

INFLUENCE DE LA MISE EN CULTURE SUR L'INSTABILITE STRUCTURALE DE QUELQUES SOLS D'URUGUAY

M. KAEMMERER¹, G. SACCO², J.C. REVEL¹ et P. CUGNY³

RESUME

L'analyse des relations entre l'instabilité structurale et les caractères de quelques sols de la République d'Uruguay permet aux auteurs de montrer la liaison entre l'indice d'instabilité structurale et la mise en culture. L'essentiel de l'étude porte sur la comparaison de sols laissés en prairie et des mêmes sols cultivés depuis 10 ans.

L'utilisation de méthodes d'Analyse des Données Multidimensionnelles (Analyse Factorielles des Correspondances, Méthode des Nuées Dynamiques) ainsi que diverses techniques statistiques usuelles (corrélation linéaire, corrélation bisériale, etc.) montrent que l'instabilité structurale varie en raison inverse du taux d'argile, de la teneur en carbone et de la teneur en azote. Ces deux derniers paramètres diminuent lors de la mise en culture et, de ce fait, l'indice d'instabilité structurale va en augmentant.

I. INTRODUCTION

L'Uruguay est un pays de relief doux. Le climat est mesothermal humide (fig. 1) et, sur un substratum géologique complexe (fig 2.1), la végétation forme une steppe à graminées dont la monotonie n'est rompue que par quelques forêts-galeries et bosquets d'Eucalyptus.

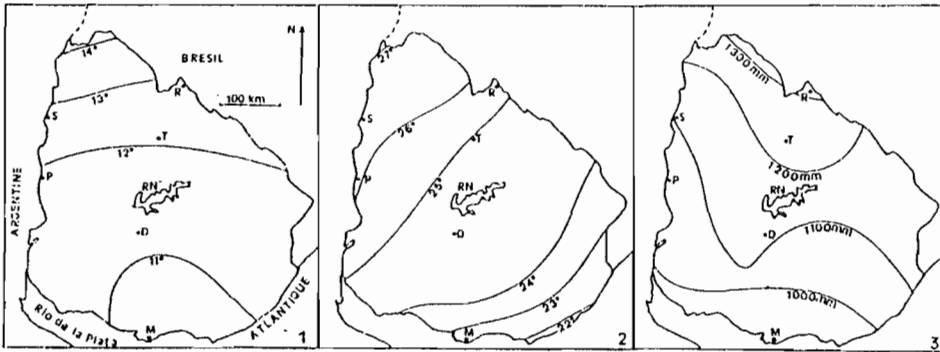


Figure 1 : Le climat de l'Uruguay. 1 : Isothermes de juillet ; 2 : Isothermes de janvier ; 3 : Isoyètes des moyennes annuelles.

M : Montevideo ; D : Durazno ; P : Paysandu ; S : Salto ; T : Tacuarembó ; R : Ribera ; RN : Lac sur le Río Negro.

Climate of Uruguay. 1 : Isotherms of July ; 2 : Isotherms of January ; 3 : Isoyetes of annual means.

M : Montevideo ; D : Durazno ; P : Paysandu ; S : Salto ; T : Tacuarembó ; R : Ribera ; RN : lake on the Río Negro.

1. Laboratoire de Pédologie Géochimie, U.P.S., I.N.P., 38, rue des 36-Ponts, 31062 Toulouse Cédex.

2. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, Avenida Garzon, Montevideo, Uruguay.

3. Laboratoire de Biologie Quantitative et Laboratoire de Géologie Sédimentaire et Paléontologie, U.P.S., Toulouse.

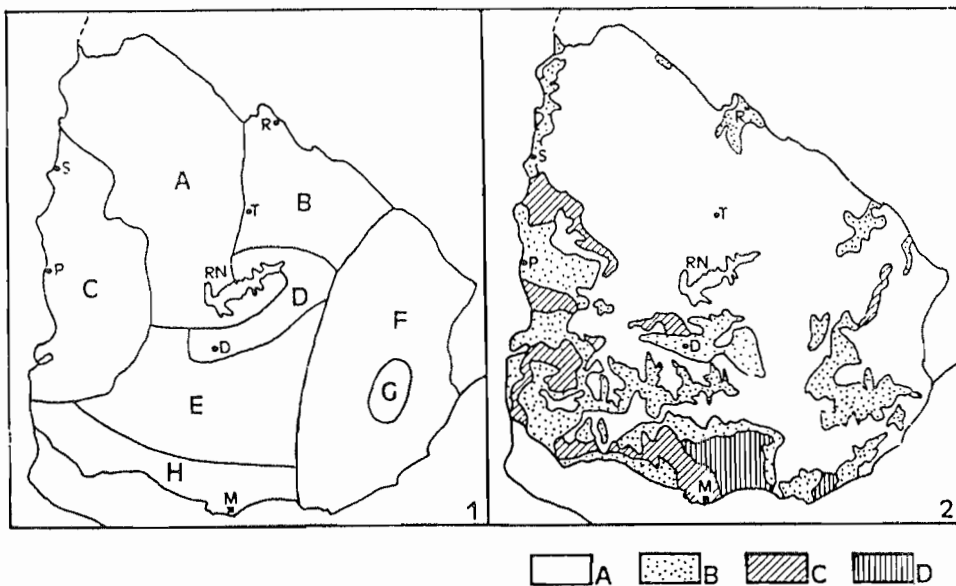


Figure 2 : 1 : Esquisse géologique de l'Uruguay (d'après BOSSI, 1966).

A : Basaltes jurassiques ; B : Grès permo-triasiques ; C : Lutites, grès dévoniens ; E : Granites et gneiss prédévoniens ; F : Calcaires et quartzites paléozoïques ; G : Granites ; H : Sables et limons pléistocènes.

2 : Carte d'érosion des sols.

A : érosion nulle ; B : érosion modérée ; C : érosion moyenne ; D : érosion forte.

1 : *Geologic outline of Uruguay (Bossi, 1966).*

A : *Jurassic basalts ; B : Permo-triassic sandstones ; C : Cretaceous and pliocenic sandstones, arkoses and lutites ; D : Devonian sandstones, arkoses and lutites ; E : Antedevonian granites and gneiss ; F : Paleozoic limestones and quartzites ; G : Granites ; H : Pleistocenic sands and loams.*

2 : *Erosion soils map. A : nullerosion ; B : moderate erosion ; C : medium erosion ; D : vigorous erosion.*

L'absence de richesses minières a fait délaïsser l'Uruguay par les Espagnols. L'élevage extensif est apparu il y a environ 250 ans, mais depuis une cinquantaine d'années, on observe une diversification de l'agriculture par l'introduction de la vigne, de vergers, de céréales et, autour des villes, de cultures maraichères. La mise en culture, en laissant le sol nu durant une partie de l'année permet à l'érosion de s'installer.

Les pertes en terre ne paraissent pas négligeables et devant leur généralisation, la Direction des Sols du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche a lancé un programme pour connaître les paramètres de déclenchement et l'importance de l'érosion. Les travaux déjà réalisés dans ce pays sont ceux de Brasesco (1975), Cayssials *et al.* (1978), Cayssials (1979) et Dotti (1979). Ces études ont montré que l'érosion s'accompagnait d'une perte en éléments nutritifs et en matière organique. Les sols sont d'autant plus résistants que la pente est faible et courte (Ayres, 1936 ; Bennet, 1936 ; Khonke *et al.*, 1959), mais également que la perméabilité, la capacité de rétention d'eau et la stabilité structurale (Meester *et al.*, 1978) sont grandes comme l'illustre Wischmeier (1968) dans son équation universelle des pertes en terre.

L'indice d'instabilité I_s défini par Hénin (1969) permet d'apprécier la résistance à la destruction par l'eau des agrégats. Même si cet indice, établi dans d'autres régions, n'est pas ici entièrement fiable, il reste l'un des paramètres permettant d'estimer la sensibilité des sols à l'érosion quand celle-ci est limitée au stade d'érosion pelliculaire ou même d'érosion en rigole.

Il était donc important d'étudier les facteurs déterminants de l'instabilité structurale sur des sols, depuis peu soumis à une agriculture intensive, et qui présentent un début de décapage. La comparaison de sols laissés en prairie aux mêmes sols cultivés depuis 10 ans a été faite dans ce but.

Du fait de la mise en culture récente et de la richesse en matière organique des sols (facteur prépondérant de la stabilité structurale), l'Uruguay est une région privilégiée pour ce genre d'étude.

Plus de la moitié de la surface de l'Uruguay supporte des sols appartenant au groupe des brunizems dans la classe des sols isohumiques (Boulaine, 1968). Leur caractère essentiel est leur forte teneur en matière organique mais ils peuvent présenter des variations depuis les brunizems vertiques, les brunizems lessivés jusqu'aux brunizems planosoliques. Ces variations sont souvent liées à la nature de la roche-mère ainsi que le souligne Favrot (1971) dans « la Pampa ondulata » de l'Argentine.

Les vertisols et vertisols à double profil* occupent également une surface importante (Rossignol, 1981). Viennent ensuite, par ordre d'importance, les sols ferrugineux lessivés et les sols ferrallitiques. Les sols hydromorphes et halomorphes ont une faible extension.

II. CHOIX DES SOLS ETUDIÉS

Les sols pouvant servir de support à notre étude devaient répondre à trois exigences :

- appartenir à des groupes de sols importants par leur superficie et leur utilisation ;
- être, au moins partiellement, cultivés depuis un temps suffisant ;
- présenter dans les parties cultivées des marques d'érosion.

Même dans les zones cultivées, les surfaces laissées en prairies naturelles restent encore importantes. Il sera donc possible, pour un type de sol donné, d'apprécier l'influence de la mise en culture. Toutefois, le mode de travail du sol n'a pu être précisé. On ne pourra donc étudier que l'influence globale de la mise en culture sur les sols, en étant conscient du fait que chaque composante peut avoir une incidence particulière sur la structure.

Les sols sélectionnés, dénommés d'après la « carta de reconocimiento de suelos del Uruguay » (1976) et désignés (entre parenthèses) suivant la classification CPCS (1967), sont les suivants :

— Deux grumosols appartenant aux unités de Cuchilla del Corralito et la Carolina (classe des grumosols), les phases superficielles et profondes étant prises en compte pour les sols laissés en prairies.

— Quatre praderas negras des unités Portones de Haedo, Young, Cuchilla de Carmelo, Itapetí (groupe des brunizems) ;

— Trois praderas pardas des unités Canada Nieto, Chapicuy et Varela (groupe des sols bruns faiblement lessivés ou lessivés) ;

— Trois planosols des unités Angostura, Lascano et Rio Branco (groupe des sols hydromorphes peu humifères à pseudogley).

Notre étude porte uniquement sur l'horizon superficiel, seul soumis à l'érosion. Le sol n° 11, Varela, du groupe des praderas pardas est un cas particulier car il n'a été labouré qu'une seule fois pour installer une prairie artificielle.

* Vertisols situés sur de faibles pentes et dont la profondeur varie cycliquement dans l'espace.

Les caractères morphologiques et analytiques des sols de ces unités sont donnés dans l'étude de Kaemmerer (1979) à laquelle on pourra se reporter pour de plus amples détails.

III. RESULTATS

A) L'indice d'instabilité

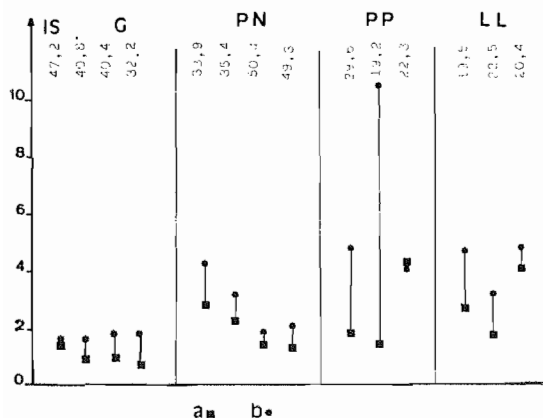
L'indice d'instabilité a été déterminé suivant la méthode de Hénin (1960). Les résultats qualitatifs obtenus (fig. 3) montrent trois faits remarquables :

— Dans tous les groupes de sols, ls croît lorsqu'on passe du sol de prairie au sol cultivé à l'exception du sol n° 11 Varela, qui voit ls rester pratiquement constant lors de l'installation d'une prairie artificielle.

— En ce qui concerne les sols laissés en prairie, ls peut présenter une variabilité intragroupe aussi importante que la variabilité intergroupe.

— Dans un même groupe de sols, la différence entre ls des sols cultivés et laissés en prairie est très variable.

Figure 3 : Variation de l'instabilité en fonction du type de sol.



a : sols de prairie ; b : sols cultivés ; G : grumosols ; PN : praderas negras ; PP : praderas pardas ; LL : planosols.

Les valeurs données (47,2...) correspondent aux teneurs en argile (< 2 μ) des sols laissés en prairie.

Structural instability variations according to the soil typ a : mead soils ; b : cultivated soils ; G : grumosols ; PN : praderas negras ; pp : praderas pardas ; LL : planosols. The values correspond at clay (< 2 μ) in mead soils.

B) Etude globale par l'Analyse Factorielle des Correspondances

1. Généralités

Une description objective de nos données par diverses méthodes d'analyse ou de classification des données multidimensionnelles (Analyse Factorielle des Correspondances, Analyse en Composantes Principales, méthode des Nuées Dynamiques) ainsi que divers traitements statistiques usuels vont nous permettre :

— de visualiser les proximités entre types de sols (grumosols, praderas negras, praderas pardas, planosols) laissés en prairies ou mis en culture et de définir des noyaux d'affinité entre sols (sols qui présentent des caractères voisins sur l'ensemble des critères pris en compte) ;

— d'analyser les relations entre variables (l'indice d'instabilité ls, le carbone total, l'azote total, le rapport C/N, la teneur en argile, les rapports humine-carbone total, acides fulviques, carbone total, acides fulviques/acides humiques, les teneurs en sodium échangeable, les teneurs en calcium échangeable, les teneurs en magnésium échangeable, les rapports sodium/capacité totale, d'échange, et taux de saturation).

Ces diverses variables ont été choisies en fonction des connaissances déjà acquises sur l'instabilité structurale. A priori, nous n'avons pas rejeté certaines d'entre elles, les résultats des premiers traitements devant nous permettre de retenir les plus intéressantes ;

- de décrire les contributions des éléments d'un ensemble au profil de l'autre.

2. Les traitements effectués

Les traitements effectués sont :

- (1) Analyse Factorielle des Correspondances du tableau général de nos données (valeurs prises par les diverses variables pour chaque sol) ;
- (2) Analyse en Composantes Principales du même tableau ;
- (3) Analyse Factorielle des Correspondances du tableau disjonctif complet obtenu après avoir codé les variables suivant quatre modalités déterminées par les quartiles ;
- (4) Analyse Factorielle des Correspondances du tableau disjonctif complet après sélection des variables tenant compte des enseignements apportés par les traitements précédents ;
- (5) Divers traitements statistiques usuels afin de confirmer ou préciser nos interprétations.

Bien que théoriquement destinée à traiter une table de contingence, l'Analyse Factorielle des Correspondances a pu être utilisée pour le tableau général de nos données. Nous nous sommes en effet assurés au préalable que le passage à la

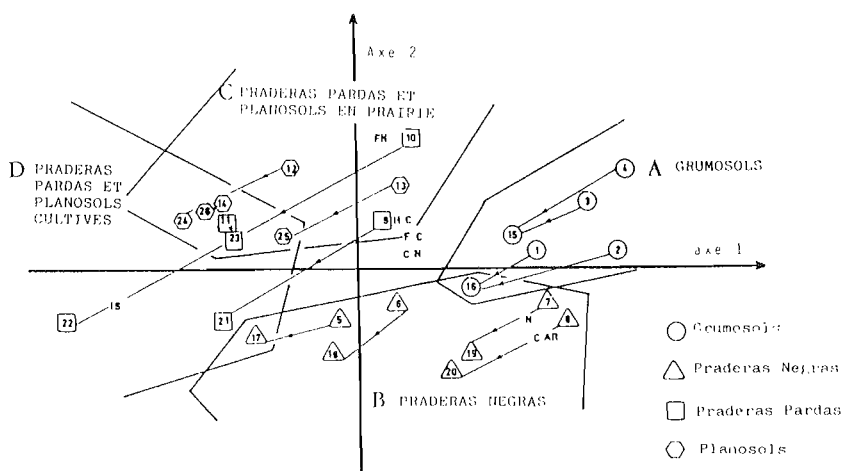


Figure 4 : Analyse Factorielle des Correspondances du tableau général. Représentation simultanée des sols et des variables dans l'espace des axes 1 et 2.

IS : instabilité structurale ; **C** : carbone total ; **N** : Azote total ; **CN** : rapport C/N ; **FC** : acides fulviques/carbone total ; **HC** : acides humiques/carbone total ; **FH** : acides fulviques/acides humiques ; **AR** : taux d'argile.

Factor Analysis of Correspondance of general data : Simultaneous figuration of soils and variables in the two first factors space. IS : Structural instability ; C : total carbon ; N : total nitrogen ; CN : carbon-nitrogen ratio ; FC : fulvic acids - total carbon ratio ; HC : humin - total carbon ratio ; FH fulvic acids - humic acids ratio ; AR : clay content.

matrice d'inertie (matrice de covariance) ne modifiait pas les profils des unités statistiques d'une part et des variables de l'autre. Effectuée à titre de vérification, l'Analyse en Composantes Principales du même tableau nous a d'ailleurs donné une structure totalement comparable.

De par le rôle symétrique qu'elle fait jouer aux unités statistiques et aux variables, l'Analyse Factorielle des Correspondances rend licite leur représentation simultanée sur un même graphique (même distance pour les deux ensembles). C'est pourquoi, pour une première approche du problème, nous avons choisi l'Analyse Factorielle des Correspondances de préférence à l'Analyse en Composantes Principales.

3. Résultats

Les trois premiers axes obtenus par l'A.F.C. du tableau général extraient respectivement 72 ; 11,3 et 7,2 % de l'inertie totale. En raison de l'importance prépondérante du 1^{er} facteur (matérialisé par l'axe 1) et à un degré moindre du 2^e, nous étudierons la distribution des sols et des variables dans l'espace des axes 1 et 2 (fig. 4) et plus particulièrement les positions relatives suivant l'axe 1.

En projection suivant cet axe, se succèdent des valeurs positives vers les valeurs négatives, grumosols, praderas negras, praderas pardas et planosols laissés en prairie en enfin praderas pardas et planosols cultivés. Cette succession semble correspondre à un gradient d'évolution allant des sols calcaires en profondeur aux sols de plus en plus lessivés en argile. Il apparaît que la classification se fait en fonction de l'intensité de la décarbonatation, du lessivage et de la baisse du pH, bien que ces facteurs n'aient pas été directement introduits dans les données à traiter.

Les coefficients de corrélation, de Bravais-Pearson r entre l'abscisse des points figurant les sols et le pH correspondant, de rang de Spearman ρ_1 et ρ_2 entre l'ordre des points suivant l'axe 1 et leurs classements respectifs en fonction de la décarbonatation et du lessivage sont significatifs avec un risque $\alpha < 5\%$ et confirment notre interprétation. De plus, l'introduction ultérieure du pH dans les données à traiter n'a pas modifié de façon sensible la structure du nuage de points.

Dans l'ensemble des prélèvements, l'Analyse Factorielle des Correspondances, suivie d'une classification par la Méthode des Nuées Dynamiques permet un regroupement en 4 noyaux des sols les plus affinées sur l'ensemble des caractères pris en compte :

Noyau A : Grumosols en prairie ou cultivés 1, 2, 3, 4, 15, 16

Noyau B : Praderas negras en prairie ou cultivées 5, 6, 7, 8, 17, 18, 19, 20

Noyau C : Praderas pardas et planosols en prairie 10, 11, 12, 13, 14

Noyau D : Praderas pardas et planosols cultivés 21, 22, 23, 24, 25, 26

Ces noyaux ne sont cependant pas définis de façon immuable, certains éléments (éléments-charnières, Diday 1972) étant regroupés à l'un ou l'autre de ces noyaux suivant le tirage :

7, 8, 16 noyaux A/B

17, noyaux B/D

11, 14, 23, 24, 25 noyaux C/D.

Une fois mis en culture les grumosols prennent des caractères qui les rapprochent des praderas negras.

Les praderas pardas et les planosols sont regroupés en fonction de leur utilisation. Ce fait traduit des caractères voisins et un comportement semblable lors de la mise en culture.

Pour chaque sol, le passage de la prairie à la culture se traduit sur le graphique (à l'exception du sol n° 11 Varela) par une translation nettement plus marquée suivant l'axe 1 lié au paramètre ls (cosinus - carré = 0,984) que suivant l'axe 2.

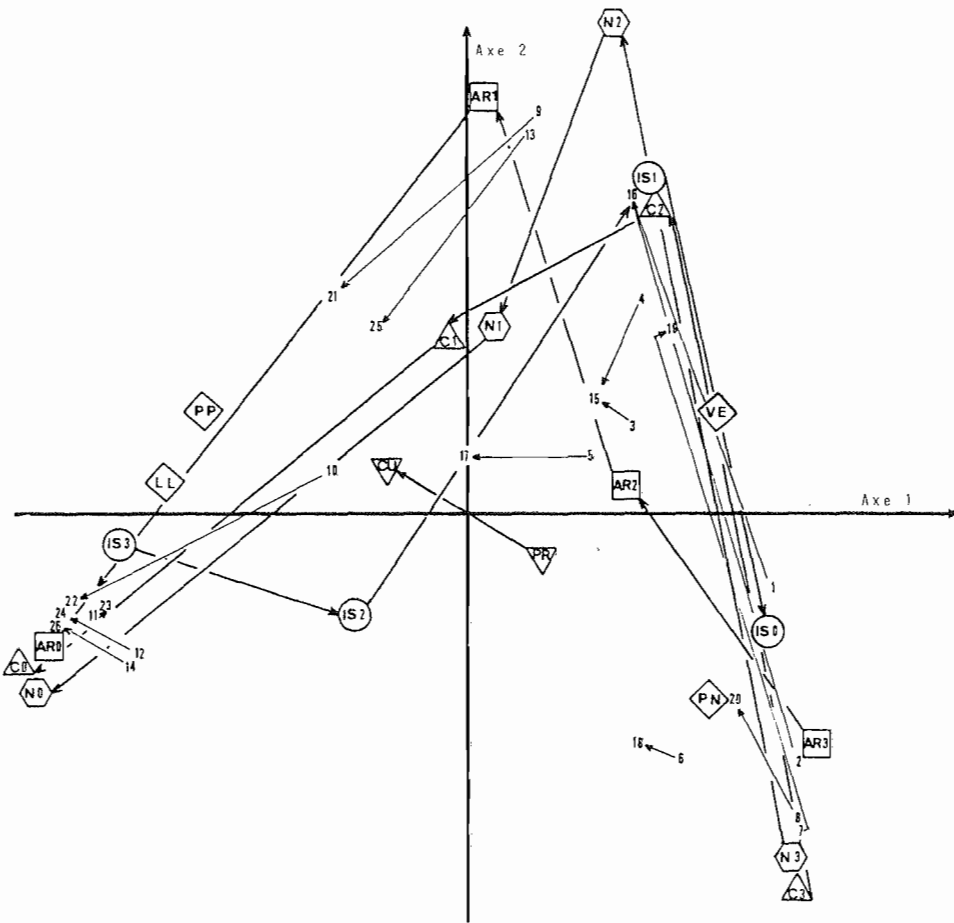


Figure 5 : Analyse Factorielle des Correspondances du tableau disjonctif complet obtenu par les quartiles (4 modalités pour chaque variable) : représentation simultanée des sols et des variables dans l'espace des axes 1 et 2.

- IS0, IS1, IS2, IS3 : indice d'instabilité ;
- C0, C1, C2, C3 : carbone ;
- N0, N1, N2, N3 : azote ;
- AR0, AR1, AR2, AR3 : argile ;
- PR : prairies ; CU : cultures ;
- G : grumosols ; PN : praderas negras ; PP : praderas pardas ; LL : planosols.

Factor Analysis of Correspondances of the disjonctive binary data table obtained by quartiles : simultaneous figuration of soils and variables in the first two factors space.

IS0, IS1, IS2, IS3 : structural instability ;

C0, C1, C2, C3 : carbon

N0, N1, N2, N3 : nitrogen ;

AR0, AR1, AR2, AR3 ; clay content ;

PR : mead soils ; CU cultivated soils ;

G : grumosols ; PN : praderas negras ; PP : praderas pardas

LL : planosols.

Nous remarquons la position proche de l'origine des points figurants certaines variables (CN, FC, HC). L'étude des cosinus-carrés et des contributions, associé à l'examen du tableau de données, nous montrent que ces descripteurs, de faible variabilité présentent, dans le cas de cette étude, peu d'intérêt pour la description de nos sols.

L'examen de la distribution des points figurant les variables, l'étude des aides à l'interprétation (cosinus-carrés, contributions), le retour au tableau de données, l'étude de la distribution des variables obtenue par l'analyse du tableau disjonctif complet (cf. III, 2, b, 3) nous ayant permis de réaliser une sélection des variables les plus efficaces pour la description, l'Analyse des Correspondances du tableau disjonctif (cf. III, 2, b, 4) nous permet de mieux préciser les relations entre ces dernières (fig. 5).

La distribution observée, sensiblement parabolique, correspondant à l'effet Guttman, montre que les deux premiers facteurs, linéairement indépendants, sont cependant liés quadratiquement (liaison des variables prises en compte par ces axes avec une ou plusieurs autres variables. Cet effet a d'ailleurs été plusieurs fois signalé par Girard, (1983), lors d'études pédologiques.

En projection suivant l'axe 1 se succèdent, dans cet ordre, des valeurs négatives vers les valeurs positives, les points représentatifs :

AR0 → AR1 → AR2 → AR3 (argile)
 C0 → C1 → C2 → C3 (carbone)
 N0 → N1 → N2 → N3 (azote)
 IS3 → IS2 → IS1 → IS0 (indice d'instabilité)

L'instabilité structurale varie en raison inverse de la teneur en carbone, de la teneur en azote et du taux d'argile

L'axe 1 oppose les grumosols et les praderas negras pour lesquels les taux de carbone, d'azote et d'argile sont forts (C3, N3, AR3) avec un indice d'instabilité faible (IS0) aux praderas pardas et planosols pour lesquels carbone, azote et argile présentent des valeurs faibles (C0, N0, AR0) associées à un indice d'instabilité élevé (IS3, IS2). Nous remarquerons en particulier la proximité suivant l'axe 1, lié à Is, des points C3, N3 et IS0.

La richesse en matière organique est un facteur important de la stabilité structurale.

Comme dans toutes les analyses précédentes, le passage de la prairie à la culture se traduit par une translation dont la composante suivant l'axe 1 est négative. La mise en culture induit une augmentation de l'indice d'instabilité.

Il apparaît ainsi nécessaire d'étudier plus particulièrement les relations entre Is et les autres paramètres ainsi que l'influence de la mise en culture.

C) Relations entre l'indice d'instabilité structurale, le type et l'utilisation des sols

Le calcul du coefficient de corrélation bisériale (liaison entre une variable quantitative et une variable qualitative) entre l'indice d'instabilité structurale Is et le mode d'utilisation des sols ($r_{bis} = 0,607$ pour 26 paires d'observations indique une liaison très hautement significative (risque inférieur à 1 %)

Une analyse de variance à deux facteurs contrôlés (type de sol et utilisation du sol) met en évidence une différence significative entre les moyennes, suivant le type de sol (risque de 3 %) et suivant l'utilisation (risque de 3,5 %).

Le calcul de la plus petite différence significative (P.P.D.S.) montre que, en ce qui concerne les divers types de sols, la différence est significative entre

grumosols et praderas negras, grumosols/praderas negras et praderas pardas/planosols mais ne l'est pas entre praderas pardas et planosols. Ceci vérifie le comportement semblable des praderas pardas et planosols mis en évidence par l'Analyse Factorielle des Correspondances.

Si l'on considère les grumosols et les praderas negras, le coefficient de corrélation bisériale entre I_s et l'utilisation (prairie ou culture), $r_{bis} = 0,614$ (DL = 12) indique une liaison significative au risque de 2 %.

En ce qui concerne les praderas pardas et les planosols, le même coefficient ($r_{bis} = 0,785$ pour DL = 10) indique une liaison significative au risque de 0,5 %.

La liaison entre l'indice d'instabilité structurale et l'utilisation du sol est plus importante dans les praderas pardas et les planosols que dans les grumosols et les praderas negras. Toutefois, compte tenu du nombre de données relativement faible, une étude portant sur un plus grand nombre de sols de chaque type serait nécessaire pour tirer des conclusions de portée plus générale.

D) Relations entre l'indice d'instabilité structurale et la matière organique

Sur des sols semblables situés au Sud-Est de la province de Buenos-Aires, Sourdat (1967), Tisdal *et al.*, (1978) ont montré que l'indice d'instabilité structurale est fonction de la teneur en matière organique.

D'autres auteurs, (Combeau, 1965 ; Combeau *et al.*, 1963, 1964 ; Godefroy *et al.*, 1975 ; Turenne, 1977) ont établi qu'il existait dans des sols variés, une relation linéaire entre I_s et le carbone organique (Ct) de la forme $\log I_s = aCt + b$.

Dans une gamme de sols plus variée, certains auteurs ont corrélié l'indice d'instabilité avec d'autres paramètres tels les rapports acides fulviques/carbone total, acides fulviques/acides humiques (Combeau *et al.*, 1963, 1964), acides humiques bruns + acides humiques intermédiaires/acides humiques totaux, acides humiques bruns/acides humiques gris (Turenne, 1977).

Dans le cadre de ce travail ont été analysées les corrélations entre l'indice d'instabilité et le carbone total, l'azote total, la teneur en argile, les rapports C/N, acides humiques/carbone total, acides fulviques/carbone total et acides fulviques/acides humiques.

Les résultats obtenus (coefficients de corrélation) sont les suivants :

	Ct	Nt	C/N	AR	AH/Ct	AF/Ct	AF/AH
100 log I_s	-0,570 HS	-0,591 HS	-0,139 NS	-0,634 HS	0,087 NS	-0,025 NS	0,080 NS

HS : corrélation hautement significative (risque $\alpha < 1$ %).

NS : corrélation non significative au risque de 5 %.

Ce tableau permet de voir que I_s est corrélié significativement avec le carbone total, l'azote total et le taux d'argile à l'exclusion des autres variables.

1. Relations entre l'indice d'instabilité, la teneur en carbone total et la mise en culture

Après changement de variable $I_s \rightarrow 100 \cdot \log I_s$, la valeur observée du coefficient de corrélation linéaire ($r = -0,570$) de Bravais-Pearson indiquant une liaison linéaire significative avec un risque inférieur à 1 %, alors une régression linéaire nous permet de proposer une relation entre I_s et Ct de la forme :

$$100 \log I_s = -14,57 Ct + 76,96$$

Pour chaque type de sol, le nombre trop faible de données et les valeurs non significatives de r (au risque de 5 %) ne nous permettent pas de proposer de régression.

La figure 6 semble faire apparaître une influence de la mise en culture sur la teneur en carbone. Le calcul du coefficient de corrélation bisériale ne permet pas de conclure de façon générale à l'existence d'une liaison entre teneur en carbone et mise en culture. Toutefois, un test des signes confirme qu'il existe bien, par paire d'échantillon (prairie - culture) une liaison entre la mise en culture et la variation du carbone total. La mise en culture induit une diminution de la teneur en carbone et corrélativement une augmentation de I_s . Le sol n° 11 Varela fait exception. L'installation d'une prairie artificielle provoque une augmentation de la teneur en carbone organique et on n'observe qu'une très faible diminution de I_s . Ces résultats sont en parfaite conformité avec les structures et les interprétations issues de l'Analyse Factorielle des Correspondances.

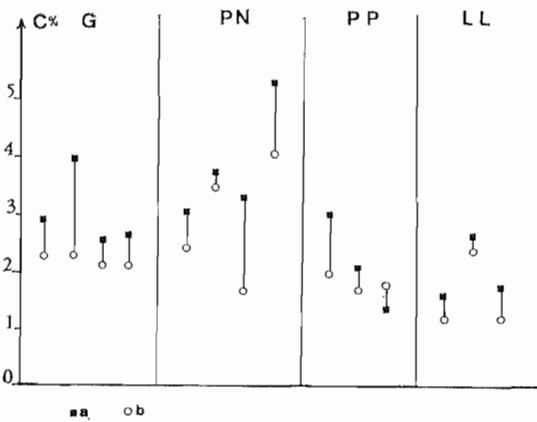


Figure 6 : Variations de la teneur en carbone en fonction du type de sol.

a : sols de prairies ; b : sols cultivés ;
G : grumosols ; PN : praderas grumosols ;
PP : praderas pardas ; LL : planosols.

Total carbon content variations according to the soil type.

a : mead soils ; b : cultivated soils ;
G : grumosols ; PN : praderas grumosols ;
PP : praderas pardas ; LL : planosols.

Tout ceci nous montre que, d'une manière générale, la mise en culture provoque une diminution de la teneur en carbone et par là une augmentation de l'indice d'instabilité structurale.

2. Relations entre l'indice d'instabilité structurale et les teneurs en azote total

Il existe une liaison linéaire significative entre l'indice d'instabilité structurale et la teneur en azote total ($r = -0,591$). La très forte valeur de la pente de la droite de régression donnant $100 \log I_s$ en fonction de N_t :

$$100 \log I_s = -187,056 N_t + 79,21$$

à laquelle correspond une très faible valeur de la pente de la droite donnant N_t en fonction de $100 \log I_s$:

$$N_t = -0,00187 (100 \log I_s) + 0,287$$

nous incite à nous assurer que N_t ne reste pas constant pour diverses valeurs de $100 \log I_s$. La comparaison de cette pente observée ($-0,00187$) à une pente nulle indique une différence significative avec un risque inférieur à 1 %. Donc, malgré la très faible valeur de cette pente, on peut dire que N_t n'est pas constant quand I_s varie et que ces deux variables sont bien dépendantes.

L'existence de liaisons significatives entre $100 \log I_s$ et carbone total, puis entre $100 \log I_s$ et azote total nous incite à rechercher l'existence éventuelle d'une liaison entre carbone et azote. Le coefficient de corrélation $r = 0,974$ indique une liaison linéaire significative avec un risque inférieur à 1 %. La relation correspondante s'écrit :

$$N_t = 0,0987 C_t + 0,009$$

La faible valeur de l'ordonnée à l'origine nous indique que le rapport C/N est presque constant. Donc, si l'on définit le type de matière organique à partir du rapport C/N, celle-ci reste très semblable dans les différents sols étudiés. Les relations définies entre l'indice d'instabilité structurale et le carbone ou l'azote ne dépendent que de la teneur en matière organique totale.

Il n'a été trouvé aucune liaison significative entre l'indice d'instabilité structurale et les rapports humine/carbone total, acides fulviques/carbone total et acides fulviques/acides humiques. Cependant, la matière organique peut être stabilisée par les argiles (Bartoli *et al.*, 1980) aussi convient-il d'analyser l'influence de ces éléments.

3. Relation entre l'indice d'instabilité et la teneur en argiles

Une relation linéaire entre l'indice d'instabilité structurale et la teneur en argile est pour le moins sous-entendue par Hénin [1960] qui dans les comparaisons qu'il effectue à partir de sols reconstitués, fixe la teneur en argile. Kheyrahi *et al.* (1969) ont d'ailleurs bien montré la dépendance de la stabilité structurale avec la texture et l'importance prépondérante de la teneur en argile.

Sans même tenir compte de la nature minéralogique des argiles ou des limons (Cuadrano *et al.*, 1971), sur l'ensemble des sols, nous obtenons :

$$100 \log I_s = -1,456 AR + 87,08 \quad (AR : \% \text{ d'argile}) \text{ avec} \\ r = -0,634 \text{ significatif au risque } \alpha < 1 \%$$

Le coefficient d'instabilité structurale est donc une fonction décroissante de la teneur en argile. Pourtant, on ne trouve pas de corrélation significative entre la teneur en argile et l'indice d'instabilité structurale dans chaque type de sol pris séparément. En fait, le trop petit nombre d'observations ne permet alors pas de conclure valablement car on sort du domaine d'application des méthodes statistiques.

Par contre, quand on regroupe les sols suivant leur utilisation on trouve :

$$100 \log I_s = -1,749 AR + 108,53 \quad (r = -0,790) \text{ pour les sols cultivés et}$$

$100 \log I_s = -1,083 AR + 64,27 \quad (r = -0,601)$ pour les sols laissés en prairie, liaisons significatives avec un risque inférieur à 5 % seulement. Le test de comparaison des pentes montre une différence significative avec un risque de l'ordre de 6 %. La relation n'est pas du même type dans les sols de prairie et dans les sols cultivés. Il apparaît donc que la teneur en argile a une importance plus grande dans les sols cultivés, c'est-à-dire dans les sols où les teneurs en matière organique ont été diminuées, que dans les sols laissés en prairie.

E) Relations entre l'indice d'instabilité structurale et les cations métalliques liés à la matière organique

Les travaux de Greeland [1971], Andreux [1978], Bruckert [1979], Koenings [1979] montrent l'influence des cations Fe et Al dans les forces de liaison organominérales qui contribuent à la stabilité structurale.

Il a donc été recherché s'il existait une relation entre I_s et les taux de fer et d'aluminium liés à la matière organique. Les valeurs calculées de r ne permettent pas (au risque de 5 %) de conclure à l'existence de relations linéaires entre l'indice d'instabilité et la teneur en fer et (ou) en aluminium. Ceci semble en contradiction avec les résultats des auteurs cités ci-dessus, mais ces derniers ont montré cette dépendance dans des sols plus acides que ceux étudiés ici.

F) Relations entre l'indice d'instabilité structurale et les cations échangeables

Quand on recherche sur l'ensemble des sols laissés en prairie la relation qui existe entre I_s et les cations alcalinoterreux échangeables on trouve une relation linéaire :

$100 \log I_s = -0,383 (Ca + Mg) + 30,81$ avec
 $r = -0,637$ (valeur significative au risque de 5 %).

Le calcium et le magnésium échangeables ont donc un effet favorable sur la stabilité des agrégats.

CONCLUSIONS

En raison du nombre relativement faible d'échantillons, sans prétendre à une généralisation, cette étude portant sur les principales classes de sols rencontrés en Uruguay met en évidence 7 points essentiels :

— Les grumosols et les praderas negras ont un indice d'instabilité structurale plus faible que les praderas pardas et les planosols. Ces deux dernières classes de sols risquent alors d'être plus sensibles à l'érosion.

— L'indice d'instabilité structurale augmente quand la teneur en matière organique (carbone et azote) diminue. Il n'y a pas de relations entre l'indice I_s et les rapports humine/carbone total, acides fulviques/carbone total et acides fulviques/acides humiques.

— La mise en culture provoque une diminution notoire de la teneur en matière organique et donc une augmentation de l'indice d'instabilité structurale.

— L'indice d'instabilité structurale diminue quand la teneur en argile augmente.

— Quand, du fait de la mise en culture, le taux de matière organique décroît, la teneur en argile prend une influence prépondérante pour la détermination de l'indice d'instabilité structurale.

— L'augmentation de l'indice d'instabilité structurale due à la mise en culture est plus sensible sur les praderas pardas et les planosols, appauvris en argile, que sur les grumosols et les praderas negras où les teneurs en argile restent élevées.

— Le calcium et le magnésium échangeables favorisent la stabilité des agrégats.

Au total, la mise en culture provoquant une baisse de la teneur en matière organique et n'ayant aucune influence sur les taux d'argile, on mettra en culture préférentiellement les grumosols et les praderas negras. Ces sols présentent déjà un indice d'instabilité structurale très bas ; l'utilisation intensive accroît cet indice mais dans des proportions moindres que dans les praderas pardas ou les planosols.

Reçu pour publication : Mai 1984

Accepté pour publication : Décembre 1984

THE INFLUENCE OF CULTIVATION ON THE STRUCTURAL INSTABILITY OF A FEW URUGUAYAN SOILS

Uruguay is a flat country of mesothermal climate (fig. 1), complex geology (fig. 2) and gramineous steppe vegetation. The recent development of agriculture has brought with it an increasing susceptibility to erosion. Because soils losses are probably related to the structural stability, we propose to study the variations in this parameter with the variables connected to the soil or resulting from cultivation.

The soils chosen belong to groups that cover large areas, and which have been partially cultivated for the last 10 years. These are grumosols (vertisols), praderas negras (brunizems), praderas pardas (brown leached soils) and planosols (hydromorphic soils).

The instability index (Hénin, 1960), (fig. 3) increases from the onset of cultivation, but its variation within soil groups is as large as its variations between groups.

Statistical analyses (Principal Component Analysis, Factor Analysis of Correspondances, Dynamic Cluster Analysis) and various common statistical treatments (fig. 4, 5 and 6) permit the following conclusions :

— *There is no correlation between ls and the iron or aluminium content of the organic matter.*

— *Exchangeable calcium and magnesium promote the stability of aggregates.*

— *The structural instability decreases with increasing contents of both clay and organic matter (carbon and nitrogen).*

— *The grumosols and praderas negras have a lower structural instability index than praderas pardas and planosols. These two latter classes of soils are more sensitive to erosion.*

— *Cultivation provokes a decrease of organic matter and thus an increase of structural instability index.*

— *The increase of structural instability caused by cultivation is higher for praderas pardas and planosols, impoverished in clay, than for grumosols and praderas negras where clay is generally high.*

— *Finally, cultivation should preferentially be done on grumosols and praderas negras.*

BIBLIOGRAPHIE

- ANDREUX F., 1978 — Thèse d'Etat, Univ. Nancy I, 174 p.
- AYRES Q.C., 1936 — Ed. Mc Graw Hill Book Cie, New-York, London, 365 p.
- BARTOLI F., MONROZIER L.J., RAPAIRE J.L., 1980 — C.R. Acad. Sci., Paris, ser. II, p. 183-186.
- BENNET H.H., 1939 — Ed. Mc Graw Hill Book Cie, New-York, London, 993 p.
- BENZECRI J.P., 1973 — Ed. Dunod, Paris, T. 2, 619 p.
- BOHNE H., GRAF VON RIECHEBACH H., HARTGE H. et TIPPKOETTER R., 1979 — Mitt. Dtsch. Bodenkdl. Gesellsch., 29, 1, p. 207-212.
- BOSSI J., 1966 — Ed. Université de la République. Département des Publications, Montevideo, Uruguay, 166 p.
- BOULAIN J., 1968 — Cahiers ORSTOM, Sér. Pédol., VI, 1, p. 35-61.
- BRASESCO R., 1975 — Mimeografiado-Seminario sobre conservacion de suelos. Salto. 16 p.
- BRUCKER S., BONNEAU M. et SOUCHIER B., 1979 — Pédologie, T. 2, Ed. Masson et Cie, Paris, p. 187-209.
- CARTA DE RECONOCIMIENTO DE SUELOS DEL URUGUAY, 1976 — T. 1, Ed. Ministerio de agricultura y pesca, Montevideo, Uruguay, 97 p.
- CAYSSIALS R., LIESEGANG J. et PINEYRUA J., 1978 — Bull. Techn., 4, Direction des sols du Ministre d'Agriculture et de la Pêche de la République d'Uruguay, 34 p.
- CLASSIFICATION DES SOLS, 1967 — Travaux C.P.C.S., multigraph., 87 p.
- COMBEAU A., 1965 — Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., III, 2, p. 123-135.
- COMBEAU A. et QUANTIN P., 1963 — Cahiers O.R.S.T.O.M., Sér. Pédol., 3, p. 17-26.
- COMBEAU A. et QUANTIN P., 1964 — Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., II, 1, p. 3-11.
- CUADRANO SANCHEZ S., FIES J.C. et MONNIER G., 1971 — Sci. Sol, 2, p. 27-35.
- DIDAY, 1972. Rev. Stat. Appl., Paris, 19, 2, p. 19-33.
- DOTTI R., 1979 — Symposium Internacional sobre la erosion de suelos en Rio de la Plata, Buenos Aires, Argentina, 2 p.
- FAVROT J.C., 1971 — Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., IX, 2, p. 205-237.
- GODEFROY J. et JACQUIN F., 1975 — Fruit, 30, 10, p. 595-612.

- CAYSSIALS R., 1979 — Bull. Tech. 1, Direction des sols, Ministère de l'Agriculture et de la pêche de la République d'Uruguay, 45 p.
- GIRARD M.C., 1973 — Thèse Sciences, Paris — Sols n° 12, 430 p.
- GREENLAND D.J., RIMMER D. et PAYNE D., 1975 — J. Soil Sci, 26, 3, p. 294-303.
- HENIN S., 1960 — Ed. Masson, Paris, 320 p.
- KAEMMERER M., 1979 — Thèse 3^e cycle, Inst. Nat. Polytech. Lorraine, Nancy, 117 p.
- KHEYRABI D.J. et MONNIER G., 1969 — Ann. Agr. T. 19, p. 129.
- KOENIGS F.F.R., 1979 — Mitt Dtsch. Bodenkd. Gesellsch., 29, 2, p. 1075-1090.
- KOHNKE H. et BERTRAND A.R., 1959 — Ed. Mc Graw Hill Book Cie, New-York, Toronto, London, 298 p.
- MEESTER T. (De) et JUNGERIUS P.D., 1978 — Earth surf. Processes, 3, 4, p. 379-391.
- PEGUY C., 1970 — Ed. Masson et Cie, Paris, 468 p.
- ROSSIGNOL J.P., 1981 — Thèse 3^e cycle, E.N.S.A. et Univ. Rennes I, 255 p.
- SOURDAT M., 1967 — Cahiers O.R.S.T.O.M., sér. Pédol., V, 1, p. 83-101.
- TISDALL J.M., COCKROFT B. et UREN N.C., 1978 — Austral. J. Soil Res., 16, 1, p. 9-17.
- TURENNE J.F., 1977 — Nouv. Agron. Antilles Guyanne, 3, 3-4, p. 192-203.
- WISCHMEIER W.H., 1968 — 7^e Cong. Intern. Soil Sci. Soc. Trans., 1, 2, p. 418-425.