

Application d'une analyse multivariante à quelques problèmes de pédogenèse en Tunisie

Jean-Paul COINTEPAS

*Pédologue de l'ORSTOM
BP 893 Bangui, RCA*

*Étude réalisée dans le cadre de la Convention du 11 décembre 1971 établie entre l'ORSTOM
et le Ministère de l'Agriculture de la République Tunisienne.*

RÉSUMÉ

Une série de méthodes statistiques (corrélation de Pearson, corrélation de rangs de Spearman, distances de rangs et regroupements en constellations) a été appliquée à des analyses de sols de Tunisie.

Les calculs effectués à l'aide d'un petit nombre de variables (6 à 9) mettent en évidence :

— une certaine influence du climat sur les caractéristiques des horizons humifères de surface, influence dont l'effet est fortement perturbé, semble-t-il, par la mise en culture ;

— une distinction entre les horizons B des différents types de sols étudiés qui coïncide avec la classification française des sols, résultat qui peut déboucher sur une codification des horizons.

En multipliant le nombre des données analytiques et en introduisant des observations de terrain sous forme de données qualitatives l'analyse multivariante est susceptible de constituer un outil précieux tant en cartographie qu'en pédogenèse.

ABSTRACT

Different statistical tests (correlation test of Pearson, rank correlation test of Spearman), a distribution-free measure of rank distances and repeated clustering have been applied to soil analysis from Tunisia.

Calculations made by means of 6 to 9 variables show :

— some influence of the climate conditions on the humic horizons which is however probably strongly disturbed by cropping ;

— a difference between B horizons of the different types of soils which coincides with the french classification. This result can be used for the codification of the horizons.

After increasing the number of analytical data and introducing field data as ordinal variables, these statistical tests are a valuable implement for cartography as well as for pedogenetical studies.

PLAN

Introduction

1. Méthodologie

1.1. Choix des données

1.2. Méthodes statistiques employées

2. Résultats

2.1. Etude des horizons de surface

2.1.1. Choix et sélection des variables

2.1.2. Corrélation entre les variables

2.1.3. Influence du climat sur les horizons de surface

2.1.4. Influence du type de sol sur les horizons de surface

- 2.2. Essai de caractérisation des horizons
 - 2.2.1. Choix des données
 - 2.2.2. Constellations des horizons
 - 2.2.3. Constellations des relations entre horizons voisins d'un même sol
 - 2.2.4. Corrélations
 - 2.2.5. Conclusions
- 2.3. Comparaison entre sols rouges méditerranéens et sols lithochromes
 - 2.3.1. Position du problème
 - 2.3.2. Modalités des calculs
 - 2.3.3. Interprétation des résultats

3. Conclusions

L'inventaire des sols d'une vaste région débute par la définition d'un certain nombre d'unités caractérisées par un profil-type qu'on rattache provisoirement à une classification locale ou universelle. La cartographie de ces unités permet d'en étudier la fréquence et la disposition dans le paysage. Le volume des observations allant rapidement croissant, il devient à la longue très difficile de manipuler toutes les données. Par ailleurs un certain nombre de problèmes se posent : validité du choix des profils-types, homogénéité des données à l'intérieur d'une même unité, rattachement de certains profils intergrades à telle ou telle unité, etc. Les tests classiques de corrélation ne portent chacun que sur deux variables, sous peine de devenir extrêmement longs. Or, pour être valable, la distinction entre les unités cartographiées doit porter sur un nombre élevé de variables et les interactions possibles entre ces variables. Le recours à une mesure multivariable de distanciation des unités constitue une approche de ce type.

En Tunisie, où la cartographie pédologique couvre près de 5 millions d'hectares, on a précisément atteint le stade où il devient nécessaire de vérifier les hypothèses de départ quant à la classification des unités cartographiques. Nous inspirant de travaux réalisés en France (GIRARD, 1969), nous avons essayé d'appliquer aux sols de Tunisie les méthodes statistiques mises au point par la Banque de Données Pédologiques de l'ORSTOM (1965, 1966, 1968, 1969, 1972, 1973).

1. MÉTHODOLOGIE

1.1. Choix des données

À la suite de nombreuses prospections, nous disposons de descriptions et de données analytiques assez

complètes portant sur 340 profils représentatifs du Nord et du Centre de la Tunisie. Une grande partie de ce travail dû à L. GUYOT et surtout à A. MORI avait été réalisé en 1965 dans le cadre d'une étude phyto-écologique de la Tunisie septentrionale entreprise par une mission du Centre d'Etudes Phytosociologiques et Ecologiques du CNRS (CEPE) de Montpellier. Un certain nombre de résultats provenant d'un inventaire des sols rouges méditerranéens tunisiens est venu compléter le fichier. Les données de laboratoire portaient sur :

- la granulométrie,
- le calcaire total,
- le pH,
- la matière organique et la stabilité structurale (pour les horizons de surface),
- la capacité d'échange et les bases échangeables, auxquels s'ajoutaient pour les sols rouges des analyses de fer libre et total. Les résultats d'analyse ont été reportés sur les bordereaux prévus à cet effet. Aux données analytiques de chaque horizon on a associé un numéro de code identifiant le type de sol dans la classification française (1965, 1966), l'horizon et le climat de la région.

La nomenclature des horizons reprend les symboles A, B, C tels qu'ils ont été définis par la Commission de Pédologie et de Cartographie des Sols (1967). Nous indiquons en annexe la définition que nous avons donnée aux différents symboles A, B, C pour chacune des classes étudiées. Nous n'avons pas cru devoir distinguer par un code différent un horizon B textural d'un (B) structural. Par ailleurs les horizons d'accumulation calcaire ont été désignés par la lettre C comme le prévoit la classification américaine. Il s'agit là pour nous d'un choix conventionnel qui ne préjuge pas du mode de formation de ces accumulations. La mise en application du code des horizons n'a pas soulevé de difficultés majeures sauf dans le cas des sols halomorphes. L'halomorphie en effet n'entraîne pas toujours l'apparition de caractères décelables autrement que par l'analyse, et le développement maximal de ce phénomène peut affecter aussi bien l'horizon de surface que les horizons sous-jacents. C'est donc l'hydromorphie, beaucoup plus que la salure, qui nous a guidé dans l'application de notre code aux quelques profils halomorphes dont nous disposons.

Le facteur climat a été introduit dans l'interprétation sous une forme synthétique. Nous avons retenu la

formule d'Emberger (BORTOLI, 1969) :

$$Q = \frac{2000 P}{M^2 - m^2}$$

dans laquelle :

P = Pluviosité moyenne annuelle

M = Moyenne des maximums du mois le plus chaud

m = Moyenne des minimums du mois le plus froid.

Cette formule qui s'appuie sur de nombreuses études phytocologiques et climatologiques amène à distinguer en Tunisie septentrionale et centrale cinq étages bioclimatiques :

- climat méditerranéen humide inférieur $Q > 90$
- — — subhumide $70 < Q < 90$
- — — semi-aride supérieur $40 < Q < 90$
- — — semi-aride inférieur $30 < Q < 40$
- — — aride supérieur $20 < Q < 30$

Chacun de ces étages comporte un certain nombre de variantes bioclimatiques :

- hiver chaud $m > 7^\circ$
- hiver doux $7^\circ > m > 4,5^\circ$
- hiver tempéré $4,5^\circ > m > 3^\circ$
- hivers frais $m > 3^\circ$.

A partir de cette classification nous avons élaboré une codification très simple. La Tunisie étant répertoriée sous le n° 4 dans le fichier, les étages ont été numérotés de 0.1 à 0.5 du plus humide au plus sec et les variantes de 0.01 à 0.04 du plus chaud au plus frais. Par exemple le climat subhumide à hiver doux de Tunisie a été codé 4.22.

L'ensemble des données analytiques, ainsi que celles de classification, de nomenclature des horizons, et de climat ont été enregistrées sur bande magnétique via des cartes perforées.

1.2. Les méthodes statistiques employées

1.2.1. CORRÉLATIONS

Un test de corrélation entre variables utilisant les rangs a été adopté. La matrice des données x_{hi} est remplacée par une matrice de rangs r_{hi} où le

rangement est fait colonne par colonne, c'est-à-dire indépendamment pour chaque variable. Les données qui manquent sont codées -1 . On a besoin des coefficients de pondération I_i et I_j pour les variables i et j tenant compte du nombre de données manquantes, du nombre e_i (respectivement e_j) d'ensembles de rangs identiques et de leur taille t_{qi} (respectivement t_{qj}) :

$$I_i = \frac{m^3_{ij} - m_{ij}}{12} - \sum_{q=1}^{e_i} \frac{t^3_{qi} - t_{qi}}{12}$$

$$I_j = \frac{m^3_{ij} - m_{ij}}{12} - \sum_{q=1}^{e_j} \frac{t^3_{qj} - t_{qj}}{12}$$

m_{ij} est l'effectif de l'échantillon où les variables i et j apparaissent à la fois.

Le coefficient de corrélation :

$$R_{ij} = [I_i + I_j - \sum_{h=1}^{m_{ij}} (r_{hi} - r_{hj})^2] / 2 \sqrt{I_i I_j}$$

varie entre -1 et $+1$.

Des valeurs tabulaires pour le test de corrélation au risque 0,01 et 0,05 pour des échantillons d'effectif 6 à 127 sont utilisées.

1.2.2. DISTANCES

Une mesure de distance entre échantillons indépendante de la fonction de répartition est utilisée. On suit la même procédure de rangement que pour les corrélations. Le coefficient de pondération I_i prend en compte le nombre de données manquantes m_i (m - données manquantes de la variable i), e_i et t_{qi} identiques à ceux intervenant dans le calcul des corrélations. I_i est égal à 0 et la variable i est alors abandonnée quand toutes les données de cette variable sont égales. L'index de distance entre échantillons h et k varie entre 0 et 2 et est calculé comme suit :

$$D_{hk} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^v \frac{(r_{hi} - r_{ki})^2}{I_i}$$

Si pour un i donné un des rangs r_{hi} ou r_{ki} manque (donnée manquante), la variable i est négligée pour la distance en question.

Les $\binom{m}{2}$ distances sont calculées par cette méthode.

1.2.3. CONSTELLATIONS

Un processus itératif est utilisé.

A la première étape $\left(\frac{m}{2}\right)$ distances sont calculées à partir de la matrice des données brutes (m, v) par la méthode précédente. Les deux échantillons séparés par la distance la plus courte constituent l'ébauche de la première constellation. On fait la moyenne des données des deux échantillons ce qui donne une nouvelle matrice $(m-1, v)$.

A la k -ième étape on calcule $\left(\frac{m-k+1}{2}\right)$ distances.

La distance la plus courte commande le regroupement soit :

- (a) de deux échantillons isolés p et q
- (b) d'un échantillon isolé p et d'une constellation n
- (c) de deux constellations n et m .

Les constellations obtenues successivement sont numérotées 1, 2, 3, ... 9, A, B, ... Z. Dans le cas (a), la nouvelle constellation ébauchée prend un numéro d'ordre n non encore utilisé lors des étapes précédentes. Sur la ligne horizontale du numéro d'étape k , à la verticale des numéros d'échantillon p et q apparaît n . Dans le cas (b) l'échantillon p est joint à la constellation n existante. Sur la ligne d'étape k , dans la colonne p , apparaît n . Dans le cas (c) les deux constellations se joignent, n'en formant plus qu'une de numéro inf (n, m) . Sur la ligne k , dans les colonnes des échantillons constituant sup (n, m) , apparaît le numéro inf (n, m) .

La distance minimale calculée à chaque pas est imprimée à 10^{-4} près.

2. RÉSULTATS

2.1. Etude des horizons de surface

2.1.1. CHOIX ET SÉLECTION DES VARIABLES

Nous nous proposons d'étudier l'influence du climat sur la matière organique du sol et les conséquences pouvant en résulter sur les caractéristiques physiques des horizons de surface. Parmi les données analytiques dont nous disposons nous avons retenu six variables :

- argile (ARG) en % de terre sèche
- limon fin (LMF) — — —
- carbone (C) — — —
- azote (N) — — —
- indice d'instabilité structurale (IS)
- perméabilité en laboratoire (PMB) en cm/h.

L'introduction des deux premières variables (argile et limon) nous a paru indispensable, des études menées ailleurs ayant souligné la corrélation positive entre argile et carbone (COMBEAU, 1960).

Le tableau 1 présente les valeurs moyennes obtenues pour chacune des variables en % de terre sèche sous différents climats.

TABLEAU 1

Moyennes des données analytiques sur les horizons de surface de quelques sols de Tunisie

Climat	Effectif	ARG (%)	LMF (%)	C (%)	N (%)	IS	PMB (cm/h)
4.13 Climat humide à hiver tempéré	11	65,9	18,1	1,42	0,146	1,40	4,02
4.22 — subhumide à hiver doux	112	46,3	20,3	1,21	0,131	1,55	6,16
4.23 — — à hiver tempéré	10	35,8	22,0	0,94	0,115	2,60	2,80
4.32 — semi-aride supérieur à hiver doux	40	26,9	13,7	0,98	0,106	3,31	4,08
4.33 — — — à hiver tempéré	27	38,7	15,2	0,98	0,108	2,12	8,72
4.34 — — — à hiver frais	42	40,4	25,4	1,45	0,162	1,84	5,02
4.44 — — — inférieur à hiver frais	20	34,0	25,5	0,78	0,097	2,57	4,06
4.54 — aride à hiver frais	14	37,9	31,6	0,91	0,086	3,20	3,01

2.1.2. CORRÉLATION ENTRE LES VARIABLES

A partir de ce premier tri, différents tests ont été appliqués. On a essayé en premier lieu de déterminer

le lien pouvant exister entre les différentes variables choisies. On a donc fait pour chaque climat un test de corrélation de rangs entre les six variables prises deux à deux. Le tableau 2 donne le résultat des tests.

TABLEAU 2
Résultats du test de corrélation entre les variables ARG, LMF, C, N, IS, PMB

Climat	4.22	4.23	4.32	4.33	4.34	4.44	4.54
Effectif	112	10	40	69		20	14
<i>Test :</i>							
ARG × C	0	0	0	0		0	0
ARG × N	- -	0	0	0		0	0
ARG × IS	+ +	0	0	0		0	0
ARG × PMB	0	0	0	0		0	0
LMF × C	0	-	+ +	+ +		0	0
LMF × N	0	0	+ +	+ +		0	0
LMF × IS	+ +	0	0	0		0	0
LMF × PMB	0	0	-	- -		0	-
C × N	+ +	+ +	+ +	+ +		+ +	+ +
C × IS	0	0	0	-		0	0
C × PMB	+ +	+	0	0		0	0
N × IS	0	0	0	- -		0	0
N × PMB	0	+	0	0		0	0
IS × PMB	- -	0	-	- -		0	-

(0 non significatif ; + significatif à $P = 0,05$; + + significatif à $P = 0,01$; - corrélation négative).

Il apparaît à la lecture du tableau 2 que la seule corrélation hautement significative dans tous les cas est la corrélation C × N. On note une corrélation négative presque générale entre IS et PMB. Toutes les autres corrélations telles que argile ou limon × matière organique, ou instabilité structurale ne sont que très épisodiquement significatives. Elles ne semblent significatives que pour les deux ou trois gros échantillons (effectifs supérieurs à 40). L'examen des coefficients calculés en vue des tests de corrélation n'apporte pas plus de renseignements (cf. annexe 2). Il semble, par conséquent, qu'à l'exception du carbone et de l'azote, il y a peu de relations entre nos six variables.

2.1.3. INFLUENCE DU CLIMAT SUR LES HORIZONS DE SURFACE

Nous avons ensuite effectué le calcul des distances à partir des six variables précédentes prises simultanément, et des étendues. Il nous semble en effet que si ces six variables ne sont pas en corrélation entre elles, elles constituent des données essentielles, pouvant

caractériser l'horizon de surface du sol. Nous nous sommes ensuite servi des distances pour un regroupement en constellations.

Le résultat de ce travail figure à l'annexe 3. On voit apparaître deux constellations. La première est composée des sols sous climat subhumide à hiver doux et semi-aride supérieur à hiver frais, auxquels s'ajoutent, à la troisième étape, les sols sous climat humide à hiver tempéré puis, à la 4^e étape, les sols sous climat semi-aride supérieur à hiver tempéré. La seconde constellation regroupe climat semi-aride inférieur et climat aride à hiver frais, puis, aux étapes 5 et 6, les sols sous climat subhumide à hiver tempéré et semi-aride supérieur à hiver doux. Seuls les climats extrêmes s'associent donc nettement en constellations. Par contre il est plus difficile d'expliquer la place des climats subhumide à hiver tempéré et semi-aride à hiver doux dans la constellation 2. Il n'a pas été possible d'appliquer cette méthode aux groupes de la classification des sols, les effectifs de certains groupes n'étant pas toujours représentés dans chaque catégorie de climat. Il serait possible cependant d'analyser cette influence du type de sol en reprenant les calculs

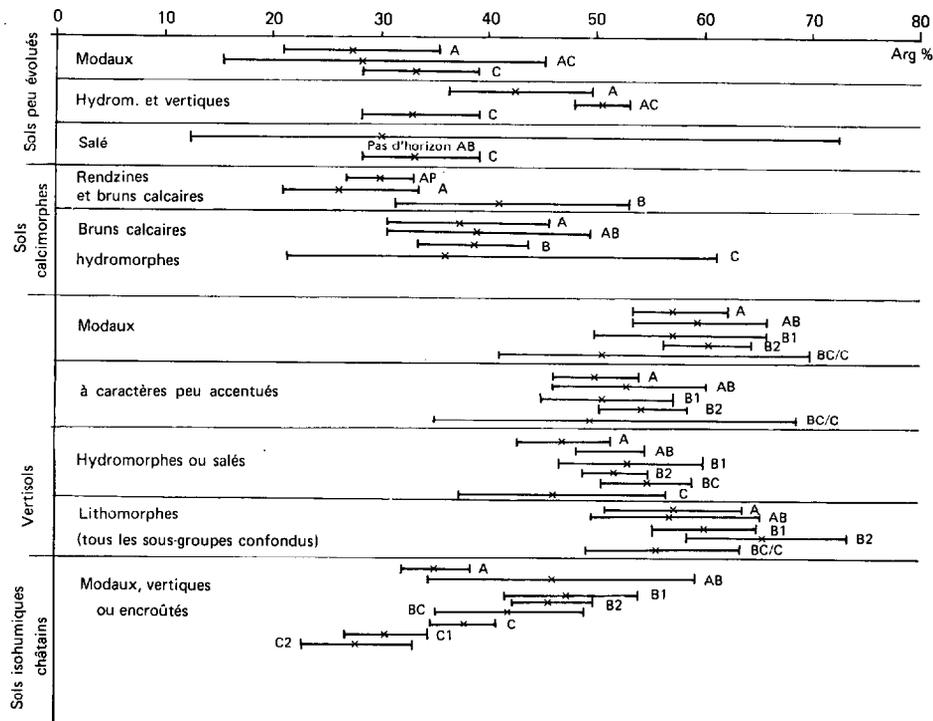


FIG. 1. — Teneur en argile (ARG) dans les différents types de sol : moyennes et intervalles de confiance.

avec les données analytiques des seuls vertisols. Ce groupe est en effet, comme on le verra plus loin, le plus homogène et, par ailleurs, il est bien représenté sous chaque climat.

2.1.4. INFLUENCE DU TYPE DU SOL

En présence d'un faible nombre d'échantillons dans chaque groupe ou sous-groupe de sol de la classification, nous avons essayé d'étudier de quelle manière se regroupaient les échantillons dans des constellations. La dimension des sorties d'ordinateur n'a pas permis la reproduction des résultats complets des calculs. Nous nous limiterons donc à quelques commentaires. A première vue, aucune constellation ne correspond de près ou de loin à la classification française des sols. Bien plus, il arrive assez fréquemment que deux échantillons d'un même profil (les horizons Ap et AB par exemple) appartiennent à deux constellations différentes, parfois même fort éloignées. Cependant, au cours des différentes étapes

d'adjonction de nouveaux horizons, on assiste à un regroupement en des constellations plus vastes. Or il est des cas où la fusion ne s'opère pas, ou très tardivement, et en étudiant l'origine des sols qui constituent ces groupes isolés il est possible de faire des observations utiles.

C'est ainsi que sous climat subhumide à hiver doux les 32 constellations initiales se réduisent à 8 au bout de 99 étapes. Les vertisols sont répartis dans toutes les constellations sauf une qui regroupe essentiellement des rendzines et des sols bruns calcaires, quelques sols isohumiques et un sol hydromorphe. Trois autres constellations ne renferment que des vertisols. Sous climat semi-aride supérieur à hiver frais les sols châtain-rouge et rouges steppisés de la plaine de l'Oued Kralled (Teboursouk) se regroupent en majorité dans une même constellation, distincte des autres sols châtaîns de la région. Les vertisols constituent une autre constellation. D'une manière générale les sols calcimorphes et les sols isohumiques bien loin de former des unités homogènes se répartissent dans des constellations éloignées.

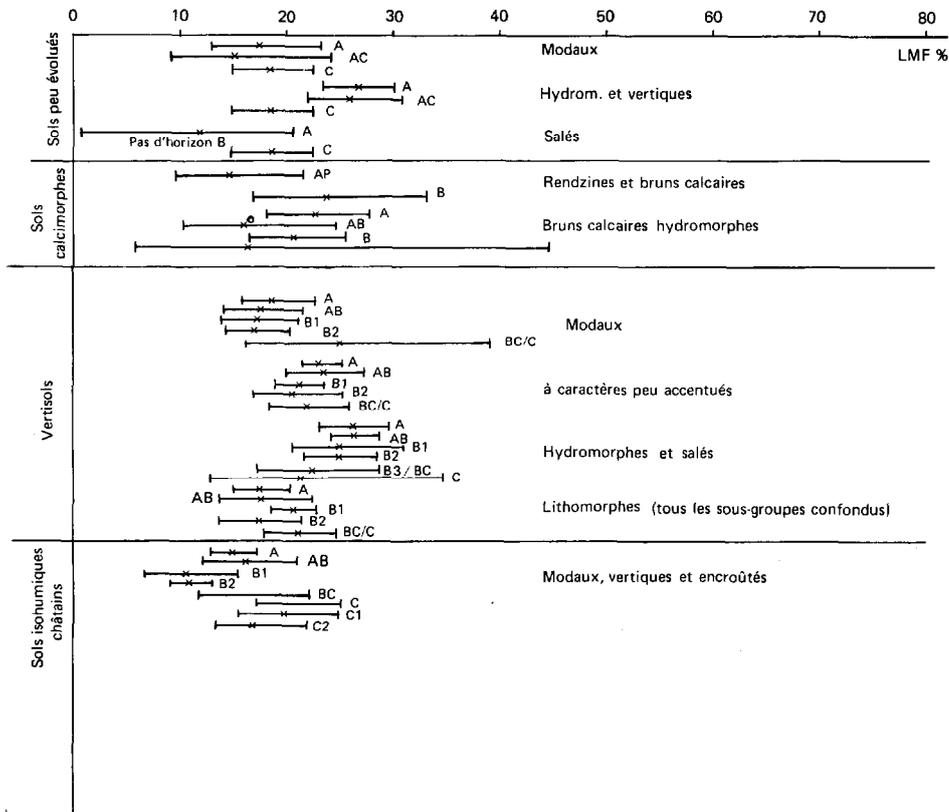


FIG. 2. — Teneur en limon fin (LMF) dans les horizons des différents types de sol : moyennes et intervalles de confiance.

La méthode ne permet pas de trancher en ce qui concerne la place des sols bruns calcaires hydromorphes dans la classification. Ce type de sol intergrade qu'on hésite sur le terrain à classer dans les vertisols, les sols isohumiques ou les sols calcimorphes ne présente pas d'affinité, au moins en ce qui concerne l'horizon de surface, avec une classe plutôt qu'une autre. Les sols hydromorphes entrent plus facilement dans les constellations où dominent les sols calcimorphes que dans celles des vertisols. Il faut donc admettre que de tels sols, qui sont pour la plupart fossiles, subissent une évolution ultérieure de type calcimorphe plutôt que vertique.

Ces résultats nous conduisent donc à formuler deux explications qui ne s'excluent pas nécessairement. D'une part, les six variables choisies ne permettent pas de caractériser les horizons de surface des sols de Tunisie et d'autres caractéristiques devront être prises en compte. D'autre part, nous avons essentiellement

travaillé sur des horizons cultivés. Or, le mode d'exploitation agricole variant considérablement d'un profil à l'autre, et d'une région climatique à une autre, son influence sur l'évolution du sol peut introduire des différences beaucoup plus importantes que celles dues au type génétique de sol, effaçant ainsi les manifestations de la pédogenèse propres à chaque catégorie de sol. Nous verrons au cours de la troisième partie de cet exposé que cette seconde explication semble tout à fait plausible.

2.2. Essais de caractérisation des horizons

2.2.1. CHOIX DES DONNÉES

Dans le travail que nous allons présenter maintenant, nous avons essayé de caractériser les horizons des différents types de sol de Tunisie pour lesquels nous

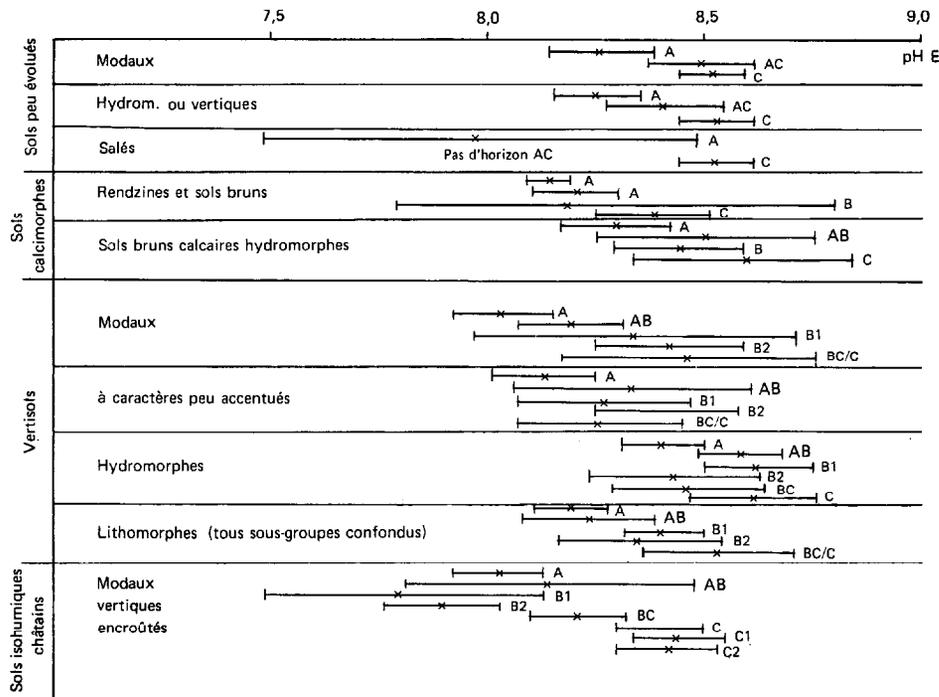


FIG. 3. — pH eau (PHE) dans les horizons des différents types de sol : moyennes et intervalles de confiance.

dispositions de résultats analytiques. Notre intention était, en premier lieu, de vérifier que les horizons dont nous avons exposé les principes de codification dans la première partie de ce rapport étaient significativement différents et, dans un second stade, d'aboutir à une nomenclature de ces horizons.

Nous avons donc effectué une sélection des principaux types de sols disponibles en prenant pour variable le sous-groupe, ou le groupe (sols calcimorphes et sols isohumiques), ou même la sous-classe (vertisols lithomorphes), lorsque les effectifs des sous-groupes étaient insuffisants.

Parmi les résultats analytiques dont nous disposions, nous n'avons retenu que les 9 variables qui nous paraissaient influencer sur la pédogenèse :

- 1 — l'argile (ARG) en % de terre sèche
- 2 — le limon fin (LMF) — — —
- 3 — le pH-eau (PHE)
- 4 — le magnésium échangeable (MGE) en mé % de terre sèche
- 5 — le potassium échangeable (KE) — — —
- 6 — le sodium échangeable (NAE) — — —

- 7 — la capacité d'échange (T) — — —
- 8 — le carbone (C) en %
- 9 — l'azote (N) en %.

D'autres données n'ont pas été retenues :

— le calcaire total car, à notre avis, il reflète souvent davantage le matériau que le processus de pédogenèse,

— le calcium échangeable, parce qu'en sol calcaire cette donnée est surestimée dans des proportions très variables, les réactifs d'extraction des bases échangeables dissolvant également une partie du calcaire total,

— la conductivité et les sels solubles, pour lesquels nous ne disposions malheureusement pas de résultats pour l'ensemble des horizons,

— la stabilité structurale et la perméabilité pour les mêmes raisons que précédemment.

Le tableau 3 présente les moyennes observées pour les 9 variables dans 44 horizons. Dans les figures 1 à 3 on trouve les moyennes et les intervalles de confiance calculés pour 43 des 44 horizons. On note que ces intervalles sont assez étroits sauf en ce qui concerne,

TABLEAU 3

Moyennes des données analytiques horizon par horizon

	ARG (%)	LMF (%)	C (%)	N (%)	PHE	MGE (mé %)	KE (mé %)	NAE (mé %)	T (mé %)
Sol peu évolué modal :									
A	27,7	17,5	0,83	0,083	8,26	2,17	0,77	0,36	17,0
AC	28,4	15,0			8,49	2,87	0,44	0,51	17,0
Sol peu évolué vertique :									
A	42,4	26,7	0,80	0,108	8,25	3,11	0,86	0,66	27,5
AC	49,5	25,9			8,40	6,14	0,48	0,76	26,1
Sol peu évolué salé :									
A	30,3	11,9	0,86	0,086	7,96	1,41	0,69	0,68	18,7
AC	33,8	21,8			8,43	5,14	0,30	0,82	22,9
Sol peu évolué (tous les sous-groupes) :									
C	33,2	18,5			8,52	3,22	0,40	0,79	18,8
Sol calcimorphe: rendzine ou brun calcaire									
Ap	30,4	21,1	1,26	0,157	8,14	1,48	1,25	0,57	22,3
A	26,4	14,5	1,12	0,125	8,20	0,59	0,73	0,54	22,1
B	40,7	23,7			8,28	2,12	0,72	0,69	20,4
C					8,38	1,04	0,34	0,86	16,9
Sol calcimorphe : brun calcaire hydromorphe :									
A	37,5	22,5	1,07	0,122	8,29	1,83	1,03	0,58	26,8
AB	39,1	16,0			8,50	2,30	0,44	0,71	23,0
B	38,4	20,6			8,44	2,17	0,62	0,72	24,1
C	36,2	16,6			8,59	3,14	0,38	1,05	20,9
Sol isohumique (châtain ou brun) :									
A	35,4	15,2	1,01	0,106	8,03	2,52	1,05	0,54	24,4
AB	46,2	16,1	0,99	0,101	8,14	2,80	1,11	0,96	26,6
B ₁	47,6	10,4			7,80	3,64	0,82	0,43	28,1
B ₂	46,2	11,1			7,90	3,50	0,81	0,68	28,0
B ₃	41,8	16,4			8,21	2,90	0,59	0,48	20,2
C	38,1	21,0			8,40	3,23	0,51	0,79	19,5
C ₁	30,8	19,8			8,44	1,93	0,33	0,57	16,0
C ₂	28,0	17,0			8,42	2,93	0,34	0,63	16,7
Vertisol topomorphe modal :									
Ap	57,2	18,6	1,32	0,124	8,03	4,32	1,68	1,14	39,7
AB	59,7	17,5			8,19	5,21	1,07	1,47	39,6
B ₁	57,4	17,3			8,33	6,64	1,14	2,28	37,4
B ₂	60,4	17,1			8,42	8,10	0,96	3,28	38,5
B ₃ et BC	52,9	25,2			8,46	7,79	1,08	4,08	30,7
Vertisol peu accentué :									
Ap	50,0	23,5	1,08	0,120	8,13	4,49	1,06	0,67	29,3
AB	52,7	23,5	0,97	0,100	8,33	4,86	0,60	0,67	31,3
B ₁	50,6	21,2			8,27	5,28	0,65	1,01	31,5
B ₂	54,3	20,8			8,42	7,32	0,61	1,47	30,6
BC et C	49,3	22,0			8,26	5,50	0,50	1,08	28,8
Vertisol salé ou hydromorphe :									
Ap	47,1	26,3	1,05	0,098	8,40	5,67	1,29	0,98	28,6
AB	51,4	26,3			8,58	7,86	0,72	1,96	26,8
B ₁	53,0	25,2			8,62	10,68	0,86	3,94	28,2
B ₂	52,1	24,9			8,43	10,67	0,60	4,04	27,6
C	54,7	22,4			8,46	10,71	0,66	5,18	27,1
BC	46,2	21,2			8,61	9,39	0,66	4,73	24,3
Vertisol lithomorphe :									
A	57,2	17,6	1,129	0,118	8,19	3,38	1,56	0,91	35,1
AB	57,1	17,8	0,921	0,093	8,24	3,58	1,30	1,31	30,2
B ₁	60,2	20,6			8,41	5,63	1,04	1,72	30,9
B ₂	65,6	17,4			8,35	8,59	1,30	2,79	40,6
BC et C	55,9	21,2			8,53	6,54	0,75	3,40	27,4

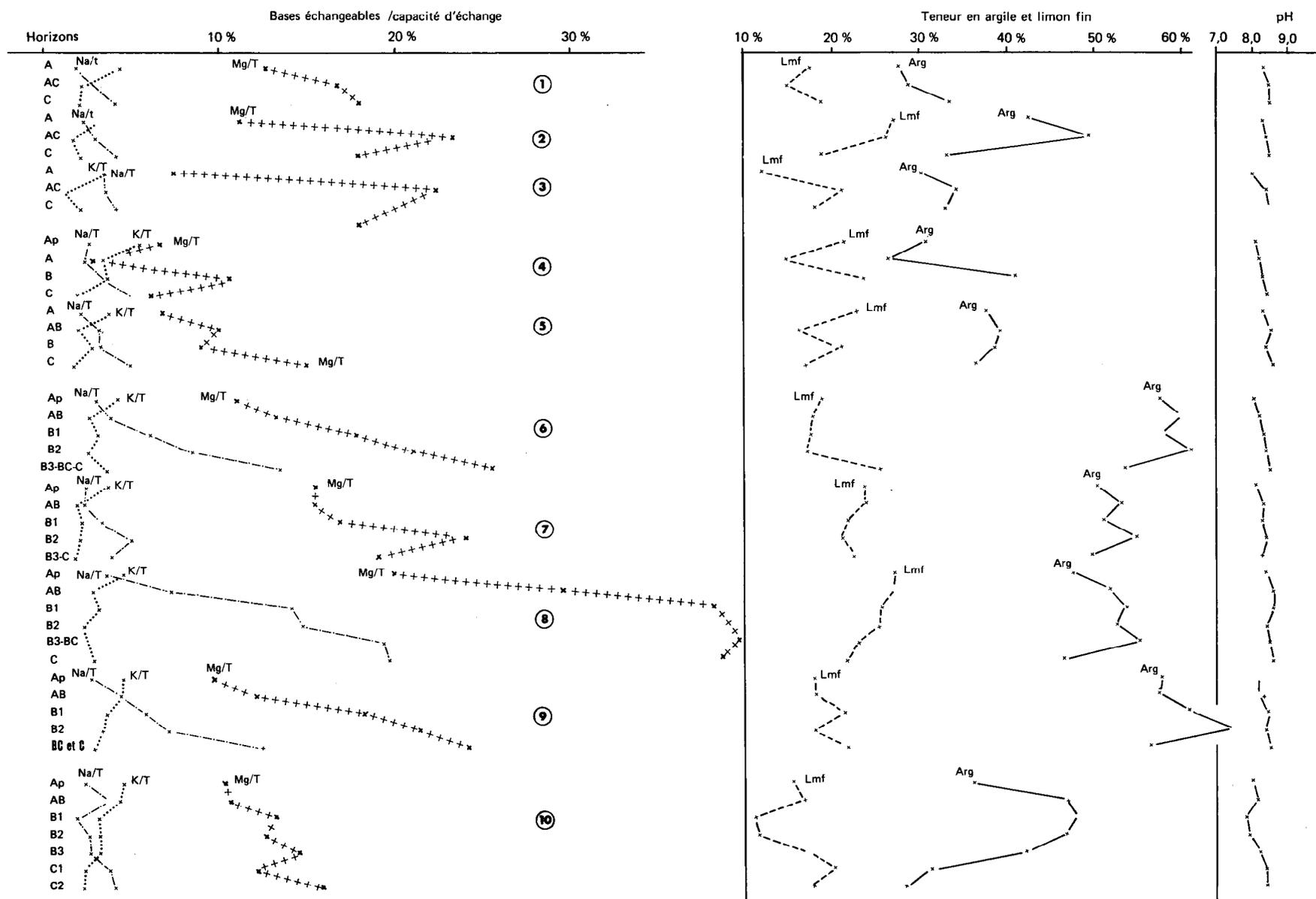


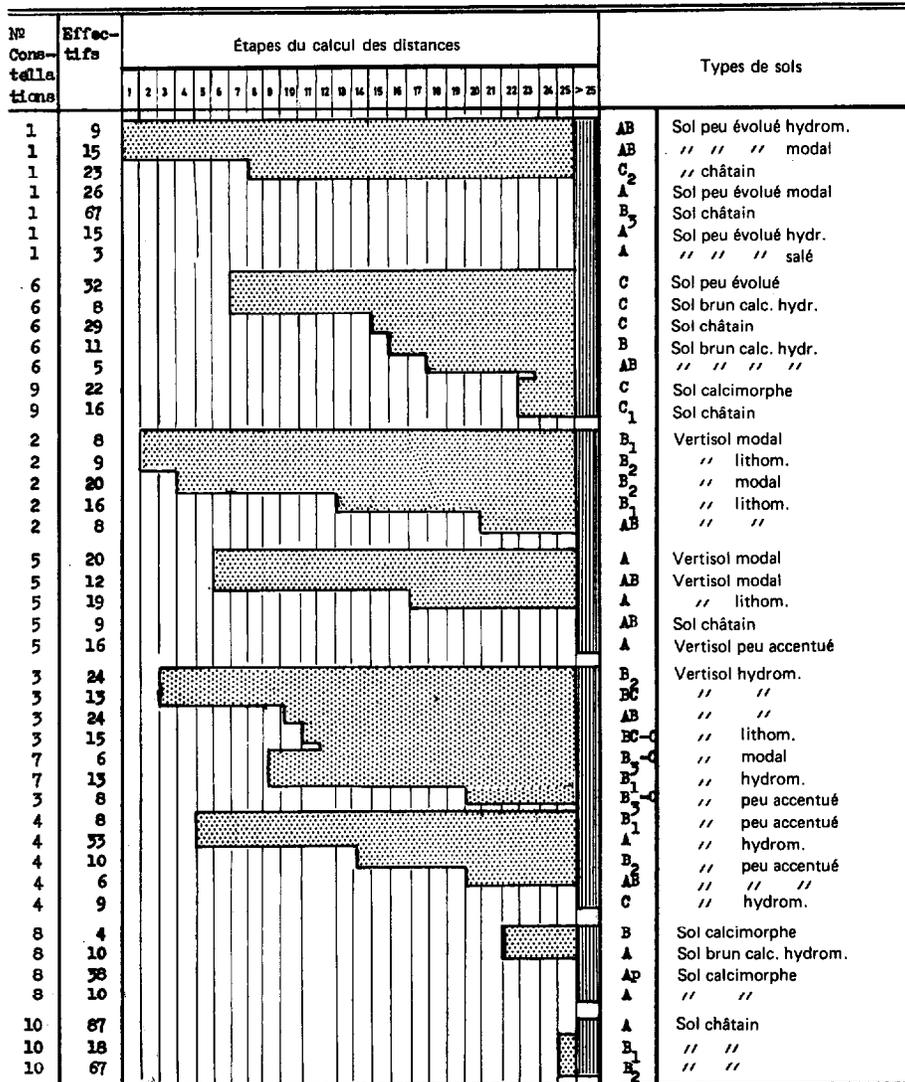
FIG. 4. — Variation des données analytiques en fonction du type de sol et de l'horizon : argile, limon fin, pH, Mg/T, K/T, Na/T.

d'une part, les horizons A ou AC des sols peu évolués modaux et, d'autre part, les horizons C des sols peu évolués. Ce résultat confirme l'hétérogénéité d'une classe de sols, ou d'horizons, où la pédogenèse n'a pas encore mis son empreinte. La figure 4 reproduit,

sous forme de graphique, les résultats du tableau 3 avec cependant une variante, en ce sens qu'on a remplacé les valeurs de Mg, K, Na et T par les rapports Mg/T, K/T et Na/T, dont l'interprétation est plus logique.

TABLEAU 4

Constellations formées par les horizons des différents types de sols à partir des 9 variables : argile, limon fin, pH, Mg, K et Na échangeables, Carbone et Azote (fichier du 29.09.72).



2.2.2. CONSTELLATION DES HORIZONS

Après cette première phase de sélection on a calculé pour les 9 variables réelles ou pour 8 variables

dont 3 dérivées les distances entre les 43 horizons. On trouvera en annexe une reproduction du diagramme des constellations (Annexe 4, fichier du 27-09-72). Nous donnons de ce diagramme une présentation plus

synthétique sous forme de tableau (Tableau 4). Nous y voyons apparaître six constellations importantes :

- une constellation groupant les sols peu évolués auxquels s'associent les horizons B₃ et C₂ des sols isohumiques châtains,
- une constellation associant les horizons C des sols calcimorphes isohumiques châtains et peu évolués auxquels s'ajoutent les horizons AB et B des sols bruns calcaires hydromorphes,
- quatre constellations où se retrouvent tous les

vertisols. Les vertisols topomorphes modaux et lithomorphes présentent pour les horizons B₁ et B₂ les distances les plus faibles, preuve d'une similitude des caractéristiques analytiques. Les vertisols salés ou hydromorphes voient tous leurs horizons groupés dans deux constellations voisines où l'on retrouve également les vertisols topomorphes à caractères peu accentués et les horizons B₃ et C des vertisols topomorphes modaux et lithomorphes.

Par ailleurs deux constellations très lâches groupent d'un côté les horizons des sols calcimorphes et l'horizon

TABLEAU 5

Constellations formées par les horizons des différents types de sols à partir des 8 variables : argile, limon fin, pH, Mg/T, K/T, Na/T, Carbone et Azote (fichier du 12.10.72).

N° Constellation	Effectifs	Étapes du calcul des distances																									Types de sols	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25		
1	8																										B ₁	Vertisol modal
1	9																										B ₂	// lithom.
1	16																										B ₁	// //
1	20																										E ₂	// modal
1	10																										E ₂	// peu accentué
2	24																										B ₃	Vertisol hydrom. ou salé
2	13																										BC	// //
2	15																										BC-C	// lithom. //
4	24																										AB	// hydrom. ou salé
4	13																										R ₁	// //
4	6																										B ₃ -C	// modal
2	9																										C	// hydrom. ou salé
3	18																										B ₁	Sol châtain
3	67																										E ₂	// //
5	32																										C	Sol peu évolué
5	23																										C ₂	Sol châtain
5	8																										C ₂	Sol brun calc. hydrom.
5	15																										AC	Sol peu évolué modal
5	22																										C	Sol calcimorphe
6	8																										B ₁	Vertisol peu accentué
6	8																										B ₁ -C	// //
6	9																										AC	Sol peu évolué hydrom.
7	15																										A	Sol peu évolué hydrom.
7	4																										B	Sol calcimorphe
7	10																										A	Sol brun calc. hydrom.
7	38																										AP	Sol calcimorphe
7	10																										A	
8	16																										C ₁	Sol châtain
8	11																										B	Sol brun calc. hydrom.
8	5																										AB	
9	9																										AB	Sol châtain
9	8																										AB	Vertisol lithom.
9	12																										AB	Vertisol modal
9	20																										A	// //
9	19																										A	// lithom.
10	26																										A	Sol peu évolué modal
10	87																										A	Sol châtain
10	23																										B ₃	Sol châtain
3	3																										A	Sol peu évolué salé
3	33																										A	Vertisol hydrom.
11	16																										A	Vertisol peu accentué
11	6																										AB	// //

zon A des sols bruns calcaires hydromorphes de l'autre les horizons A et B₁ B₂ des sols isohumiques châtaîns.

Une seconde série de calculs a alors été effectuée en utilisant comme variables, non plus les bases échangeables MGE, KE, NAE et la capacité d'échange T, mais les rapports MGE/T, KE/T et NAE/T.

Les résultats figurent à l'annexe 5 (fichier du 12-10-72) et sont groupés dans le tableau 5. L'examen des éléments constituant les constellations est particulièrement instructif :

(a) Les vertisols forment trois constellations. Il y a rapprochement très étroit entre les horizons B des vertisols topomorphes modaux ou peu accentués et des vertisols lithomorphes. Ce résultat confirme l'importance de ces horizons comme caractéristiques des vertisols.

Les vertisols salés ou hydromorphes ont tous leurs horizons inclus dans la même constellation qui contient en outre les horizons BC ou C des vertisols topomorphes modaux ou lithomorphes. Ce résultat était déjà acquis dans le précédent fichier. Par contre les vertisols topomorphes peu accentués forment une constellation particulière où ils s'associent à l'horizon AC des sols peu évolués vertiques ou hydromorphes. Ainsi se trouvent rapprochés deux types de sol à caractère intergrade où les phénomènes vertiques sont peu intenses.

(b) Les sols isohumiques châtaîns qui s'associent si difficilement dans le précédent fichier voient leurs horizons B₁ et B₂ se rapprocher considérablement.

(c) Les horizons C des sols calcimorphes, isohumiques et peu évolués présentent toujours une faible distance intra-constellation. Ce qui revient à dire que les horizons C de ces trois types de sols ne diffèrent que par l'accumulation calcaire et on serait donc fondé à considérer comme le font les pédologues américains de l'USDA cet horizon comme un horizon C.

(d) Les horizons A et AB d'un grand nombre de sols : vertisols, sols isohumiques ou sols peu évolués tendent à se regrouper mais présentent de fortes distances intra-extra-constellation ou intra-constellation. Ce résultat confirme ce que nous avons entrevu dans la première partie de ce rapport à savoir que l'évolution des horizons humifères des sols de Tunisie tend à se faire de manière uniforme, indépendamment du type de sol sous-jacent. Il y aurait lieu de faire une petite exception pour les sols calcimorphes (rendzines, sols bruns calcaires et bruns calcaires hydromorphes) dont les distances intra-constellation sont nettement plus faibles.

Si nous considérons maintenant la partie inférieure

des annexes 4 et 5, nous constatons qu'au fur et à mesure des étapes de regroupement on tend vers un petit nombre de constellations qui n'acceptent que tardivement de fusionner parce qu'elles ont la plus grande distance interconstellations. Il est intéressant de noter dans le fichier du 12-10-72 (Annexe 5) que les constellations se réduisent pour finir (étapes 39 et suivantes, codes 1) à 3 puis à 2 constellations.

La première de ces constellations regroupe tous les horizons B (B₁, B₂, B₃ ou BC) et les horizons C des vertisols. La deuxième (codes 3) regroupe pratiquement tous les horizons A, les horizons AB ou AC des sols peu évolués vertiques, des sols calcimorphes, des sols isohumiques et des vertisols lithomorphes et les horizons B des sols calcimorphes, des sols isohumiques et des vertisols topomorphes peu accentués. La troisième constellation (codes 5) enfin est formée de tous les horizons C de tous les types de sol à l'exception des vertisols. Il faut y ajouter les horizons AC des sols peu évolués modaux et les horizons B des sols bruns calcaires hydromorphes.

Ces résultats confirment le caractère particulier de la vertisolisation qui atteint son développement maximal dans les horizons B. De leur côté les sols peu évolués vertiques, les vertisols peu accentués, les sols calcimorphes et les sols isohumiques présentent une similitude d'évolution. Ce type de pédogenèse peut sans doute être considéré comme moins poussé que celui des vertisols. Un troisième type d'évolution est représenté par les horizons C de la plupart des sols et les horizons AC des sols peu évolués modaux, nettement moins évolués que les horizons AC des sols peu évolués vertiques. Le fait que les sols bruns calcaires hydromorphes s'apparentent à ce troisième groupe pose un problème car, sur le terrain, ces sols apparaissent comme au moins aussi évolués que les sols calcimorphes.

2.2.3. CONSTELLATIONS DES RELATIONS ENTRE HORIZONS VOISINS D'UN MÊME SOL

Pour compléter cette étude il est nécessaire de comparer l'intensité du phénomène évolutif traduit par les différentes variables. Dans ce but on a calculé le rapport entre chacune des variables d'un horizon et la variable correspondante de l'horizon sous-jacent :

$$\frac{\text{ARG (A)}}{\text{ARG (AB)}}, \frac{\text{PHE (A)}}{\text{PHE (AB)}}, \frac{\text{MGE/T (A)}}{\text{MGE/T (B)}}, \text{etc.}$$

et on a calculé les distances non-paramétriques entre les types de sol en utilisant l'ensemble des rapports.

Le résultat complet de ce travail figure au tableau 6. Mais avant de passer à l'interprétation de ce tableau, il est nécessaire de revenir à la figure 4 et d'apporter quelques commentaires. Les variations enregistrées pour chaque variable diffèrent suivant le type de sol, mais présentent des caractéristiques générales communes :

En ce qui concerne les bases échangeables, le rapport Na/T va généralement en augmentant de la surface vers la profondeur. Cette augmentation est plus forte dans les vertisols que dans les autres sols et atteint des proportions énormes en vertisol hydromorphe ou salé. Le rapport K/T est maximum en surface et décroît très vite à partir de l'horizon AB pour ne subir que de légères fluctuations en B et C. Le rapport Mg/T augmente avec la profondeur et passe par

un maximum dans les horizons B. Son évolution est particulièrement nette en sol peu évolué vertique, en vertisol et en sol isohumique où le magnésium échangeable MGE est très abondant.

— Argile et limon fluctuent légèrement avec un minimum dans les horizons AB ou B₁ et un maximum en B₂. Le « ventre » de la courbe présente la forme le plus typique en sol isohumique.

Le limon semble varier en sens inverse de l'argile sans que le phénomène soit net.

— Le pH tend à augmenter légèrement de la surface vers la profondeur. Il y a une légère diminution au niveau de l'horizon B₁ des sols isohumiques. Ce résultat mériterait confirmation sur un plus grand nombre d'analyses.

TABLEAU 6

Constellations formées par le rapport entre horizons voisins d'un même sol et déterminées à partir de 7 variables : argile, pH, Mg/T, K/T, Na/T, Carbone et Azote (fichier du 13.10.72).

N° Constellations	Étapes du calcul des distances																									Types de sols	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25-26		
1																										A/AC	Sol peu évolué modal
1																										A/AB	Sol brun calcaire hydrom.
4																										A/AB	Vertisol modal
4																										AB/B	// lithom.
4																										A/AC	Sol peu évolué hydrom.
2																										BC/C	Sol isohumique
2																										B ₁ /BC	Vertisol lithom.
2																										B ₂ /C	Sol brun calc. hydrom.
2																										A/AB	Vertisol salé
1																										A/AB	Vertisol peu accentué
3																										AB/B ₁	Vertisol hydrom. ou salé
3																										A/AB	// lithom.
3																										AB/B ₁	// modal
3																										B ₁ /B ₂	Sol châtain
3																										AB/B ₁	Vertisol peu accentué
3																										B ₁ /B ₂	// modal
5																										AC/C	Sol peu évolué modal
5																										B ₁ /B ₂	Vertisol lithom
5																										B ₁ /B ₂	// topom. modal
7																										B ₁ /BC	Vertisol hydrom. ou salé
7																										AB/B	Sol brun calcaire hydrom.
5																										C ₁ /C ₂	Sol châtain
8																										AB/B	Sol châtain
8																										B ₁ /B ₂	Vertisol hydrom. ou salé
8																										B ₂ /BC	// peu accentué
6																										AC/C	Sol peu évolué hydrom.
6																										BC/C	Vertisol hydrom. ou salé
6																										BC/C ₁	Sol châtain
6																										B ₂ /BC	// "
9																										A/AB	Sol châtain
9																										B ₁ /B ₂	Vertisol peu accentué
9																										A/B ₂	Sol calcimorphe
10																										AD/A	Sol calcimorphe
10																										B/C	// "

Les constellations du tableau 6 regroupent les couples d'horizons présentant une similitude de variation en sens et en grandeur pour les 5 variables aléatoires. Un tel rapprochement peut intéresser des sols très différents. Un certain nombre de remarques se dégagent à la lecture de ce tableau.

(1) L'évolution de l'horizon A à l'horizon AB est semblable dans la plupart des sols à l'exception des sols châtaîns et des sols calcimorphes eux-mêmes assez proches l'un de l'autre.

(2) Le passage de l'horizon B à l'horizon C présente une certaine similitude dans les sols isohumiques, les sols bruns calcaires hydromorphes et les vertisols lithomorphes, tous sols à pédoclimat relativement sec.

(3) Les horizons B des vertisols topomorphes modaux ou salés et des vertisols lithomorphes évoluent de manière très semblable. Cependant dans un vertisol salé l'horizon BC serait plus proche du B₂ que du BC des autres vertisols. Il serait nécessaire par conséquent de revoir nos critères morphologiques sur ce point.

(4) L'évolution des horizons B₁B₂ d'un sol châtain serait analogue à celle des horizons AB-B₁ des vertisols. La figure 4 met en effet en évidence une augmentation parallèle des taux d'argile et surtout de magnésium échangeable dans les vertisols et à un degré moindre dans les sols isohumiques.

2.2.4. CORRÉLATIONS

Nous avons examiné les valeurs du coefficient de corrélation intra-sol de Pearson après transformation bilogarithmique décimale. Les résultats sont très disparates du fait des effectifs très inégaux. Ils n'apportent pas de renseignements supplémentaires, susceptibles d'une interprétation pédogénétique. De ce fait, il n'a pas été jugé utile de calculer les corrélations de rang de Spearman pour ces mêmes données.

On a noté :

une corrélation positive entre argile et limon fin dans les sols calcimorphes ou isohumiques et négative dans les sols peu évolués vertiques ou vertisols ;
entre argile et capacité d'échange une corrélation positive ;

entre limon fin et capacité d'échange une corrélation variable tantôt négative (dans les vertisols) tantôt positive ;

entre carbone et azote une corrélation positive ;

entre carbone et capacité d'échange une corrélation positive.

2.2.5. CONCLUSIONS

L'emploi de la méthode des constellations pour caractériser les horizons des différents types de sol nous a donc fourni un certain nombre de résultats intéressants.

L'horizon que l'on a coutume de désigner par la lettre B, est celui qui caractérise le mieux un type de pédogenèse, l'intensité maximum des phénomènes se situant en B₂. Cependant deux des horizons étudiés s'écartent du résultat général : d'une part l'horizon B₃ des vertisols salés qui présente les caractères les plus intenses de pédogenèse et de ce fait devrait être considéré comme un B₂ ; et d'autre part l'horizon B des sols calcimorphes qui n'a pu être valablement défini par suite d'un effectif insuffisant.

La distinction entre les horizons B des divers types de sols coïncide bien avec la classification pédologique.

Les vertisols forment une unité homogène reconnaissable par une légère augmentation du taux d'argile dans l'horizon B accompagnée d'une faible diminution du limon fin, par des teneurs élevées en magnésium échangeable, teneurs qui croissent avec la profondeur et par une tendance à l'alcalisation dans les horizons profonds.

Les sols isohumiques se distinguent par une forte augmentation des taux d'argile et de magnésium échangeable au niveau des horizons B suivie d'une diminution en C. L'alcalisation y semble un phénomène exceptionnel.

La constellation des sols calcimorphes s'individualise moins bien.

Les sols peu évolués sont réellement des intergrades en ce sens qu'ils se rapprochent tantôt des sols calcimorphes tantôt des vertisols selon les caractères de leur horizon AC.

Les sols bruns calcaires hydromorphes sont également des intergrades entre sols calcimorphes et sols isohumiques châtaîns. Leurs horizons B et C les rapprochent des sols châtaîns. L'horizon A les apparente plutôt aux sols calcimorphes.

Une étude ultérieure s'attachera à comparer vertisols salés et sols halomorphes ces derniers ne figurant pas dans la présente étude.

Les horizons humifères A sont beaucoup moins caractéristiques d'un type de sol donné. Les regroupements en constellations n'interviennent qu'aux dernières étapes des calculs. La différenciation de ces horizons semble dépendre d'autres facteurs que ceux qui ont été pris en compte dans l'étude des horizons B. Une étude plus approfondie des horizons A devrait

TABLEAU 7

Moyennes intra-constellations des données analytiques sur des sols rouges méditerranéens à la 62^e étape des calculs

Constellations		ARG (%)	LMF (%)	MGE (mé %)	KE (mé %)	T (mé %)	PAC	F/A
1	3 sols rouges hor. B1, sol châ. hor. B	13,5	1,5	1,86	0,30	6,54	0,80	0,15
3	1 sol rouge hor. B1, sol châ. hor. C, 3 sols châ. hor. C	25,5	5,8	2,28	0,31	13,47	0,61	0,07
Y	2 hor. B et 1 hor. C de 3 sols rouges.....	26,5	8,3	2,93	0,51	10,7	0,66	0,10
6	2 sols rouges sur calcaire, hor. B.....	77,2	2,7	1,75	0,77	61,2	0,35	0,03
8	3 sols rouges hor. B et C, 2 sols châ. (C).....	48,9	15,7	4,55	0,66	22,0	0,58	0,06
9	2 sols châ. hor. B et C	43,5	33,0	2,45	0,48	27,8	0,38	0,04
J	1 sol rouge hor. C et 1 sol châ. hor. C.....	41,2	21,7	6,50	0,62	16,7	0,65	0,08
L	Hor. B et hor. R d'un sol châ. hor. C.....	46,5	40,2	4,41	0,42	28,5	0,40	0,04
M	2 hor. C d'un même sol châ. hor. C.....	31,2	24,0	4,04	0,23	11,2	0,48	0,03
B	2 sols rouges sur calcaires durs, hor. B et C.....	66,6	18,9	1,03				
W	Hor. B et C d'un sol châ. hor. C.....	43,2	18,2	2,20	0,44	20,6	0,65	0,09
K	2 sols châ. hor. C un sol rouge hor. BC	27,1	9,3	2,81	0,25	15,2	0,66	0,06
U	Hor. B et C d'un sol châ. hor. C.....	40,7	14,2	2,50	0,46	16,9	0,60	0,06
T	2 hor. B d'un sol châ. hor. C.....	51	22,7	4,04	0,76	32,3	0,65	0,09
X	1 sol rouge et 1 sol châ. hor. B	60	15,2	1,84	1,81	33,3	0,66	0,09
2	Hor. B et C d'un sol châ. hor. C.....	54,2	10,2	6,58	0,96	44,1	0,44	0,05
7	Hor. B de 10 sols châ. et 3 sols rouges	65,8	5,5	6,79	0,97	28,5	0,54	0,05
5	3 sols rouges (hor. B), 4 sols châ. hor. B et C	50,5	7,3	5,94	0,80	28,4	0,59	0,06
4	7 sols châ. hor. B	70,3	7,4	5,17	1,04	36,3	0,65	0,07
H	1 sol rouge, 1 sol châ. hor. B.....	54,5	4,5	6,20	0,62	25,4	0,75	0,09
D	2 sols châ. hor. B et 2 sols châ. hor. C.....	35,4	19,5	7,06	0,38	20,0	0,55	0,04
N	4 sols châ. hor. B.....	65,2	7,9	3,80	0,90	32,4	0,48	0,05
O	2 sols rouges hor. B, 2 sols châ. hor. B.....	50,1	10,5	3,18	0,76	18,2	0,66	0,07
Q	Hor. B, 1 sol rouge et 1 sol châ. hor. C.....	38,0	6,0	5,85	0,69	19,2	0,67	0,08
V	2 sols châ. hor. B	43	2,2	3,98	0,60	23,5	0,58	0,06

s'appuyer sur des techniques analytiques plus variées et plus fines (BAUZON *et al.*, 1968). Elle devrait en outre tenir compte du mode d'exploitation du sol.

2.3. Comparaison entre sols rouges méditerranéens et sols rouges lithochromes

2.3.1. POSITION DU PROBLÈME

On éprouve fréquemment sur le terrain des difficultés pour distinguer les sols rouges méditerranéens des sols développés sur matériau rouge (COINTEPAS, 1966).

Les sols rouges méditerranéens de Tunisie se développent à partir d'une roche : un calcaire cristallin,

un grès calcaire ou non calcaire, des roches complexes du Trias et peut-être à partir de sédiments alluviaux ou colluviaux. Leur couleur rouge est variable en intensité (7,5 YR à 5 YR, plus rarement 2,5 YR du Code Munsell). Leur structure est polyédrique fine bien développée sur les matériaux d'origine calcaire ou triasique, moins bien développée sur matériaux gréseux. Ils peuvent présenter une accumulation calcaire, croûte, encroûtement ou nodules. Les sols lithochromes sont associés dans le paysage aux roches donnant naissance aux sols rouges. Ils sont en position aval et se développent sur des alluvions ou des colluvions. Ils sont peu évolués ou se rattachent à la classe des sols isohumiques groupe des sols châ. hor. B, sous-groupe modal ou châ. hor. B. Leur couleur peut être également rouge intense, leur structure est parfois bien exprimée et dans le cas des sols isohumiques ils

présentent une accumulation calcaire allant des nodules à l'encroûtement ou à la croûte.

Il est donc à peu près impossible sur de simples critères morphologiques de distinguer un sol rubefié en place d'un sol héritier d'une pédogenèse complexe. Nous avons alors essayé à partir de quelques critères chimiques de trouver une distinction entre ces deux catégories de sols.

2.3.2. MODALITÉS DES CALCULS

Nous disposons d'une soixantaine de profils répartis sur le Nord de la Tunisie. Nous avons comparé les horizons B et C de ces profils en calculant les distances entre ces horizons et, ensuite, les constellations pour les sept variables suivantes :

- Argile (ARG) en % de terre sèche
- Limon fin (LMF) en % de terre sèche
- Magnésium échangeable (MGE) en milliéquivalents %

Potassium échangeable (KE) en milliéquivalents %

Capacité d'échange (T) en milliéquivalents %

Rapport fer libre méthode de Deb/Fer total (PAC)

Rapport fer libre/argile (F/A).

Les calculs ont porté sur 108 horizons B ou C. Les résultats apparaissent sur un tableau figurant à l'annexe 6. Nous nous bornons à en fournir un commentaire. Les constellations regroupent des profils apparemment assez différents et dans un ordre très varié. Ce n'est qu'au fur et à mesure des étapes de calculs que se dessine un certain nombre de tendances. A la 62^e étape nous disposons de 25 constellations. Le tableau 7 indique les moyennes intra-constellations des 7 variables.

A la 96^e étape du regroupement, certaines constellations ont fusionné et il ne reste plus que 7 constellations caractérisées par les valeurs moyennes suivantes.

TABLEAU 8

Moyennes intra-constellations des données analytiques sur sols rouges méditerranéens à la 96^e étape des calculs

		ARG	LMF	MGE	KE	T	PAC	F/A
Constellation n° 1...		21,0	4,6	2,24	0,34	10	0,69	0 11
— n° 2...		57,0	8,2	5,67	0,84	27,9	0,58	0,06
— n° 6...		77,2	2,7	1,75	0,77	61,2	0,35	0,03
— n° 8...		44,7	23,3	4,40	0,55	21,9	0,48	0,05
— B.....		59,0	18,8	1,42				
— K.....		32,6	11,3	2,69	0,33	15,9	0,64	0,06
— T.....		55,5	19,0	2,94	1,28	32,8	0,66	0,09

2.3.3. INTERPRÉTATION DES RÉSULTATS

Les variables choisies ne sont pas suffisantes pour effectuer la distinction recherchée entre sols rouges et sols isohumiques.

Les sols rouges formés à partir des calcaires durs (appelés aussi « Terra Rossa ») se distinguent des autres sols et forment deux constellations (6 et B) aux caractéristiques analytiques bien différentes, surtout en ce qui concerne les teneurs en fer libre. Deux échantillons de la région de Béja formés sur calcaires éocènes présentent les plus faibles valeurs des rapports Fer libre/Fer total et Fer/argile. Les valeurs les plus élevées pour ces deux rapports se trouvent dans la constellation 1 élargie et dans les constellations

H et Q. La plupart des échantillons appartenant à ces constellations sont des horizons B de sols développés à partir des grès oligocènes non calcaires ou de grès dunaire fini-quadernaire. La capacité d'échange est faible (50 mé/100 g d'argile). L'analyse qualitative de l'argile indique la présence en quantité à peu près égale d'illite et de kaolinite. Quelques sols développés sur colluvions du Trias appartiennent également à ces constellations.

Les autres constellations regroupent les divers types de sol sans ordre préférentiel. Des sols assez typiquement châtain ont des rapports fer libre/fer total ou fer/argile élevés, alors que ces mêmes rapports sont faibles dans les sols rouges méditerranéens typiques. On pourrait penser qu'une diminution de ces rap-

ports de l'horizon B à l'horizon C à accumulation calcaire d'un même profil pourrait caractériser un sol rouge méditerranéen. Il n'en est rien et ce sont les sols qui ont la structure la plus développée et la plus proche des sols rouges qui ont les rapports les plus élevés dans l'horizon C. Donc, à moins d'imaginer une pédogenèse complexe dans laquelle l'accumulation calcaire aurait envahi au cours d'une période sèche un matériau profondément rubéfié au cours de la période humide précédente, il nous faut bien admettre que les sols à accumulation calcaire développés sur colluvions sont des sols lithochromes. Par ailleurs, à l'exception de la constellation n° 1 décrite plus haut, les regroupements ne caractérisent absolument pas un type de roche mère.

En définitive, cette première tentative pour distinguer d'après quelques critères chimiques les sols rouges méditerranéens véritables des sols lithochromes n'a pas donné de résultats définitifs. Pour obtenir quelques chances de succès, une telle étude devrait :

(1) Porter sur des séquences bien définies allant du sol rouge formé par altération d'une roche géologique jusqu'aux sols colluviaux récents issus de cette même roche ;

(2) Inclure un plus grand nombre de variables quantitatives ainsi que des variables qualitatives recueillies sur le terrain (structure, etc.).

La première condition sera difficile à réaliser. Il est rare en effet de pouvoir trouver des sols rouges en place sur les roches tendres telles les grès et surtout les roches triasiques. A l'inverse des « terra rossa » qui sont piégés dans les karsts, les sols rouges sur roches meubles ont été balayés à chaque cycle d'érosion. Par ailleurs, il n'est pas toujours possible de prouver que les dépôts colluviaux d'un glaciaire ont pour provenance unique les sols de l'amont. Il faut se situer sur de petits bassins versants bien délimités et lithologiquement très homogènes. Un tel ensemble de circonstances est difficile à trouver et suppose au préalable une prospection très fine des zones d'études.

3. CONCLUSIONS

L'étude que nous avons entreprise n'avait pas la prétention de résoudre des problèmes de pédogenèse. Notre but, beaucoup plus modeste, consistait à utiliser un certain nombre de méthodes statistiques et à évaluer leur intérêt pour une étude approfondie de pédogenèse.

Parmi les méthodes dont nous disposions le programme pour la sélection des variables s'est avéré très utile puisqu'il nous a permis de calculer très rapidement moyennes et intervalles de confiance ainsi que les corrélations entre les différentes variables.

Le test des corrélations, corrélations paramétriques de Pearson et non paramétriques de Spearman, n'a pas apporté de résultats nouveaux en ce qui concerne notre étude. Les liaisons Carbone-Azote, Argile-Capacité d'échange sont connues et expliquées. Ce test sera par contre d'un apport certain lorsqu'il nous permettra d'approfondir certaines relations entre données analytiques et caractères morphologiques. A ce stade, actuellement en cours d'élaboration, nous pourrions vérifier de manière plus rigoureuse notre codification des horizons actuellement basée sur les seuls caractères morphologiques, et de cette manière également tester la validité du choix des données analytiques utilisées.

La mesure des distances est le pivot de notre étude. Elle a l'avantage de mettre en jeu simultanément plusieurs variables. D'où son intérêt pour les études en sciences naturelles où les facteurs sont nombreux et complexes. Elle peut être appliquée à de multiples situations :

— tests d'homogénéité d'un lot d'échantillons définis par plusieurs variables,

— comparaison d'individus ou de groupes d'individus soumis à l'influence de facteurs multiples.

Elle a donc sa place tant dans les études de classification (*cf.* 2.2.) ou de cartographie (GIRARD, 1969) que dans les recherches sur la pédogenèse BAUZON *et al.*, 1968 et 1969).

La difficulté réside dans le choix des variables. Il est très important en effet de ne retenir que les variables susceptibles d'influer sur le phénomène recherché. Ces variables peuvent être qualitatives ordonnées, qualitatives non ordonnées ou quantitatives. Il est possible d'utiliser des données analytiques brutes (variables simples) ou des rapports entre plusieurs données (variables dérivées). Dans ce dernier cas des programmes annexes sont nécessaires pour le calcul de ces variables dérivées.

Moyennant ces quelques précautions l'analyse multivariable est susceptible d'apporter une contribution très importante dans les études de pédogenèse.

Manuscrit reçu au SCD le 11 janvier 1974

REMERCIEMENTS

L'auteur est vivement reconnaissant à M. R. VAN DEN DRIESSCHE, responsable de la Banque des Données Pédologiques de l'ORSTOM, pour lui avoir ouvert l'accès aux programmes

de la Banque et pour l'avoir conseillé dans la conduite de cette étude dont il a bien voulu lire et critiquer les résultats. Il remercie également Mlle A.-M. AUBRY, assistante de M. VAN DEN DRIESSCHE, pour l'aide apportée dans l'exécution des calculs et la rédaction de la partie théorique de cette note.

BIBLIOGRAPHIE

- AUBERT (G.), 1966. — Classification des sols. Codes des groupes et sous-groupes ORSTOM, Bondy, 6 p. *multigr.*
- AUBRY (A.M.) *et al.*, 1973. — Measures of rank distances followed by repeated clustering and tests of rank correlations in the study of biological and chemical data from tropical forest soils (Ivory Coast). *Bull. ecol. Res. Committee*, 17 : 433-442.
- BAUZON (D.), VAN DEN DRIESSCHE (R.), DOMMARGUES (Y.), 1968. — Caractérisation respirométrique et enzymatique des horizons de surface des sols forestiers. *Sci. du Sol*, 2 : 55-78.
- BAUZON (D.), VAN DEN DRIESSCHE (R.), DOMMARGUES (Y.), 1969. — I. Influence in situ des litières forestières sur quelques caractéristiques biologiques des sols. *Oecol. Plant.*, 4 : 99-122.
- BECK (G.), DOMMARGUES (Y.), VAN DEN DRIESSCHE (R.), 1969. — II. Etude expérimentale du pouvoir inhibiteur des composés hydrosolubles des feuilles et des litières forestières vis-à-vis de la microflore tellurique. *Oecol. Plant.*, 4 : 237-266.
- BORTOLI (L.) *et al.*, 1969. — Climatologie et bioclimatologie de la Tunisie. *Ann. Inst. Nat. Rech. Agron. Tunisie*, 42, 1, 235 p.
- COMBEAU (A.), 1961. — Observations sur certains facteurs de la rétention d'eau par le sol pour diverses valeurs remarquables du pF. Application à quelques types de sols tropicaux. ORSTOM, Bondy, 22 p. *multigr.*
- COINTEPAS (J.P.), 1966. — Les sols rouges et bruns méditerranéens de Tunisie. *Conf. Sols Médit.*, 1966, Madrid : 187-194.
- CPCS, 1967. — Classification des sols. Travaux de la commission de Pédologie et de cartographie des sols, 1963-1967, Grignon, 96 p. *multigr.*
- GIRARD (M.C.), 1969. — Interprétation statistique des résultats d'analyse en pédologie et introduction de la mesure des distances Δg de HIERNAX. *Sci. du Sol*, 1 : 37-62.
- VAN DEN DRIESSCHE (R.), 1965. — La recherche des constellations de groupes à partir des distances généralisées D^2 de Mahalanobis. *Biom. Prax.*, 6 : 36-47.
- VAN DEN DRIESSCHE (R.), 1966. — Un problème de classification numérique. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 4, : 91-96.
- VAN DEN DRIESSCHE (R.), GARCIA GOMEZ (A.), 1972. — Distances non paramétriques entre profils. *Rev. Ecol. Biol. Sol.*, IX, 4 : 617-628.
- VAN DEN DRIESSCHE (R.), GARCIA GOMEZ (A.), 1973. — Comparaison multivariante non paramétrique des profils sans nomenclature des horizons. *Cah. ORSTOM sér. Pédol.*, XI, 3/4 : 257-264.

ANNEXE 1

Codification des horizons

	Symbole	N° code
1. Sols peu évolués		
— Horizon le plus foncé en surface	Ap	1.4 (si épaisseur < 20 cm)
	A	1.1 (si épaisseur > 20 cm)
— Horizon de début de différenciation pédologique	AC	1.6
+ accumulation calcaire		1.61
+ pseudogley		1.62
+ caractères vertiques		1.63
+ caractères vertiques + pseudogley		1.64
+ caractères de salure ou alcalisation		1.65
+ caractères vertiques + salure ou alcalisation		1.66
— Horizon non touché par la pédogenèse	C	3.0
2. Sols calcimorphes		
— Horizon le plus foncé en surface A	Ap	1.4 (épaisseur < 20 cm)
	A	1.1 (épaisseur > 20 cm)
— Horizon de passage : de coloration progressive. Structure plus grossière que le A	AB	1.5
— Horizon à structure polyédrique ou prismatique fin bien développé (prismatique grossier pour un sol calcimorphe à caractère vertique)	C	2.2
— Horizon de couleur plus claire matériau originel. Présence ou non de taches ou d'une accumulation calcaire	C	3.
+ accumulation calcaire très intense	C ₁	3.1
+ accumulation calcaire moins intense	C ₂	3.2
+ taches calcaires sans accumulation véritable	C ₃	3.3
+ taches de pseudogley	C ₄	3.4
+ gley	C ₅	3.5
+ taches calcaires et gley ou pseudogley	C ₆	3.6
3. Vertisols		
— Horizon le plus foncé en surface	Ap	1.4 (épaisseur < 20 cm)
	A	1.1 (épaisseur > 20 cm)
— Horizon à structure lamellaire. Surstructure prismatique possible. Teneur en M.O. un peu inférieure. Couleur identique à A	AB	1.5
— Horizon à structure prismatique bien développée. Faces lissées obliques. Quelques plaquettes obliques. Couleur identique à A	(AB)	
— Horizon à structure prismatique s'estompant. Plaquettes obliques abondantes bien développées, faces lisses et gauchies. Couleur identique à A	B ₁ ou B _v	2.1
— Horizon à « langues » de pénétration de couleur foncée dans un horizon de couleur plus jaune	B ₂ ou B _v	2.2
— Horizon de couleur plus claire (bigarrée en milieu hydromorphe). Matériau originel sans structure ou à structure en plaquettes moins développées	BC	2.5
+ accumulation calcaire	C	
+ taches calcaires (sans accumulation)	C ₁ ou C ₂	3.1 ou 3.2.
+ taches de pseudogley	C ₃	3.3
+ gley	C ₄	3.4
+ taches calcaires + gley ou pseudogley	C ₅	3.5
	C ₆	3.6
— Horizon à structure prismatique grossière. Structure lamellaire peu développée. Couleur un peu plus claire que A et passant progressivement à C	AC	
4. Sols isohumiques		
— Horizon le plus foncé en surface	Ap	1.4 (épaisseur < 20 cm)
	A	1.1 (épaisseur > 20 cm)
— Horizon de même couleur ou légèrement plus clair. Structure polyédrique plus grossière parfois tendance prismatique	AB	1.5

	Symbole	N° code
— Horizon de même couleur (parfois) ou plus clair (le plus souvent). Apparition d'une structure prismatique peu nette. Teneur en argile un peu plus élevée	B ₁	2.1
— Horizon s'éclaircissant progressivement. Structure prismatique nette ou très nette (parfois massive) ou cubique. Teneur en argile la plus élevée du profil	B ₂	2.2
— Horizon plus clair. Structure prismatique encore nette. Teneur en argile identique au précédent. Légère accumulation calcaire diffuse ou en pseudomycélium ou en nodules peu nombreux.....	BC	2.5
— Horizon d'accumulation calcaire maximale. Croûte ou encroûtement ou nodules très abondants dans une matière très calcaire	C ₁	3.1
Si les 3 types coexistent dans le profil, on subdivisera en :		
Croûte ou encroûtement feuilleté		3.11
Encroûtement		3.12
Encroûtement nodulaire		3.13
— Horizon intermédiaire moins calcaire que le précédent, peu ou pas cimenté. Nodules encore abondants	C ₂	3.2
— Horizon constitué par le matériau originel, beaucoup moins calcaire. Des nodules ou des amas peuvent encore être présents mais se limitent souvent à des alignements dans les anciennes fissures.....	C ₃	3.3
5. Sols rouges méditerranéens		
— Horizon le plus foncé situé en surface.....	Ap	1.4 (si épaisseur < 20 cm)
	A	
	A	1.1 (si épaisseur > 20 cm)
— Horizon de couleur plus claire. Structure fine polyédrique bien développée.....	AB	1.5
— Horizon de couleur rouge vif. Structure polyédrique fine bien développée. Surstructure prismatique fine ou moyenne plus ou moins développée.....	B ₁	2.1
— Horizon de couleur rouge vif. Structure polyédrique fine très bien individualisée, polyèdres très anguleux souvent aplatis, à faces luisantes. Surstructure prismatique ou cubique	B ₂	2.2
— Horizon de couleur plus claire, ou moins homogène (taches diffuses rouge jaunâtre taches noires bien individualisées). Structure polyédrique fine très bien individualisée. La surstructure peut disparaître. Début d'accumulation calcaire possible.....	B ₃	2.3
— Horizon rouge jaunâtre parfois même jaunâtre. Structure variable, polyédrique fine à moyenne ou massive. Fréquente accumulation calcaire en taches, nodules très cristallisés ou diffuse.....	C	3.0
+ accumulation en croûte ou encroûtement	C ₁	3.1
+ accumulation calcaire peu intense	C ₂	3.2
+ taches calcaires sans accumulation véritable	C ₃	3.3
— Roche non altérée : grès, calcaire dur, argiles bariolées du Trias	R	18.
6. Sols hydromorphes. Sols halomorphes		
— Horizon le plus foncé en surface	Ap	1.4 (si épaisseur 20 < cm)
	A	1.1 (si épaisseur 20 > cm)
— Horizon de même couleur ou légèrement plus clair. Structure généralement mieux marquée (polyédrique ou déjà prismatique). Dans les sols à pseudogley apparition du pseudogley	AB	1.5
— Horizon généralement plus clair. Structure plus développée ou horizon nettement moins organique. Caractère intense de l'hydromorphie. (Lorsque cet horizon est humide seuls les caractères d'hydromorphie permettent de le juger)	B ₁	2.1
— Horizon de développement maximum des caractères de structure ou d'hydromorphie ou d'halomorphie	B ₂	2.2

ANNEXE 1 (suite)

	Symbole	N° code
Mais contrairement aux autres types de sols, ces caractères d'hydromorphie ou d'halomorphie peuvent se prolonger à grande profondeur. C'est le cas d'un gley ou d'une forte conductivité. Ils peuvent même augmenter avec la profondeur. Nous avons donc convenu de coder en 3. Les horizons correspondant à un changement de matériau originel ou de sédiment ou bien l'apparition de l'accumulation calcaire.		
Il en résulte, pour nos besoins, la codification suivante dont le caractère artificiel est évident.		
— Horizon sans caractères particuliers (si ce n'est une variation du sédiment)	C	3.
+ Encroûtement calcaire (ou gypseux) de nappe		3.1
+ Accumulation calcaire (ou gypseuse) de nappe		3.3
+ Pseudogley		3.4
+ Gley		3.5
+ Taches calcaires avec gley ou pseudogley		3.6

Aucun texte ne prévoyant le cas des horizons de paléosols enterrés, nous avons conventionnellement fait précéder le code de ces horizons du chiffre 2.

Exemple	A ₁	est codé	1.1
	A ₁ enterré	— —	21.1
	B ₂	— —	2.2
	B ₂ —	— —	22.2 (B ₂₂ étant codé 2.22).

ANNEXE 2

Coefficient de corrélation entre les variables des horizons de surface.

Climat	4.22	4.23	4.32	4.33	4.44	4.54
Effectifs	112	10	40	4.34	20	14
ARG × LMF	-0.55	-0.02	0.65	0.42**	0.29	0.27
ARG × C	-0.20	-0.14	0.19	0.29*	0.03	0.02
ARG × N	-0.39	-0.16	0.22	0.21	0.27	0.14
ARG × IS	-0.35	-0.41	0.05	-0.12	-0.62**	-0.68**
ARG × PMB	0.08	0.23	-0.33	-0.12	0.27	-0.46
LMF × C	-0.06	-0.68*	0.53	0.32*	0.09	0.29
LMF × N	0.11	-0.66*	0.58	0.42**	0.49*	0.39
LMF × IS	0.35	0.29	0.24	0.14	0.15	-0.10
LMF × PMB	-0.12	-0.71*	-0.37	-0.65**	-0.01	-0.63*
C × N	0.85	0.99**	0.97	0.72**	0.40	0.97**
C × IS	-0.18	-0.06	-0.13	-0.28*	-0.10	-0.35
C × PMB	0.26	0.55	0.12	-0.005	0.44*	-0.39
N × IS	0.03	-0.06	-0.15	-0.47**	0.00	-0.40
N × PMB	0.14	0.50	0.11	0.05	0.06	-0.48
IS × PMB	-0.43	-0.61	-0.32	-0.48**	-0.65**	0.73

* Significatif à P = 0,05.

** Significatif à P = 0,01.

ANNEXE 3

Constellations formées par les climats à partir des six variables des horizons de surface (fichier du 02-11-72).

Variabiles

- | | | |
|--------|------|--------|
| 1. ARG | 3. C | 5. IS |
| 2. LMF | 4. N | 6. PMB |

Échantillons

1. Climat humide à hiver tempéré
2. Climat subhumide à hiver doux
3. Climat subhumide à hiver tempéré
4. Climat semi-aride supérieur à hiver doux
5. Climat semi-aride supérieur à hiver tempéré
6. Climat semi-aride supérieur à hiver frais
7. Climat semi-aride inférieur à hiver frais
8. Climat aride à hiver frais

Constellations

		Climats								
		1	2	3	4	5	6	7	8	
Étapes des calculs	1	.	.	1	.	.	1	.	.	
	2	.	.	1	.	.	1	2	2	
	3	.	1	1	.	.	1	2	2	
	4	.	1	1	.	1	1	2	2	
	5	.	1	1	2	.	1	1	2	2
	6	.	1	1	2	2	1	1	2	2

ANNEXE 4

Regroupement en constellations des horizons de différents types de sol d'après leur teneur en argile, limon fin, pH, bases échangeables, capacité d'échange, carbone et azote.

				1111111111	2222222222	3333333333	3333444444	444455!	
				.1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890	1234567890
.....									
1.	11								
2.	11				2				2
3.	11				2		33		2
4.	11				22		33		2
5.	11				22	4	4 33		2
6.	11				5522	4	4 33		2
7.	116				5522	4	4 33		2 6
8.	116				15522	4	4 33		2 6
9.	116				155227	4	4 733		2 6
10.	116				155227	4	43733		2 6
11.	116				155227	4	43733		23 6
12.	116				155223	4	43333		23 6
13.	116				155223	4	43333		223 6
14.	116				155223	44	43333		223 6
15.	116				6 155223	44	43333		223 6
16.	116				6 155223	44	43333		223 66
17.	116				6 155223	44	43333	5	223 66
18.	116				6 155223	44	43333	5	223 666
19.	116				6 155223	444	43333	5	223 666
20.	116				6 155223	4443	43333	5	223 666
21.	116				6 155223	44434	43333	52223	.666
22.	116	8			6 155223	44434	43333	522238	666
23.	116	89			69155223	44434	43333	522238	666
24.	116	86			66155223	44434	43333	522238	666
25.	116	86	AA		66155223	44434	43333	522238	666
26.	116	86A	AA		66155223	44434	43333	522238	666
27.	116	86A	AA		66155223	44434	43333	4522238	666
28.	116	86A	AA		66155223	33333	33333	3522238	666
29.	116	86A	AA		66155222	22222	22222	2522228	666
30.	116	86A	AA		66155222	52222	22222	2522228	666
31.	1168	86A	AA		66155222	52222	22222	2522228	666
32.	1118	81A	AA		11155222	52222	22222	2522228	111.
33.	1	1118	81A	AA	11155222	52222	22222	2522228	111
34.	1	1118	81A	AA	111155222	52222	22222	2522228	111
35.	1	1118	81A5AA	111155222	52222	22222	22222	2522228	111
36.	1	1118881A5AA	111155222	52222	22222	22222	22222	2522228	111
37.	1	1118881A2AA	111122222	22222	22222	22222	22222	2222228	111
38.	1	11188818288	111122222	22222	22222	22222	22222	2222228	111
39.	11	11188818288	111122222	22222	22222	22222	22222	2222228	111
40.	111111	88818288	111122222	22222	22222	22222	22222	2222228	111

