120-130	8,4	5,0	3,6	1,39	69,0	frange capillaire en
170-280	7,7	14,4	6,8	2,12	43,3	juillet.
220-230	7,9	4,0	3,8	1,05	46,0	

Les mécanismes pourraient être également identiques mais avec un moindre degré d'intensité dans le cas des sols lourds à engorgement de surface qui restent humides tardivement dans la saison post-hivernale. Ce serait le cas en particulier des sols hydromorphes ou des vertisols à engorgement de surface. On conviendra que précisément ces types de sols présentent presque constamment des complexes adsorbants fortement magnésiens au Maroc mais aussi dans la zone intertropicale à saisons humides et sèches très marquées.

Une diminution moins importante du rapport Ca^{++}/Mg^{++} a pu aussi être observée dans d'autre types de sols hydromorphes ou dans des horizons à hydromorphie temporaire, en forêt de la Mamora et dans le Moyen Atlas dans des sols rouges plus ou moins engorgés (2). Dans ce dernier cas il semblerait bien que ce caractère du complexe puisse être en liaison avec certains cas de non régénération du cèdre, ce qui paraît logique compte-tenu de la sensibilité des résineux à l'excès d'eau.

IV. Conclusions

Il paraît donc justifié d'introduire le caractère de saturation magnésienne du complexe adsorbant dans les indices qui traduisent

l'hydromorphie des sols, du moins quand cette saturation est importante ou quand elle varie brusquement à l'intérieur du profil. Il semble cependant plus difficile, pour le moment, de chiffrer avec exactitude l'intensité de cette hydromorphie sans une étude parallèle précise des durées et des périodes d'engorgement du sol ; disons simplement que les valeurs du rapport d'adsorption Ca^{++}/Mg^{++} inférieures à 1 correspondent sans doute à une forte influence de l'engorgement du sol qui se manifeste plus vraisemblablement en période estivale sous le climat méditerranéen et en saison chaude sous climat tropical, le mécanisme de la calcification et de la saturation magnésienne étant d'autant plus facilité que l'alcalinité du milieu est plus marquée, que le CO_3Na_2 est présent et que la solution du sol est alimentée en magnésium.

Manuscrit déposé le 4 Avril 1969

ملخص

بفحص الاوراق تقترح دراسة طريقة التغذية المعدنية لشجرة الصنوبرة البحرية .

ولمدة سنة قد أخذ بصفة منتظمة ابر نباتية على أشجار ذات ثمانية سنين ينتمون الى صنف غير طبيعى Pinus Pinaster, Vatlantica

الموجود فى غابة المعمورة — وقد أخطيرت نماذج مكان كشاهد ومكان آخر خصب بأسمدة فسفاتية قبل أول كل اخذ للنماذج .

وقد درست نشأة تلك الابر وتغيرات محتوى من الازوط والفسفور والمغنانيز N, P, K, Ca, Mg, Mn كذلك تغيرات المحتوى المائى لتلك الابر النباتية .

أ — تبدأ الابر الصغيرة بالنمو فى أبريل ومايو وينتهى ذلك النمو فى أوائل الخريف (شتنبر وأكتوبر) وتبقى فوق الشجرة مدة ثلاثة أو أربع سنين .

ب — ان محتوى الازوط والبطاسيوم والكلسيوم ينقص مدة نشأة تلك الابر النباتية وبعد ذلك خلال أربعة سنين عندما يتقدم فى السن. وذلك النقص يكون أكثر فى الربيع خلال التبرعم (Abertura de les yemas)

وان محتوى الازوط والفسفور والبطاسيوم تمكنهـــا أن تنمو خلال فصـــل الشتـــاء .

وقد لوحظ كذلك عودة الازوط والفسفور والبطاسيوم الموجـــودة فى تلـــك الابـــر النباتيـــة — بصفة تكاد تكـــون شاملـــة — وذلك قبـــل سقـــوط هـــذه الابـــر .

RÉSUMÉ

Par le diagnostique foliaire, on se propose d'étudier le rythme de nutrition minérale du pin maritime.

Pendant un an, on a prélevé régulièrement des aiguilles sur des arbres âgés de huit ans faisant partie d'un peuplement artificiel de *Pinus Pinaster* v. *atlantica* situé en forêt de la Mamora. On a échantillonné un placeau témoin et un placeau fertilisé avec des engrais phosphatés avant le début des prélèvements.

On a étudié la naissance des aiguilles, les variations de teneur en N, P, K, Ca, Mg, Mn ainsi que les variations de teneur en eau des aiguilles.

a) Les jeunes aiguilles commencent à passer en avril-mai, leur croissance est terminée au début de l'automne (septembre, octobre). Elles restent sur l'arbre pendant trois ou quatre ans.

b) Des teneurs en N, P, K, diminuent pendant la naissance des aiguilles et ensuite pendant les quatre années de leur vieillissement. Les chutes de teneurs sont plus importantes au printemps pendant le débourrement (*abertura de las yemas*). Les teneurs en azote et phosphore peuvent augmenter légèrement en hiver.

On a aussi observé le retour vers l'arbre de la presque totalité de l'azote, du phosphore et du potassium contenus dans les aiguilles juste avant que celles-ci ne tombent.

c) Le calcium, le magnésium et aussi le manganèse s'accumulent dans les aiguilles au cours de leur vieillissement.

d) On n'a pas observé de différence significative dans les teneurs en éléments minéraux entre le placeau témoin et le placeau fertilisé.

e) On a pu mettre en évidence que les besoins en eau des arbres sont particulièrement importants au printemps, pendant le dé-

bourrement, et en automne après les quatre mois de saison sèche. Par suite, la répartition pluviométrique en hiver et au printemps peut avoir une grande influence sur la croissance des arbres. Elle doit en effet, permettre la constitution dans le sol d'une réserve en eau suffisante pour couvrir les besoins de la plantation pendant les premiers mois de saison sèche, alors que la naissance des aiguilles se poursuit.

RESUMEN

Por el diagnóstico foliar se propone un estudio del ritmo de nutrición mineral del pino marítimo.

Durante un año, se han tomado muestras regulamente algunas agujas sobre arboles de 8 años de edad formando parte de una población artificial de *Pinus Pinaster v. atlantica* situada en el bosque de Mamora.

Se han mostrado las dos parcelas testigo y fertilizada donde se han plantado jóvenes árboles con abonos forfatados, antes del comienzo de la toma de muestras.

Se ha estudiado el nacimiento de los agujas, las variaciones de su contenido en N, P, K, Ca, Mg, Nn, así como su contenido en agua.

a) Las agujas jóvenes empiezan su crecimiento durante los meses de abril-marzo y terminan al comienzo del atoño (septiembre-octubre), quedando sobre el árbol durante tres o cuatro años.

b) Algunos contenidos en N, P, K desminuyen durante el crecimiento de las agujas y después durante los cuatro años del envejecimiento. Las desminuciones en el contenido de estos elementos son más importantes en primavera durante la brotación de las yemas. Los contenidos en N y P pueden aumentar ligeramente durante el invierno.

Se ha observado también que casi la totalidad del N, P, K contenidos en las agujas vuelven al árbol justo antes de que se caen las agujas.

c) El Cag, Mg así como el Mn se acumulan en las agujas durante su envejecimiento.

d) No se ha observado una diferencia significativa en el contenido en elementos nutritivos entre las dos parcelas testigo y fertilizada.

e) Se ha podido poner en evedencia que las necesidades de los árboles en agua son particularmente importantes en primavera (*brotación de yemas*) y en otono después de pasar los cuatro meses secos de verano. Se ha puesto en evidencia que las reparticiones pluviométricas en invierno y en primavera pueden tener mucha influencia sobre el crecimiento de los árboles. Debe permitir en efecto, la constitución de una reserva en agua suficiente para cubrir las necesidades de la plantación durante los primeros meses de sequedad, en el período del nacimiento de los agujas.

SUMMARY

The purpose of the present study is to examine the rhythum of mineral nutrition through foliar diagnosis of *Pinus pinaster.*

From an artificial stand of *Pinus pinaster* v. *atlantica* in the Mamora forest, two plots have been selected: one for control and one fertilized with phosphorus one year before the beginning of the sampling. Foliar samples from eight-year-old trees have been collected at regular intervals during a one-year period.

Needle growth and foliar contents in N, P, K, Ca, Mg and Mn have been studies as well as the water content of the soil and the needle moisture content.

The results are the following:

a) The needles tend to reach their dimension during the first six months (from april to october). They remain on the trees for three or four years.

b) During this period, the foliar content in N, P, K decreases, particularly in the spring and during the four following years. Some increase in the N and P content has been observed in winter. In summer, the N, P, K decreases abruptly in the four-year-old needles just before they fall, so these nutrients return to the tree.

c) The Ca, Mg and Mn content increases regularly during the life of the needles.

d) No significant differences in nutrient content have been observed between the control and the fertilized plots.

e) The water consumption of the trees is very important in the spring when the young needles are growing and also in autumn after

four months of dryness. Therefore, it is very important that there be sufficient rainfall in winter and spring due to the influence of moisture upon the growth of trees. Having adequate water stored in the soil aids against the effects of the dry season when the needles are still growing.

BIBLIOGRAPHIE

1. BILLAUX, P. — 1968. Profils de sols présentés dans le Saïs. — Congrès de pédologie méditerranéenne, Excursion au Maroc. Livret guide T III, Ministère de l'Agriculture et de la Réforme Agraire, Rabat, pp. 57-70.

2. LEPOUTRE, B. — 1963. — Recherches sur les conditions édaphiques de régénération des cèdraies marocaines. — Ann. de la Rech. For. du Maroc, T. VI, fasc. **2**, Rabat, p. 211.

CONTRIBUTION A L'ETUDE DE L'INFLUENCE DE DIVERS COMPOSANTS SUR LES CARACTERES PHYSICO - CHIMIQUES DES SOLS MAROCAINS

- Les sols de la plaine du Gharb

A. DEFLANDRE *

SOMMAIRE

I. Introduction
II. Technique d'étude
A. Préparation des échantillons
B. Mesure de la capacité d'échange de bases (C.E.B.)
C. Analyse Thermique Différentielle (A.T.D.)
D. Rayons X
III. Sols étudiés
A. Caractères généraux
B. Données analytiques
IV. Résultats obtenus
A. Dess
B. Tirs gris
C. Tirs de merja
D. Tirs noirs
E. Tirs bruns
V. Discussion des résultats
A. Influence de la matière organique
B. Influence de l'oxyde de fer
VI. Conclusion générale

* Ingénieur Chimiste à la Station de Base de Pédologie - D.R.A. - Rabat.

Al Awamia, 36, pp. 91-125, juillet, 1970.

I. Introduction

Le but de cette recherche est d'étudier le rôle de divers constituants du sol (argiles, matières organiques, calcaire, oxydes et hydroxydes de fer) sur les valeurs de la capacité d'échange de bases des terres marocaines.

Celles-ci dépendent, dans une large mesure, de la nature et de la structure des composants des sols, et, en premier lieu, de la nature minéralogique de leur matériau argileux. L'état des différentes formes de fer, de calcaire et d'humus a son importance, de même que les liaisons entre ces différents constituants et l'argile.

Ce qui ressort lorsque l'on étudie les profils des sols de la plaine du Gharb, ce sont les valeurs relativement modérées de la capacité d'échange de bases (de 25 à 55 méq/100 g) si l'on prend en considération la forte teneur en montmorillonite de la fraction argileuse. Ces mêmes valeurs de la capacité d'échange rapportées à la teneur en argile (100 t/argile) restent aussi faibles (de 55 à 85 méq.).

Ceci s'expliquerait par les faits suivants :

— La fraction argileuse est composée essentiellement de montmorillonite mal cristallisée et d'interstratifiés mal définis accompagnés de traces d'illite, de chlorite et de kaolinite.

— la teneur en matière organique de ces sols est relativement faible.

L'oxyde de fer, colloïde amphotère, et le calcaire, sous forme de péllicule, enroberaient les micelles argileuses.

On peut donc supposer que ces derniers éléments peuvent bloquer les sites d'échange de la fraction argileuse.

Pour se rendre compte de leur influence, nous avons comparé la capacité d'échange de base des sols naturels à celle des échantillons dans lesquels ces divers constituants ont été éliminés.

II. Techniques d'étude

Afin de connaître l'influence de divers constituants sur les propriétés physico-chimiques des sols, nous avons soumis les échantillons à différents traitements couramment employés pour les analyses minéralogiques (1, 2).

1. déshumification,
2. décalcarisation,
3. déshumification, décalcarisation et déferrification.

Les résultats des mesures de la capacité d'échange de bases des échantillons ont été contrôlés par l'analyse thermique différentielle et les rayons X afin de s'assurer si les minéraux argileux ne sont pas affectés par les traitements.

A. Préparation des échantillons

1. Sol naturel

Le sol, séché à l'air et passé au tamis de 2 mm, est considéré comme étant à l'état naturel. Il sert pour toutes les déterminations.

2. Sol déshumifié

La matière organique ne peut être détruite par chauffage à haute température car le réseau cristallin des minéraux argileux pourrait être altéré. L'oxydation de l'humus a donc été réalisée à chaud (70°C) par attaque à l'eau oxygénée à 30 % sur sol entier. L'échantillon est ensuite centrifugé trois fois, séché à l'air sur plaque chauffante à 70°C et ensuite broyé.

La différence entre les valeurs de la capacité d'échange des sols naturels et des sols ainsi traités donne une appréciation de la capacité d'échange due à la matière organique.

3. Sol décalcarisé

La décalcarisation doit être menée avec soin afin de ne pas perturber le réseau cristallin des argiles. Les agents chimiques habituels (acide chlorhydrique dilué et acétate de sodium à pH = 5) dissolvent difficilement certains calcaires très durs. Dans ce cas il faut séparer l'argile et les limons par sédimentation et attaquer la partie restante par l'acide chlorhydrique concentré. Les échantillons sont ensuite lavés à l'eau distillée, centrifugés et séchés à 70°C.

La différence entre les valeurs de la capacité d'échange de bases des sols naturels et des sols ainsi traités donne une appréciation de la capacité d'échange due au calcaire.

4. Sol deshumifié, décalcarisé et déferrisé

La dynamique du fer et l'état de ses différentes formes jouent un rôle essentiel dans les processus pédogénétiques. La méthode

employée pour éliminer les oxydes de fer qui recouvrent l'argile sans attaquer le réseau cristallin est celle de la dithionite avec le citrate comme agent complexant et le bicarbonate comme tampon du milieu (1, 2). Les échantillons sont préalablement déshumifiés et décalcarisés.

La différence entre les valeurs de la capacité d'échange de bases des sols naturels et des sols ainsi traités donne une appréciation de la capacité d'échange due au fer.

B. Mesure de la capacité d'échange de bases (C.E.B.)

Afin de vérifier si la technique de mesure de la C.E.B. des sols naturels influence les valeurs obtenues, nous avons comparé les méthodes de percolation et de centrifugation (TAB. 1).

1. Percolation (col. 1)

Le sol naturel est placé dans des colonnes de percolation et est saturé par une solution d'acétate d'ammonium à pH = 7 puis lavé à l'alcool à 95° afin d'éliminer l'excès d'ammonium. L'ammonium fixé sur le complexe adsorbant est déplacé par une solution de chlorure de sodium N. Il est dosé sous forme d'ammoniaque après distillation au Kjeldahl et recueilli dans l'acide chlorhydrique N/70 en présence d'un mélange d'indicateurs.

Dans le cas des sols naturels cette technique ne nous a pas donné entière satisfaction pour les sols de merja et pour les sols argileux très calcaires où la percolation s'est avérée difficile. Dans le cas des échantillons traités la percolation n'a pas eu lieu.

2. Centrifugation avec alcool (col. 2)

Le sol est saturé par une solution d'acétate de sodium N à pH = 8,2, agité pendant une demi-heure et centrifugé. Ces différentes opérations sont répétées trois fois. Le sodium en excès est éliminé par lavage à l'alcool à 95°. Le sodium fixé sur le complexe absorbant est ensuite déplacé par l'acétate d'ammonium N et dosé par photométrie de flamme.

Cette méthode est beaucoup plus rapide que la précédente mais nécessite encore des lavages à l'alcool, ce qui est coûteux, et provoque une hydrolyse des sols calcaires. Les valeurs de la C.E.B. obtenues sont souvent plus élevées que par la méthode de percolation.

TABLEAU 1

Capacité d'échange de bases

Profil N°	Profondeur en cm	Percolation Méthode I		Centrifugation Méthode II		Centrifugation Méthode III	
		Naturel		Naturel		Naturel	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)
22	0-20	27	26	25	34	18	
	20-40	26	24	28	31	28	
	60-80	26	26	28	35	29	
	140-160	23	24	27	33	23	
23	0-20	23	23	23	27	28	25
	40-60	38	38	38	46	48	44
	90-100	43	44	48	42	41	46
	140-160	47	47	48	48	47	49
24	0-20	n.d.	n.d.	41	43	37	40
	30-40	n.d.	n.d.	43	46	44	42
	50-60	n.d.	n.d.	40	41	30	37
	90 +	n.d.	n.d.	—	43	27	34
25	0-20	53	54	53	51	54	51
	40-50	54	54	54	51	54	50
	70-80	55	53	52	51	54	53
	135 +	—	—	44	35	34	34
27	0-15	42	43	44	45	46	39
	15-50	42	42	43	44	46	40
	65-85	42	41	43	44	46	42
	100-120	36	36	36	44	41	33

3. Centrifugation sans alcool (col. 3)

Le sol est pesé dans des tubes de centrifugeuse en polyéthylène et saturé avec de l'acétate de sodium N. On agite une demi-heure, centrifuge et décante trois fois. Après la troisième décantation, le sol est pesé humide, ce qui permet, connaissant le titre de la solution de saturation, de déduire la quantité de sodium fixée par le complexe adsorbant après extraction à l'acétate d'ammonium N. On dose le sodium total par photométrie de flamme. La différence entre le sodium total et le sodium en excès donne le sodium fixé sur le complexe.

Cette technique convient très bien, dans le cas des sols naturels et des sols traités, car elle permet d'éviter les lavages à l'alcool, et des manipulations supplémentaires délicates.

Conclusions

Cette étude comparative dont les résultats sont exposés au tableau I nous a montré que les valeurs de la C.E.B. des sols naturels sont très proches quelle que soit la technique appliquée, cependant les répétitions ne sont pas toujours parfaites car elles dépendent du nombre d'essais et du mode de prélèvement des échantillons. L'ordre de grandeur des différences est celui généralement admis pour ces valeurs.

La technique de centrifugation sans alcool a été adoptée car elle répond parfaitement à nos besoins, en particulier, dans le cas des sols traités. Cependant, il ne faut pas perdre de vue que la dispersion des résultats est plus élevée que dans les deux autres méthodes.

Les résultats des déterminations de la C.E.B. qui figurent dans le tableau I ont été rapportés à la terre décalcarisée dans le tableau IV afin de pouvoir comparer les résultats, la teneur en calcaire étant variable aussi bien dans un profil que d'un profil à l'autre.

C. Analyse thermique différentielle (A.T.D.)

L'analyse thermique différentielle, a été utilisée systématiquement au cours de nos essais.

Cet appareil de marque A.D.A.M.E.L. modèle 63, est constitué d'un four en atmosphère contrôlée, d'un système de régulation de la montée en température (la vitesse adoptée est de 10° C/min.) et d'un système porte-échantillon.

Les échantillons provenant des sols naturels ou traités sont tamisés à 0,2 mm et tassés légèrement dans les godets de l'appareil.

D. Rayons X

Afin de se rendre compte de l'état de l'argile après traitement, les échantillons ont été examinés à l'aide du diffractomètre de Service d'Etudes des Gîtes Minéraux à Rabat (S.E.G.M.).

La fraction argileuse (2 μ) est préparée par sédimentation, siphonnage et séchage à l'air ambiant de quelques gouttes de la suspension étalée sur des lames de verre porte-objet.

On examine successivement les échantillons naturels, traités au glycérol et chauffés à 580°C.

La technique d'interprétation des spectres est basée sur celle du Dr U. SHOEN (10, 11).

III. Sols étudiés

Bien que ces profils soient déjà décrits en détail dans le livre-guide de l'excursion 1966, il est bon de rappeler ici, pour une meilleure compréhension des résultats, quelques-uns de leurs caractères qui se rapportent au sujet de notre étude.

A. Caractérisation des sols (TABL. 2 et 3)

1. Dess argileux tirsifié (N° 22)

Sol peu évolué d'apport, calcimorphe, sur alluvions complexes

Ce profil montre une coupe des formations superficielles du Gharb où se remarquent au moins trois dépôts successifs : la partie supérieure (de 0 à 80 cm), dans laquelle l'horizon de 0 à 20 cm serait très récent (Dess actuel), correspond aux apports subactuels argilo-limoneux calcaires (Dess subactuel). Sous ces apports récents on trouve une autre formation (à partir de 80 cm) plus ancienne. Cette dernière possède beaucoup d'analogies avec le profil suivant (N° 23) qui est un tirs gris formé sur des alluvions rharbiennes. Ce serait un sol enterré. En dessous de ces horizons on voit apparaître, au niveau de l'oued, les assises rubéfiées du Soltanien (tirs brun ?).

Dans ce profil nous n'étudierons que la partie supérieure correspondant au Dess, l'horizon profond étant étudié dans le tirs gris.

TABLEAU 2

Caractéristiques des profils

	Profondeur	Etages	Composition minéralogique					
	en cm	—	I	C	M	Int	K	V
Profil 22 — Dess argileux tirsifié	0-20	Actuel	mf	f	abs	m	ff	abs
Sol peu évolué d'apport calcimorphe, vertique en profondeur, sur alluvions complexes	20-40	Subactuel	mf	mf	f	m	ff	abs
	60-80	Subactuel	mf	mf	f	m	ff	abs
	140-160	Rharbien	mf	mf	ff	m	ff	abs
Profil 23 — Tirs gris	0-20	Actuel	mf	f	mf	m	mf	abs
	40-60	Rharbien	f	mf	mF	mf	mf	abs
Vertisol topolithomorphe peu développé, formation argileuse et calcaire	90-100	Rharbien	f	mf	F	mf	mf	abs
	140-160	Rharbien	f	ff	FF	f	mf	abs
Profil 24 — Tirs de merja	0-20	Rharbien	f	f	F	mf	f	abs
	30-40	Rharbien	f	mf	F	mf	f	abs
Vertisol à hydromorphie temporaire d'engorgement, sur alluvions argilo-calcaires	50-60	Rharbien	f	f	F	mf	f	abs
	90 +	Rharbien	f	mf	F	mf	f	abs
Profil 25 — Tirs noir	0-20	Soltanien	Tr	Tr	FF	f	f	abs
	40-50	Soltanien	Tr	ff	FF	f	mf	abs
Vertisol topolithomorphe modal, formation argileuse et calcaire	70-80	Soltanien	Tr	Tr	FF	f	mf	abs
	135 +	Soltanien	Tr	Tr	FF	mf	f	abs
Profil 27 — Tirs brun	0-15	Soltanien	f	mf	F	m	f	abs
	15-50	Soltanien	f	mf	F	m	f	abs
Sol châtain isohumique subtropical vertique, non calcaire en surface	65-85	Soltanien	f	mf	F	m	f	abs
	100-120	Soltanien	mf	mf	F	m	f	abs

2. Tirs gris (N° 23)

Vertisol topolithomorphe peu développé, sur formation argileuse calcaire

La partie supérieure de ce profil, argileuse et calcaire, correspond au tirs gris, vertisol peu développé, tandis que la partie inférieure, argileuse elle aussi, mais foncée et peu calcaire, peut être attribuée au tirs noir enterré, vertisol plus évolué et plus ancien. L'horizon de surface (de 0 à 20 cm) a été apporté au cours des inondations des années 1962-1963.

3. Tirs de merja (N° 24)

Vertisol à hydromorphie temporaire d'engorgement, sur alluvions argilo-calcaires de dépressions

Ce profil est un exemple de tirs de merja centrale. Il est constitué par trois niveaux : la partie supérieure, moyennement calcaire, est séparée des horizons profonds, fortement calcaires, par un niveau faiblement carbonaté.

4. Tirs noir (N° 25)

Vertisol topomorphique modal sur formation argileuse et calcaire du Soltanien

Ce profil est un exemple type du tirs noir. Il est décalcarisé jusqu'à 1 mètre de profondeur, niveau à partir duquel il devient calcaire.

5. Tirs brun (N° 27)

Sol châtain isohumique subtropical, vertique, non calcaire en surface

Ce profil s'est formé sur des alluvions soltaniennes. Il est plus rouge que le profil du tirs noir formé sur les dépôts du même âge. Il est décalcarisé dans sa partie supérieure.

B. Données analytiques (TABL. 2 et 3)

1. Dess (N° 22)

a. Argile

Le taux d'argile est le plus faible de cette série de sols étudiés : il oscille autour de 25 % avec un maximum de 33 % dans l'horizon

TABLEAU 3

Caractéristiques physiques et chimiques

Profil N°	Profondeur en cm	Argile %	Arg Déc %	$CaCO_3$ %	Fe_2O_3t %	Fe_2O_3l %	C %	M.O. %	AH + AF ‰	AH ‰	AF ‰
22	0-20	25	41	21	4,50	1,30	1,33	2,29	2,90	2,21	0,69
	20-40	33	39	18	5,00	1,20	1,41	2.43	3,77	3,21	0,56
	60-80	26	34	18	5,00	1,20	1,36	2,34	3,51	3,11	0,40
	140-160	46	54	20	5,75	1,40	0,73	1,26	1,07	0,72	0,35
23	0-20	59	72	13	7,75	2,90	1,11	1,91	1,76	1,07	0,69
	40-60	71	79	13	7,25	2,17	0,87	1,50	0,87	0,64	0,23
	90-100	80	74	11	7,25	2,00	0,84	1,45	2,24	1,74	0,50
	140-160	70	79	13	7,20	1,70	0,82	1,41	2,29	1,75	0,54
24	0-20	70	80	24	6,25	1,40	2,27	3,90	5,55	4,31	1,24
	30-40	67	82	20	6,00	1,25	1.81	3,11	4,69	3,58	1,11
	50-60	68	74	26	6,75	2,30	1,08	1,86	2,30	1,28	1,02
	90 +	75	81	16	7,00	1,90	1,85	3,16	3,16	2,17	0,99
25	0-20	—	69	1	7,25	2,00	1,54	2,65	2,99	2,48	0,51
	40-50	—	63	2	7,25	1,85	1,10	1.89	2.27	1,97	0,30
	70-80	—	62	1	6,00	1,70	0,78	1,34	2,18	2,01	0,17
	135 +	—	64	18	6,50	1,60	0,56	0,97	1,67	1,63	0,04
27	0-15	61	63	1	7,00	2,60	0,94	1,62	—	—	—
	15-50	65	67	1	7,00	2,65	0,93	1,60	—	—	—
	65-85	61	60	2	7,00	2,60	0,50	0,86	—	—	—
	100-120	—	60	6	6,50	2,40	0,46	0,79	—	—	—

intermédiaire. La nature minéralogique de l'argile de l'horizon supérieur diffère du deuxième et du troisième par l'absence de montmorillonite dont le taux reste faible tandis que celui des interstratifiés est plus important.

b. Matière organique

Le taux de matière organique est relativement élevé pour le Maroc (plus de 2 %) ; il diminue au niveau du tirs gris.

c. Calcaire

Dans les horizons du Dess, le taux de calcaire varie autour de 18 %, il est plus élevé (20 %) dans le niveau correspondant au tirs gris.

d. Fer

La teneur en fer total est la plus basse parmi les profils étudiés (5 %) : elle croît légèrement avec la profondeur, de même que la teneur en fer libre dont le taux est relativement faible par rapport au fer total (24 à 31 %).

2. Tirs gris (N° 23)

a. Argile

Le taux d'argile est élevé et augmente de 70 à 80 %. La fraction argileuse de ce profil est surtout constituée de montmorillonite dont la teneur croît avec la profondeur.

b. Matière organique

Le taux de matière organique est moyen et diminue avec la profondeur.

c. Calcaire

Le taux de calcaire est moyen dans les horizons de surface (13 %), diminue dans l'horizon sous-jacent (8 %) et tombe à 4 % en profondeur (de 140 cm à 160 cm).

d. Fer

Le taux de fer (7,25 %) total reste assez uniforme dans tout le profil ; celui du fer libre, assez élevé en haut du profil, diminue avec la profondeur.

3. Tirs de merja (N° 24)

a. Argile

Le taux d'argile est homogène et oscille autour de 64 % pour la partie non calcaire et 80 % pour la terre décalcarisée. La fraction argileuse est constituée principalement de montmorillonite.

b. Matière organique

La teneur en matière organique est élevée en surface (3,9 %), elle diminue progressivement mais son taux reste assez élevé dans tout le profil.

c. Calcaire

La teneur en calcaire est assez forte en haut du profil (20 à 26 %) et diminue en profondeur (16 %).

d. Fer

Le taux de fer total est plus faible que dans le profil précédent (de 6 à 7 %) ; le taux de fer libre, relativement modéré en surface (1,4 %), augmente avec la profondeur pour atteindre un maximum (2,3 %) et ensuite diminuer (1,9 %).

4. Tirs noir (N° 25)

a. Argile

La teneur en argile est homogène dans le profil étudié et son taux oscille entre 62 et 69 % pour la terre non calcaire. La fraction argileuse est constituée principalement de montmorillonite bien cristallisée par rapport aux autres profils.

b. Matière organique

Le profil est bien pourvu en matière organique (2,65 % dans l'horizon supérieur); il est plus riche que le tirs gris mais moins que le tirs de merja.

c. Calcaire

Le profil est très faiblement calcaire (1 à 2 %) jusqu'à 130 cm et devient fortement calcaire en dessous de cet horizon.

d. Fer

Le taux de fer total (6,5 à 7 %) ainsi que celui du fer libre diminue légèrement avec la profondeur.

5. Tirs brun (N° 27)

a. Argile

La teneur en argile est homogène dans le profil étudié et son taux oscille entre 60 et 67 %. La fraction argileuse est composée essentiellement de montmorillonite mais en quantité moindre que dans le profil précédent.

b. Matière organique

La teneur en matière organique est relativement faible (1,60 %).

c. Calcaire

La partie supérieure du profil n'est pas calcaire jusqu'à 1 m.

d. Fer

Le taux de fer total, comparable à celui des autres sols (6,5 à 7 %), est constant. Le taux de fer libre est plus élevé que dans les autres profils et représente 37 % du fer total.

IV. Résultats obtenus

Dans le tableau IV figurent les résultats obtenus suivant les différentes techniques (col. 1, 2 et 3), leurs moyennes (col. 4), la relation 100 T/argile (col. 5) et les résultats de la C.E.B. obtenus après traitement (col. 6 et 7).

A. Profil du Dess (N° 22)

1. Capacité d'échange de bases (TABL. IV)
   a. Sol naturel (col. 1, 2, 3, 4 et 5)

La C.E.B. du Dess oscille autour de 33 méq/100 g en rapportant les résultats à la terre décalcarisée. Elle est plus faible que celle des autres profils. Cependant si les résultats sont exprimés par rapport à la teneur en argile, 100 T/A, elle est plus élevée. Cette relation oscille en effet entre 80 et 100 méq.

b. Sol déshumifié (col. 6)

Sous l'effet de l'attaque à l'eau oxygénée, on observe une nette diminution des valeurs de la C.E.B. dans les horizons du Dess. L'horizon profond étant assimilé à un tirs gris, nous le caractériserons dans le paragraphe traitant de ce sol.

TABLEAU 4

Capacité d'échange de bases (terre décalcarisée)

Profil N°	Profondeur en cm	Percolation Méthode I		Centrifugation Méthode II		Centrifugation Méthode III		Moyenne	100 * T/A	Centrifugation Méthode III Déshumifié		Centrifugation Méthode III Désh-Déc-Défer	
		1		2		3		4	5	6		7	
		(1)	(2)	(1)	(2)	(1)	(2)			(1)	(2)	(1)	(2)
22	0-20	34	33	32	43	23		31	76	24	32	18	27
	20-40	30	29	34	38	34		32	82	27	34	28	27
	60-80	29	33	34	43	35		34	100	28	24	26	27
	140-160	26	30	34	41	29		31	57	30	25	28	27
23	0-20	44	26	26	31	32	29	28	39	15	19	26	26
	40-60	44	44	44	53	55	51	48	61	40	48	34	42
	90-100	48	49	54	47	46	52	49	61	47	53	41	47
	140-160	54	54	55	55	54	56	54	68	49	56	47	50
24	0-20	nd	nd	54	57	49	53	53	66	50	46	36	38
	30-40	nd	nd	54	57	55	53	55	67	45	43	43	41
	50-60	nd	nd	54	55	41	50	53	65	42	43	52	46
	90 +	nd	nd	—	51	32	40	51	63	38	37	45	38
25	0-20	53	54	53	52	54	53	53	77	53	55	47	47
	40-50	54	54	54	51	54	50	53	84	54	56	43	48
	70-80	55	53	52	51	54	53	53	85	45	—	44	45
	135 +	—	—	54	43	42	42	45	70	38	40	52	53
27	0-15	42	43	44	45	46	39	43	68	48	52	31	30
	15-50	42	42	43	44	46	40	43	64	49	53	34	31
	65-85	42	41	43	44	46	42	43	71	49	54	34	27
	100-120	38	38	38	47	44	35	40	67	40	34	30	27

c. Sol déshumifié, décalcarisé et déférrisé (col. 7)

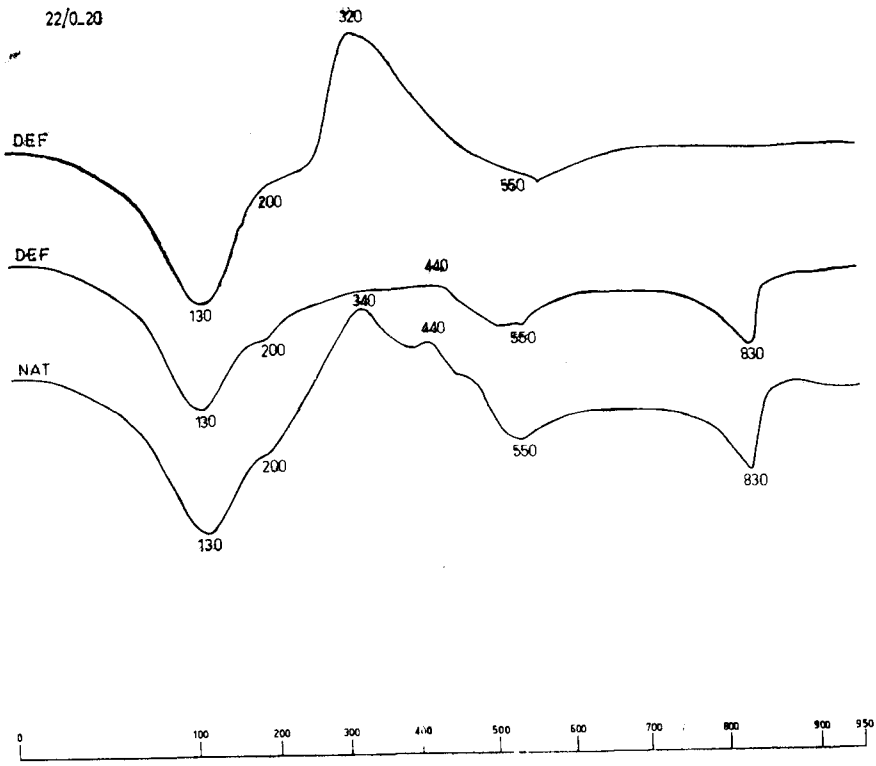
Sous l'effet de la déferrification, la C.E.B. diminue, par rapport au sol naturel, dans tout le profil du Dess. Elle reste cependant voisine de celle du sol déshumifié, sauf dans l'horizon supérieur où elle baisse.

2. Analyse thermique différentielle (GRAPH. I)

a. Sol naturel

L'allure générale de la courbe de réaction est celle d'un sol argilo-limoneux calcaire peu évolué, possédant de la matière organique en quantité relativement abondante. Les réactions exothermiques sont assez prononcées et l'on distingue deux pics nets à 340° et 440°C.

GRAPHIQUE I-a



Un pic endothermique se remarque à 830°C (présence de calcite). Les courbes des horizons supérieurs sont identiques.

b. Sol déshumifié

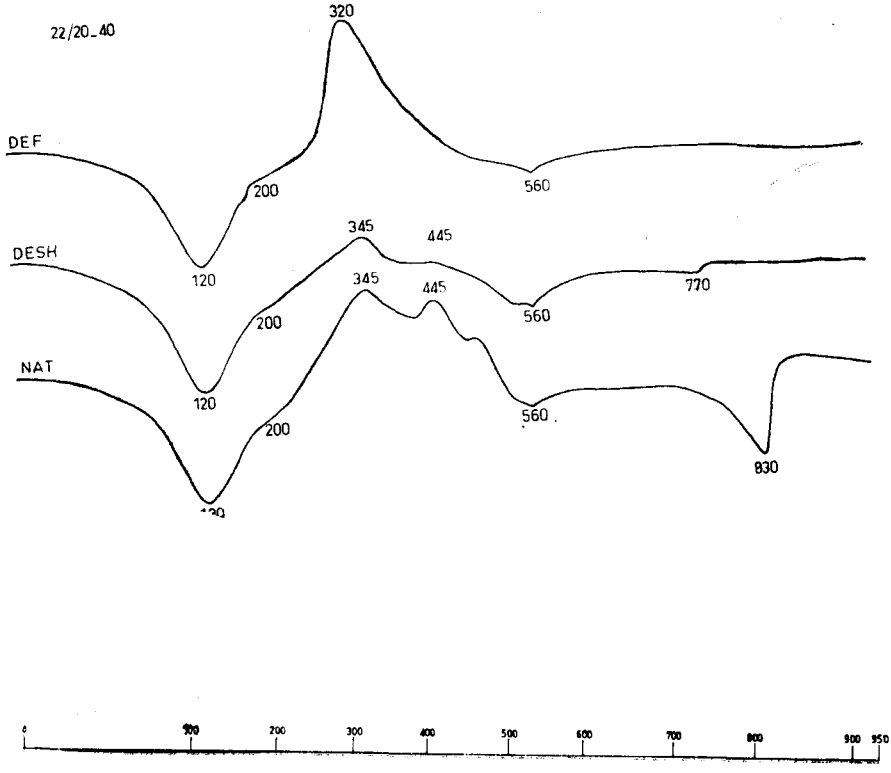
Sous l'effet de l'attaque à l'eau oxygénée, on observe dans l'horizon de surface une forte diminution de l'intensité des pics. Le pic exothermique à 440°C disparaît complètement, seul le pic à 340°C semble persister.

Sous l'effet de la déferrification, un pic exothermique très important apparaît. En même temps on constate la disparition à 830°C du pic de la calcite.

3. Rayons X (TABL. II)

Le taux de montmorillonite est très faible dans tout le profil du Dess ; elle est absente dans l'horizon supérieur. Les interstratifiés

GRAPHIQUE I-b



sont relativement abondants ainsi qu'une proportion moindre d'illite, de chlorite et de kaolinite.

B. Profil du tirs gris (N° 23)

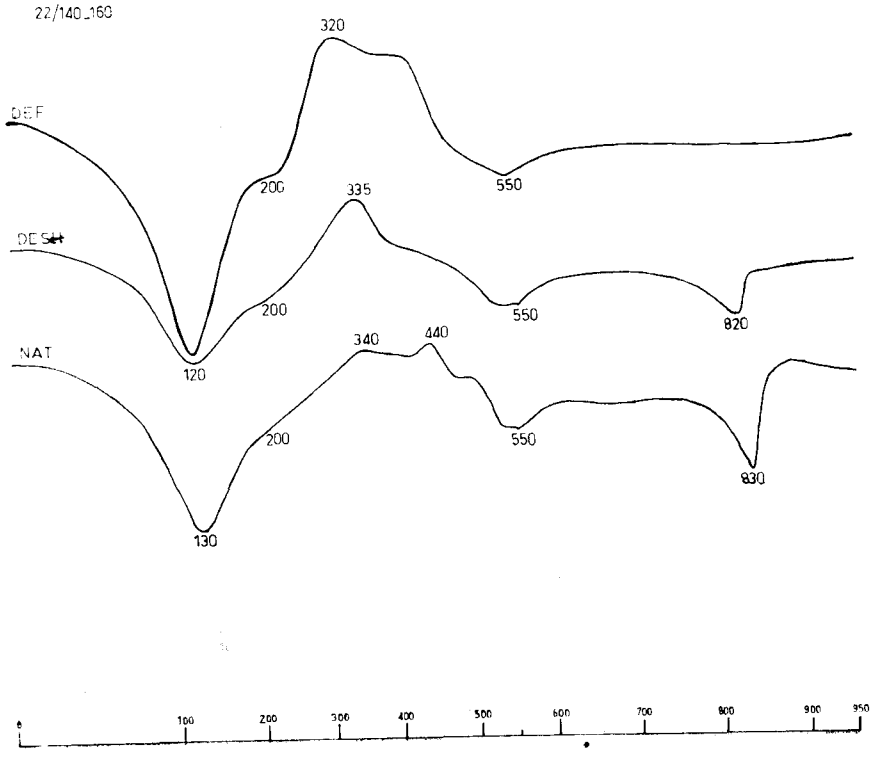
1. Capacité d'échange de bases (TABL. IV)

a. Sol naturel (col 1, 2, 3, 4 et 5)

Dans le tirs gris, la C.E.B. croît avec la profondeur parallèlement à l'accroissement de la teneur en argile du type montmorillonite (voir TABL. II). Elle augmente de 48 à 54 méq/100 g par rapport à la terre décalcarisée. La relation 100 T/Argile varie de 61 à 68 méq et est plus faible que dans le dess.

En ce qui concerne l'horizon de surface, la C.E.B. est du même ordre de grandeur que celle du Dess (28 méq/100 g par rapport

GRAPHIQUE I-c



à la terre décalcarisée). Par contre, la relation 100 T/Argile est beaucoup plus faible.

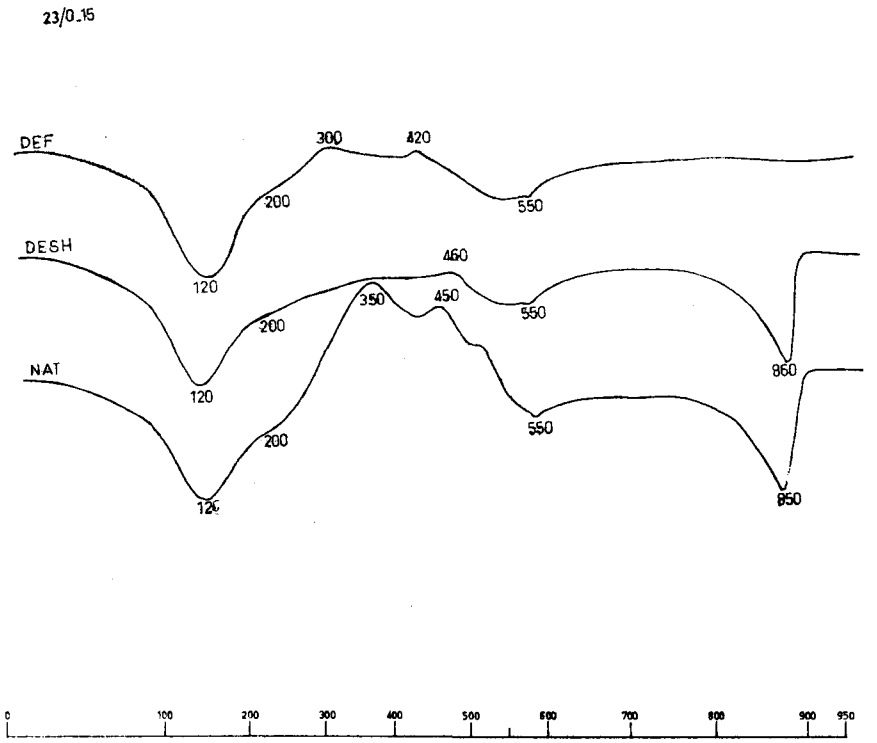
b. Sol déshumifié (col. 6)

On n'observe pas de changement de la C.E.B. dans le tirs gris et le tirs noir sous-jacent. Dans l'horizon de surface, d'apport récent, la C.E.B. diminue après déshumification comme dans le cas du Dess.

c. Sol déshumifié, décalcarisé et déferrisé (col. 7)

Après traitement, la C.E.B. baisse par rapport au sol naturel mais ne change pas par rapport au sol déshumifié.

GRAPHIQUE II-a

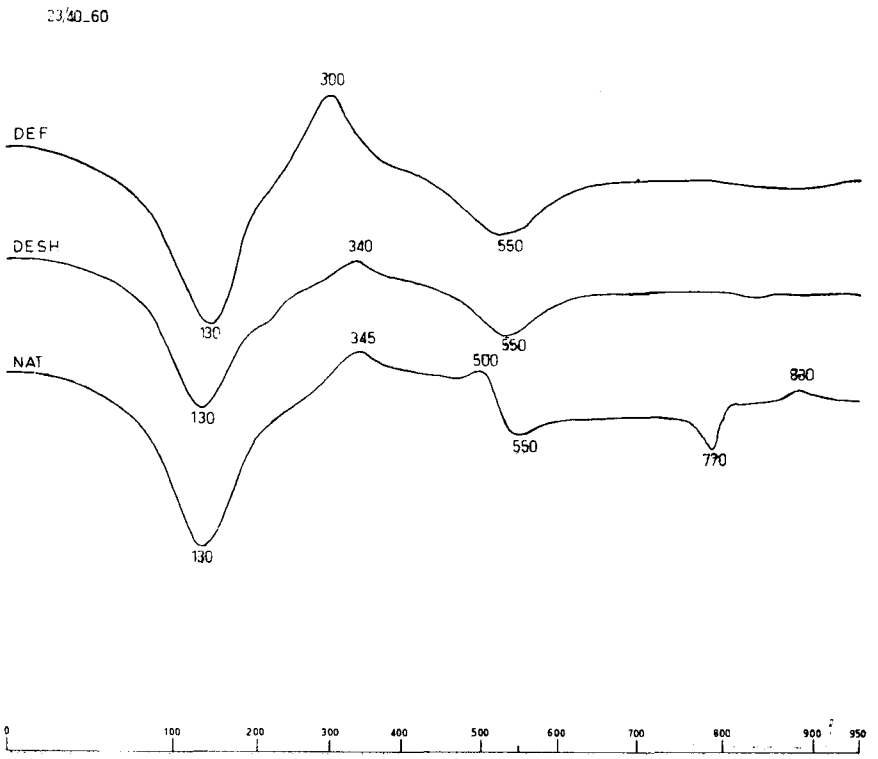


2. Analyse thermique différentielle (GRAPH. II)

a. Sol naturel

L'allure générale de la courbe de réaction est celle d'un sol argileux calcaire dans les horizons supérieurs et décalcarisé en profondeur. La matière organique est relativement peu abondante. Les réactions exothermiques sont étalées dans le tirs gris et le tirs noir sous-jacent et l'on distingue deux pics à 340 et 500°C. Par contre, dans l'horizon de surface les pics à 340 et 440°C sont nets et pointus. On remarque un pic endothermique à 770°C dans le tirs gris et à 830°C dans l'horizon correspondant au Dess. Dans les deux horizons profonds, un pic exothermique apparaît faiblement à 880°C.

GRAPHIQUE II-b



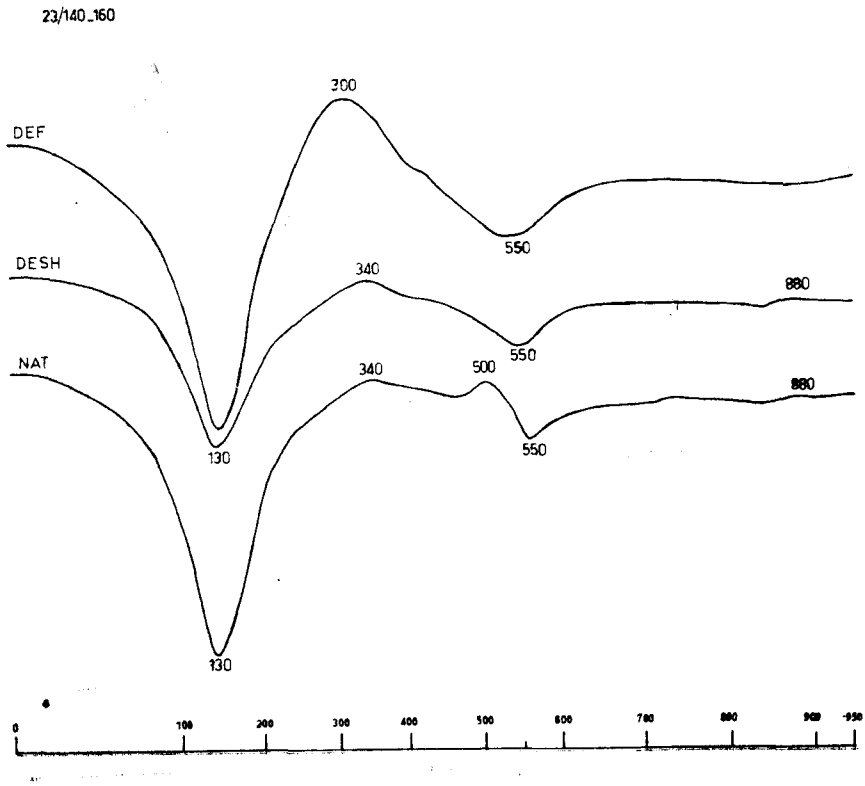
b. Sol déshumifié

Après l'attaque à l'eau oxygénée, seul le pic exothermique à 340°C subsiste. Dans l'horizon de surface correspondant au Dess les pics exothermiques à 340 et 440°C disparaissent complètement.

c. Sol déshumifié, décalcarisé et déferrisé (col. 7)

Sous l'effet de la déferrification, on voit apparaître un pic exothermique à 300°C mais de plus faible intensité que dans le Dess. Dans l'horizon supérieur il n'apparaît pas mais on remarque la présence de deux pics exothermiques très faibles à 300 et 420°C.

GRAPHIQUE II-c



3. Rayons X (TABL. II)

La fraction argileuse est constituée surtout de montmorillonite dont la teneur croît en fonction de la profondeur au détriment des interstratifiés. Le reste est constitué d'illite, de chlorite et de kaolinite.

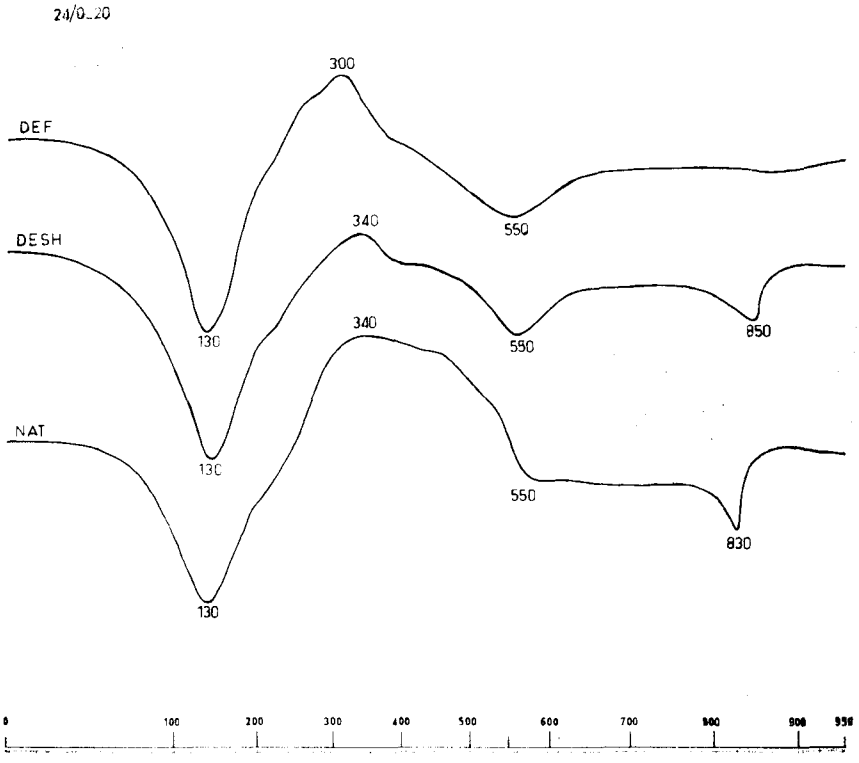
C. Profil de merja (N° 24)

1. Capacité d'échange de bases (TABL. IV)

a. Sol naturel (col. 1, 2, 3, 4 et 5)

Dans ce sol, la C.E.B. est relativement élevée et diminue avec la profondeur. Elle varie entre 51 et 55 méq/100 g par rapport à la terre décalcarisée. Par contre, ces valeurs rapportées à la teneur en argile, oscillent autour de 65 méq dans tout le profil.

GRAPHIQUE III-a



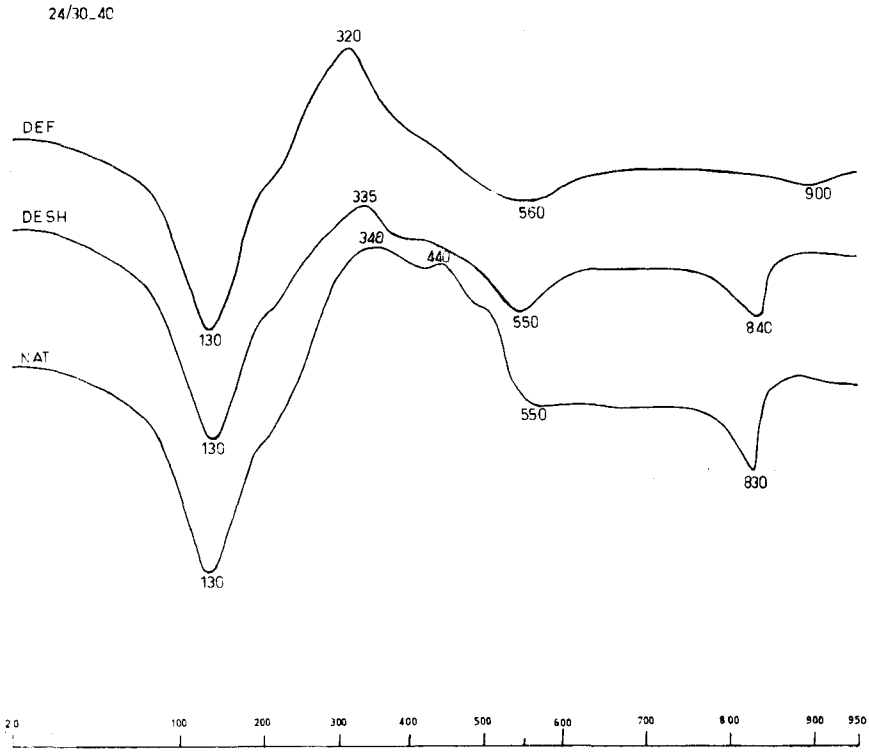
b. Sol déshumifié (col. 6)

L'attaque de la matière organique par l'eau oxygénée entraîne une nette diminution de la C.E.B. par rapport au sol naturel dans tout le profil.

c. Sol déshumifié, décalcarisé et déferrisé (col. 7)

Après déferrification, la diminution de la C.E.B. est importante par rapport au sol naturel mais plus faible par rapport au sol déshumifié. Cette diminution est plus élevée dans l'horizon supérieur et plus faible dans l'horizon profond.

GRAPHIQUE III-b



2. Analyse thermique différentielle (GRAPH. II)

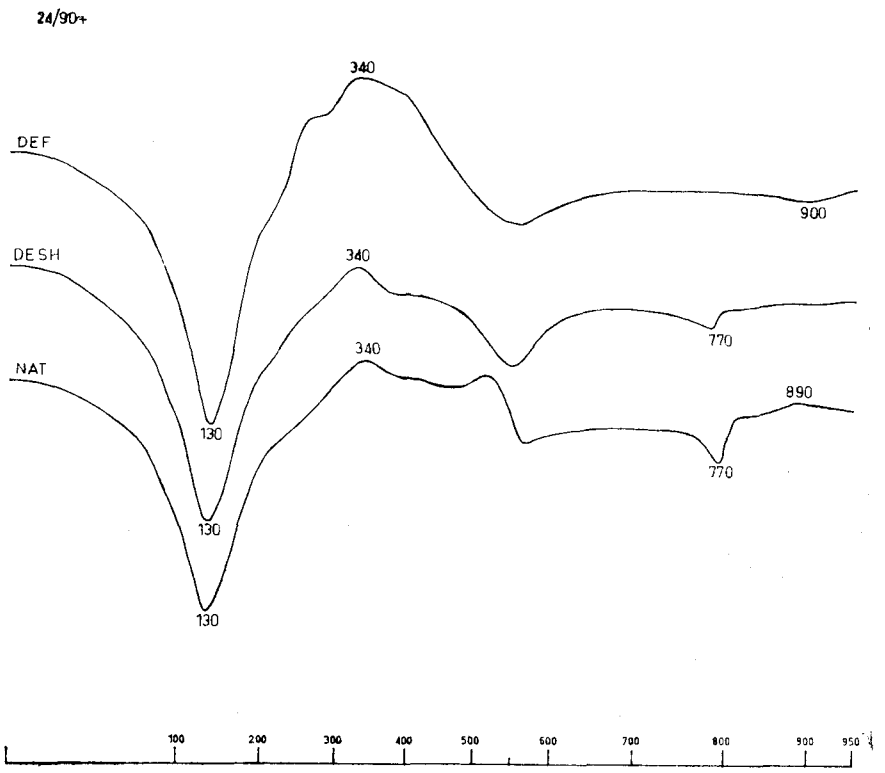
a. Sol naturel

L'allure générale des courbes de réaction est celle d'un sol argileux contenant une forte proportion de calcaire. Dans l'horizon supérieur le pic exothermique est important et en forme de cloche. Le pic de déshydroxylation à 550°C est masqué par la réaction endothermique de la calcite à 830°C. L'horizon sous-jacent est identique au précédent mais deux pics exothermiques peu prononcés apparaissent à 340 et 440°C. Par contre, dans l'horizon profond, ils se situent à 340° et 500°C et leur intensité est plus faible.

b. Sol déshumifié

Après l'oxydation de la matière organique, les pics exothermiques diminuent fortement d'intensité. Cependant une réaction exother-

GRAPHIQUE III-c



mique à 340°C persiste tandis que celle à 400 ou 500°C disparaît. Le pic de déshydroxylation à 550°C est net. La réaction endothermique due à la calcite subsiste.

c. Sol déshumifié, décalcarisé et déferrisé

Sous l'effet de la déferrification, un pic exothermique important apparaît en même temps que l'on constate la disparition du pic de la calcite à 830°C.

3. Rayons X (TABL. II)

La fraction argileuse est constituée principalement de montmorillonite. Le reste est constitué d'un mélange d'interstratifiés, de traces d'illite, de chlorite et de kaolinite.

D. Profil du tirs noir (N° 25)

1. Capacité d'échange de bases (TABL. IV)

a. Sol naturel (col. 1, 2, 3, 4 et 5)

Dans le tirs noir, la C.E.B. est élevée et constante dans les horizons non calcaires. Par rapport à la terre décalcarisée, la C.E.B. atteint 53 méq/100 g dans les horizons supérieurs et 45 méq/100 g dans l'horizon profond. Jusqu'à 135 cm, en rapportant ces valeurs au taux d'argile (100 T/A) le rapport oscille autour de 80 méq.

b. Sol déshumifié (col. 6)

Après l'attaque à l'eau oxygénée, il n'y a pas de changement de la C.E.B. ni dans les horizons supérieurs du tirs noir (N° 25) ni dans les horizons profonds du tirs gris (N° 23) correspondant au tirs noir enterré (90 à 160 cm). Il y a une diminution en profondeur par rapport au sol naturel.

Après déferrification, on observe une diminution très nette de la C.E.B. par rapport au sol naturel et au sol déshumifié. Cette diminution est plus importante que dans les sols précédents. Cependant, l'horizon plus profond (135 cm) présente une augmentation de cette valeur dépassant 50 méq/100 g.

2. Analyse thermique différentielle (GRAPH. IV)

a. Sol naturel

L'allure générale de la courbe de réaction est celle d'un sol argileux non calcaire en surface, contenant peu de matière organique

par rapport aux sols précédents. Les réactions exothermiques à 340 et 440°C, assez prononcées dans les horizons supérieurs, n'apparaissent plus en profondeur où l'on remarque un pic endothermique à 830°C. Une réaction exothermique apparaît à 880°C dans tout le profil.

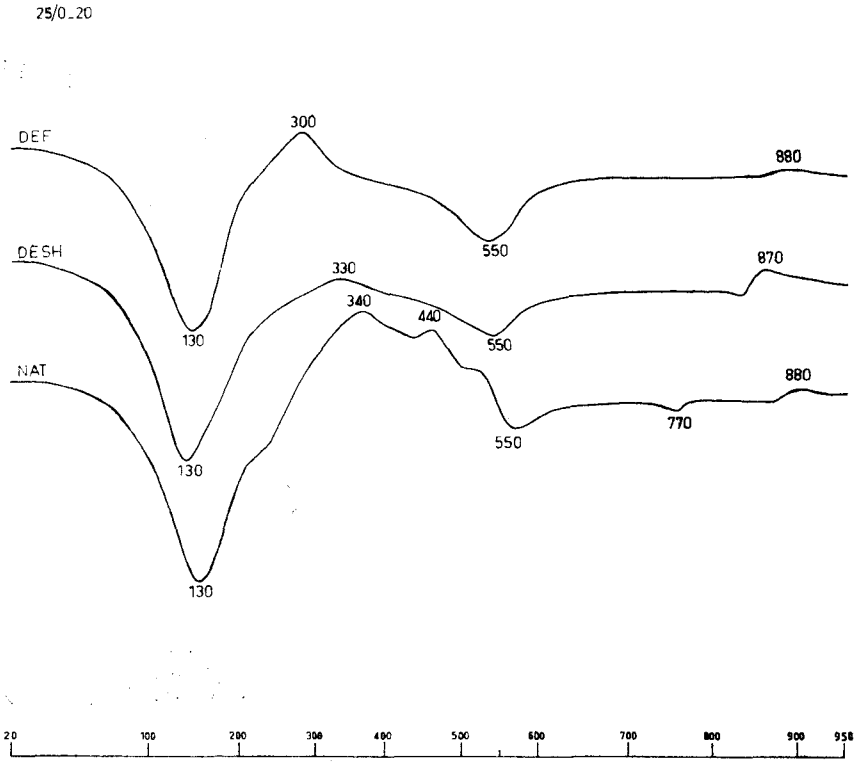
b. Sol déshumifié

Après traitement à l'eau oxygénée, la réaction exothermique à 340°C est très faible et celle à 440°C disparaît complètement.

c. Sol déferrisé (col. 1, 2, 3, 4 et 5)

La réaction exothermique à 300°C est peu importante, sauf dans l'horizon profond.

GRAPHIQUE IV-a



3. Rayons X (TABL. II)

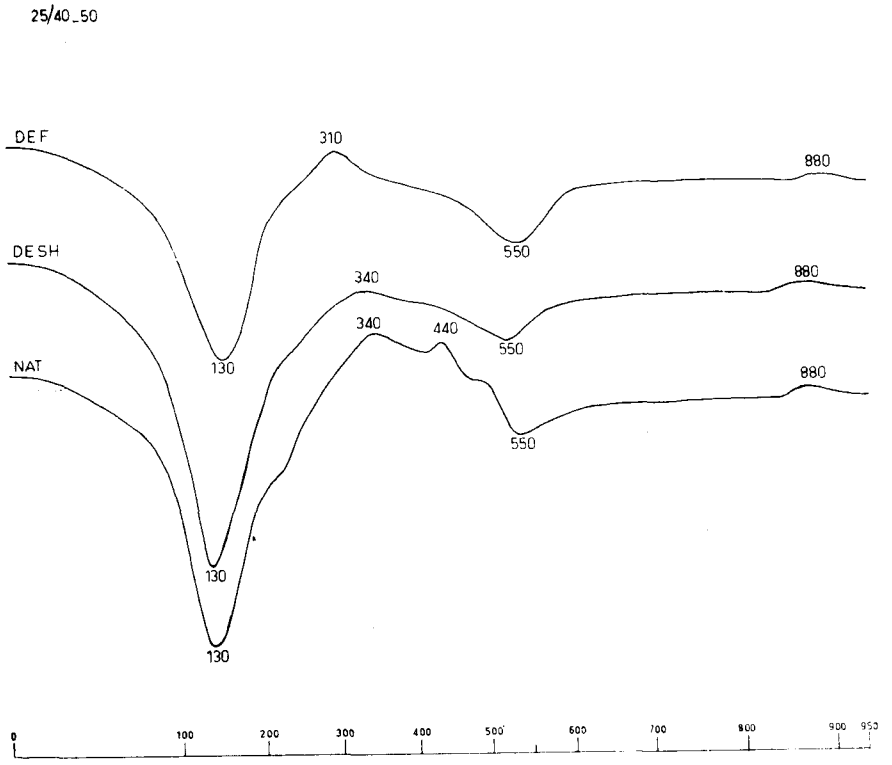
Le tirs noir est le profil le plus riche en montmorillonite qui constitue la majeure partie de la fraction argileuse. Le pic caractéristique de la montmorillonite est plus net que dans les autres sols de cette série.

E. Profil du tirs brun (N° 27)

a. Sol naturel (co.l 1, 2, 3, 4 et 5)

Dans ce sol, la C.E.B. est élevée et constante dans les horizons non calcaires ; elle diminue en profondeur. Par rapport à la terre décalcarisée, elle atteint 43 méq/100 g en surface et 40 méq/100 g

GRAPHIQUE IV-b



en profondeur. La relation 100 T/Argile se situe autour de 70 méq et est plus faible que dans le sol précédent.

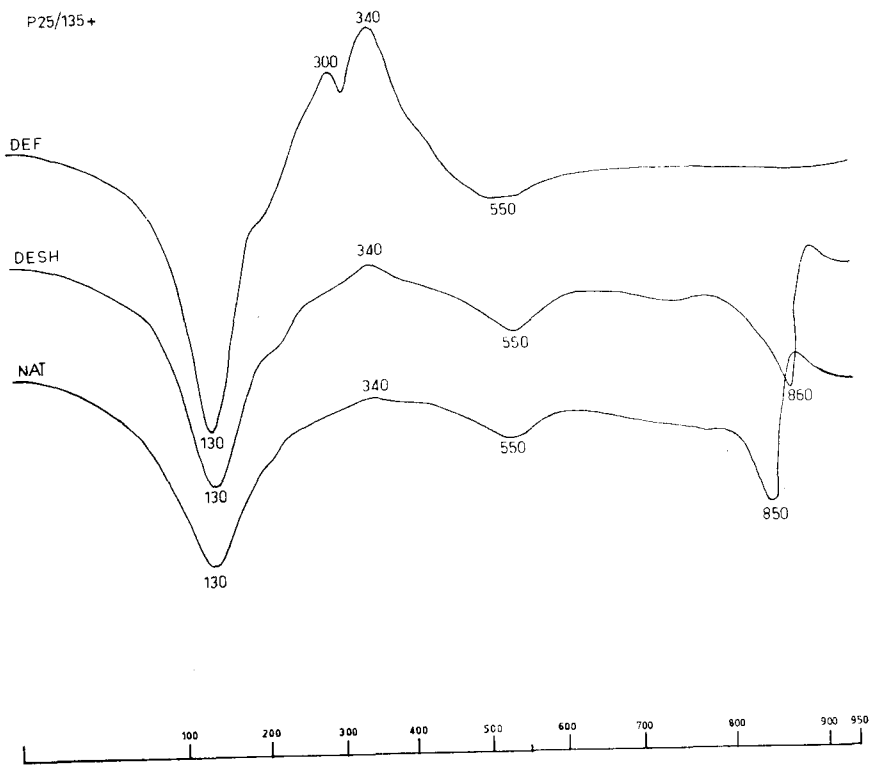
b. Sol déshumifié (col. 6)

Sous l'effet de l'attaque à l'eau oxygénée, on observe une légère augmentation de la C.E.B. dans la partie supérieure du profil, contrairement aux autres sols.

c. Sol déshumifié, décalcarisé et déférrisé (col. 7)

La déferrification entraîne une forte diminution de la C.E.B. Elle est constante dans tout le profil et est la plus élevée par rapport aux autres profils.

GRAPHIQUE IV-c



2. Analyse thermique différentielle (GRAPH. V)

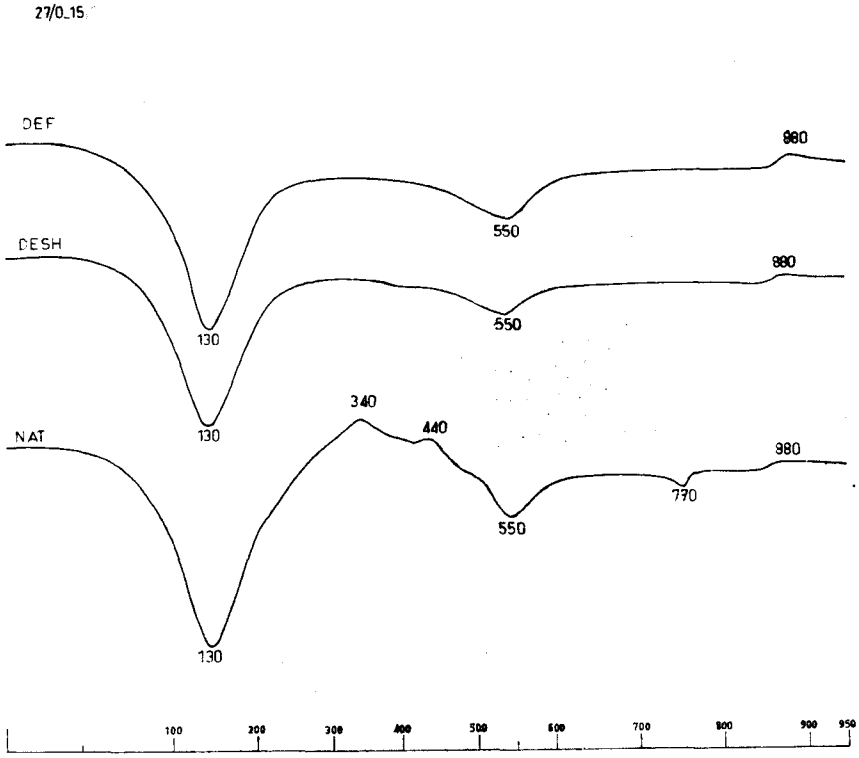
a. Sol naturel

L'allure générale des courbes de réaction est celle d'un sol argileux contenant de la matière organique en très faible quantité. Les réactions exothermiques à 340 et 440°C sont peu importantes. La réaction endothermique à 770°C apparaît faiblement dans l'horizon supérieur et inférieur.

b. Sol déshumifié

Sous l'effet de l'attaque à l'eau oxygénée, la disparition des pics à 340 et 440°C est complète.

GRAPHIQUE V-a



c. Sol déshumifié, décalcarisé et déferrisé

3. Rayons X (TABL. II)

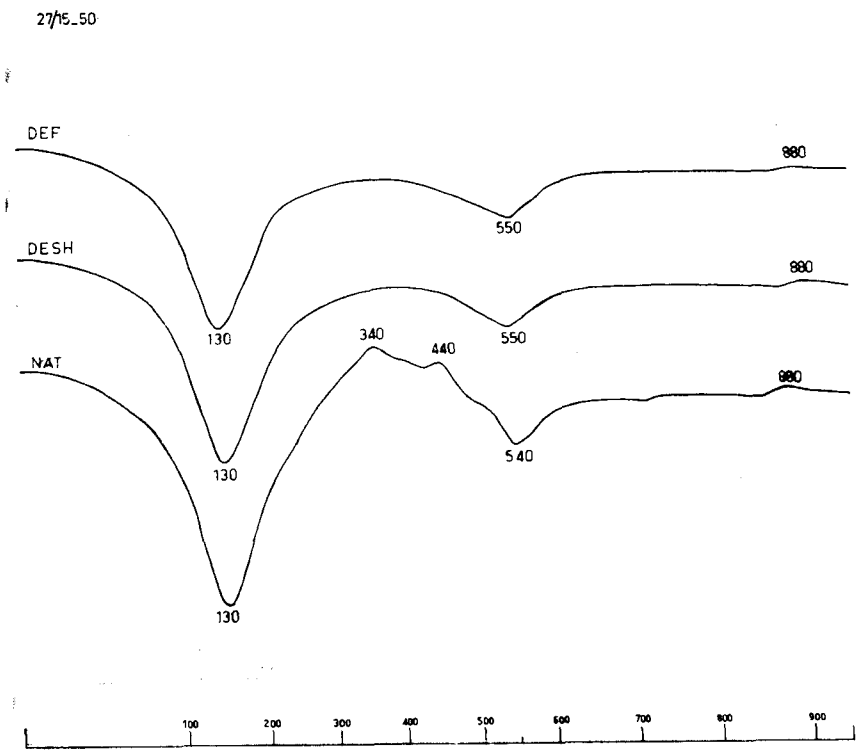
La fraction argileuse contient essentiellement de la montmorillonite mais en plus faible quantité que dans le tirs noir. La teneur en interstratifiés est également plus importante, le reste étant constitué de traces d'illites, de chlorite et de kaolinite.

V. Discussion des résultats

A. Influence de la matière organique

Sous l'effet du traitement à l'eau oxygénée, la C.E.B. diminue dans les sols jeunes d'apport alluvial (Dess) et dans l'horizon supé-

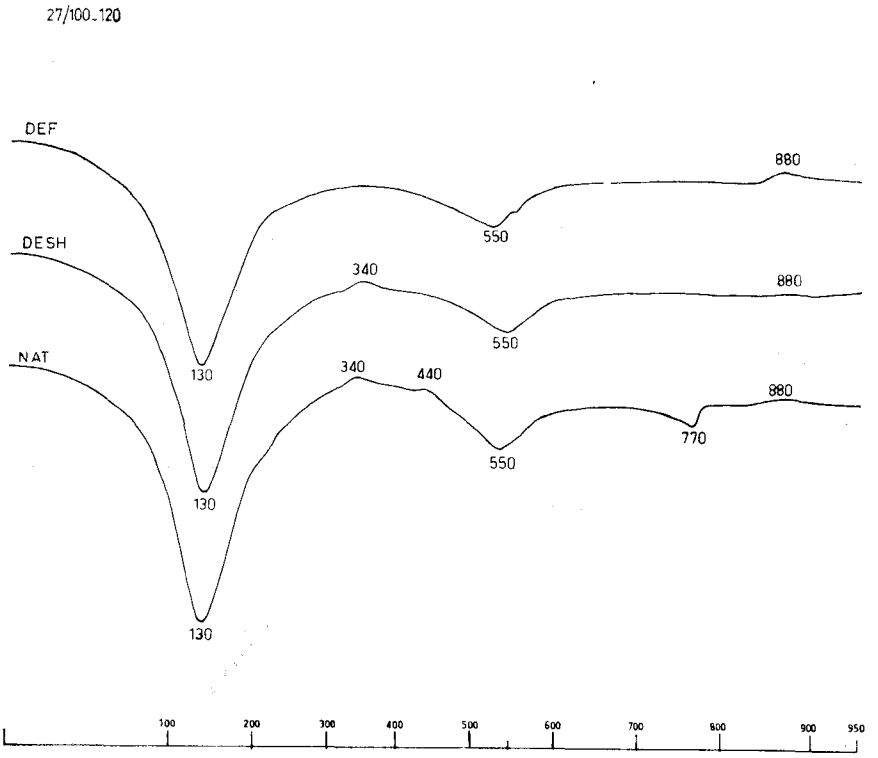
GRAPHIQUE V-b



rieur du tirs gris. Parallèlement, les deux pics exothermiques (340 et 440°C) observés sur les courbes de l'A.T.D. disparaissent complètement. La matière organique serait donc facilement éliminée. Elle serait jeune et peu liée à l'argile dont le taux est faible dans ces profils. Dans ces sols, la matière organique jouerait donc un rôle positif.

Dans les tirs de merja, récemment assainis, une nette diminution de la C.E.B. se produit également sous l'effet du traitement à l'eau oxygénée. Les courbes d'analyse thermique différentielle montrent une forte atténuation des réactions exothermiques (340 et 440°C) et seul le pic à 340°C subsiste encore. Le taux de matière organique totale est le plus élevé de cette série de sols de même que la teneur en

GRAPHIQUE V-c



argile qui jouerait probablement le rôle de colloïde protecteur. Il existe une relation entre la matière organique et la C.E.B.

Dans les tirs typiques, tirs gris et tirs noir, les variations de la C.E.B. sont faibles ou inexistantes après traitement à l'eau oxygénée. Les courbes d'A.T.D. nous montrent une atténuation des pics exothermiques. Le pic à 440°C disparaît tandis que celui de 340°C subsiste. Dans les tirs typiques, aussi bien que dans les tirs de merja, une partie de la matière organique subsiste donc après l'attaque à l'eau oxygénée. Elle serait sans doute fortement liée à l'argile dont la teneur est élevée. La matière organique n'influencerait apparemment pas les valeurs de la C.E.B. dans ces sols.

Dans le tirs brun, tirs le plus évolué où le taux de matière organique est faible, on observe par contre, une légère augmentation de la C.E.B. après attaque à l'eau oxygénée. Les pics exothermiques à 340 et 440°C disparaissent complètement. La présence de la matière organique, dans ce cas, inhiberait la C.E.B. Son rôle serait donc négatif.

On peut donc conclure que l'influence de la matière organique sur les valeurs de la C.E.B. serait variable et dépendrait du stade d'évolution de ces sols.

B. Influence de l'oxyde de fer

Dans les sols jeunes d'apport alluvial, dans les tirs gris et dans les tirs de merja, on n'observe pas de changement important des valeurs de la C.E.B. après déferrification ; cependant les courbes d'A.T.D. des échantillons traités montrent une forte réaction exothermique à 300°C. Le résidu du chauffage devient rouge. On peut supposer que le fer se trouve à l'intérieur des micelles argileuses et ne joue pas un rôle important dans les processus d'échange des bases.

Dans le tirs noir, on observe une diminution plus importante des valeurs de la C.E.B. après déferrification et le pic exothermique à 300°C apparaît plus atténué. Le résidu du chauffage à l'A.T.D. est rose ; on peut supposer que le fer se trouverait à l'intérieur et à l'extérieur des micelles argileuses et son rôle deviendrait plus important dans le processus d'échange de bases.

Dans le tirs brun, la diminution des valeurs de la C.E.B. est importante dans tout le profil après déferrification et les courbes d'A.T.D. ne montrent plus de réaction exothermique à 300°C. Le

résidu du chauffage à l'A.T.D. est blanc. Le fer se trouverait à l'extérieur des micelles argileuses et jouerait un rôle important dans les processus d'échange de bases.

Il résulte de ces observations que la C.E.B. diminuerait du sol jeune au sol plus ancien après déferrification.

La teneur en fer total ne varie pas beaucoup sauf dans les sols jeunes qui sont moins riches en cet élément. Le taux de fer libre, par rapport à la moyenne, est faible dans les sols jeunes et plus élevé dans le tirs brun que dans le tirs noir.

En conclusion, dans les sols de la plaine du Gharb, l'oxyde de fer ne bloquerait pas les sites d'échanges mais sa présence, au contraire, contribuerait à l'accroissement de la C.E.B. en particulier dans le cas du tirs brun.

VI. Conclusion générale

Cette étude nous montre que les divers composants du sol associés à l'argile jouent un rôle certain sur les valeurs de la capacité d'échange de bases mais différent suivant le type de sol.

Dans les sols jeunes d'apport alluvial considérés comme Dess et dans le tirs de merja récemment assaini, la capacité d'échange diminue après déshumification et le rôle de la matière organique serait important ; par contre, la capacité d'échange de bases ne varie pas après déferrification et le rôle du fer serait négligeable.

Dans les sols considérés comme tirs typiques, tirs gris et tirs noir, la capacité d'échange ne varie pas beaucoup après traitement et le rôle des composants serait faible.

Dans les sols plus évolués considérés comme tirs brun ou sol châtain isohumique vertique appartenant à une formation plus ancienne, la capacité d'échange de bases augmente légèrement après déshumification et diminue fortement après déferrification contrairement aux sols jeunes.

Cette étude paraît nous montrer que les caractères des sols sont en relation avec leur évolution, en allant des sols jeunes (Dess) aux sols anciens (Tirs brun) en passant par les tirs typiques (Tirs gris et noir). Le profil du sol châtain tirsifié semble subir un changement radical de pédogenèse.

Ces observations réjoignent celles de M. OUAZZANI (8) sur l'évolution de l'état de polymérisation de la matière organique et de M. BRYSSINE (3, 4, 5) sur l'évolution des caractères des tirs de la plaine du Gharb.

Il résulte aussi de ce travail que l'application de l'analyse thermique différentielle permet d'entrevoir de nombreuses possibilités, en particulier dans le cas des recherches physico-chimiques sur la pédogenèse.

ملخص

فى هذا التقرير يدرس الباحث دور مختلف مكونات الارض حسب قيمة قدرة التبادل الاساسى لاراضى سهل الغرب .

وللوقوف على تأثير هذه المكونات لقد قارن الباحث قدرة التبادل الاساسى للاراضى التى بقيت على حالتها الطبيعية مع نماذج من الارض قد حذفت منها مختلف المكونات .

ان نتائج تقدير قدرة التبادل قد اجرى عليها بحث بالتحليل الحرارى المقارن والاشعة س .

RÉSUMÉ

Dans cette note l'auteur étudie le rôle de divers constituants du sol sur les valeurs de la capacité d'échange de bases des sols de la plaine du Gharb.

Pour se rendre compte de leur influence il a comparé la capacité d'échange de bases des sols naturels à celles des échantillons dans lesquels les divers constituants ont été éliminés.

Les résultats des mesures de la capacité d'échange ont été contrôlés par l'analyse thermique différentielle et les rayons X.

RESUMEN

En este trabajo el autor estudia el papel de diversos constituyentes del suelo, sobre los valores de la capacidad de cambio de bases de los suelos del llano del Gharb.

Para darse cuenta de su influencia, él ha comparado la capacidad de cambio de bases de los suelos naturales a aquellas de las muestras en las cuales los diversos constituyentes han sido eliminados.

Los resultados de las medidas de la capacidad de cambio han sido controlados por el análisis térmico diferencial y los rayos X.

SUMMARY

In the Gharb valley soils, the writer studied the effect of various soil elements on the Base Exchange Capacity values. To realize such influence he compared the Base Exchange Capacity of natural soils to those samples in which various elements had been removed.

The Base Exchange Capacity measurements data have been checked by thermal differential analysis and X rays.

BIBLIOGRAPHIE

AIGUILERA, N.H., & M.L. JACKSON. — 1953. Iron oxide removal from soils and clays. — S.S.S.A.P., Vol. 17, N° **4**, pp. 359.

BLACK, C.A., & ALII. — 1965. Pretreatement for mineralogical analysis. — Methods of soil analysis. Agronomy, N° **9**, Part 1, pp. 568-577.

BILLAUX, P., & G. BRYSSINE. — 1967. Les sols du Maroc, III. Les facteurs de la pédogenèse. — Les Cahiers de la Recherche Agronomique, **24**, pp. 77-101, Rabat.

BRYSSINE, G. — 1965. Les propriétés physiques des tirs du Gharb. — Les Cahiers de la Recherche Agronomique, **20**, pp. 87-279, Rabat.

— 1967. Les profils de sols présentés dans la plaine du Gharb. — Les Cahiers de la Recherche Agronomique, **25**, pp. 227-327, Rabat.

LUCAS, J., & N. TRAUTH. — 1965. Etude du comportement des montmorillonites à haute température. — Bull. Serv.. Carte géol. Als. Lorr., **18**, 4, pp. 217-242.

MACKENSIE, R.C. — 1967. The Differential Thermal Analysis Investigation of Clays. — Mineralogical Society, London.

OUEZZANI, H. — 1967. Contribution à l'étude de la matière organique des sols vertiques et autres dans la plaine du Gharb. — Thèse, Toulouse, Octobre 1967.

PAQUET, H. — 1967. Les motmorillonites des vertisols. Altération alcaline en milieu tropical. — Bull. Serv. Carte géol. Als. Lorr., **20**, pp. 293-306.

SCHOEN, U. — Contribution à la connaissance des minéraux argileux dans les sols marocains. Thèse, Göttingen, Faculté des Sciences Agronomiques. — Les Cahiers de la Recherche Agronomique, **26**, Rabat.

SCHOEN, U., & L. ORTELLI. — 1964. Remarques au sujet de la détermination de la composition minéralogique des argiles. — Al Awamia, **10**, pp. 97-113, Rabat.

SCHOEN, U., & C. HESS. — 1964. Tirsification et classification des vertisols. — Al Awamia, **13**, pp. 41-92, Rabat.