

Université Paris XII  
Val de Marne  
UFR de Sciences  
Et Technologies

Orstom-Universidad Central  
Quito, Equateur

**D.E.S.S.**

«Gestion des Systèmes Agro-Sylvo-Pastoraux en Zones Tropicales»

Promotion N° 8

Mémoire de Stage

« Contribution à l'étude de certains paramètres physiques  
d'un sol volcanique induré (*cangahua*) réhabilité »

par

**Silvia RITOSSA**

Année 1997/1998

IRD  
Centre de documentation  
Aparado 17-12-857  
Quito-Equateur

APR 15 1999

Maître de stage : M. Pascal Podwojewski, M.Yann Leroux , M.Jean-Louis Janeau.  
ORSTOM, A.P. 17 12 857, Quito, Ecuateur.

Superviseur de Stage : M.Georges De Noni.  
ORSTOM, 911 Av. D'Agropolis, BP 5045, 34032 Montpellier Cedex 1.

Directeur du D.E.S.S. : Pr. E. GARNIER-ZARLI



Fonds Documentaire ORSTOM  
Cote : A 18133 Ex : ...

91 63  
RIT

## Remerciements

Avant de commencer j'aimerais remercier des gens qui m'ont suivi et aidé pendant la réalisation de ce travail.

Merci à Yann Leroux pour son accueil chaleureux et le soutien moral et scientifique qui ne m'ont jamais abandonné tout au cours de ces six mois de stage en Equateur.

Merci à M. Pascal Podwojewski pour son encadrement et son suivi même loin de l'Equateur.

J'aimerais remercier du fond du cœur M. Jean-Louis Janeau, la crème des conseillers scientifiques, pour sa disponibilité de tous les instants et.....merci encore pour toutes les fleurs !!

Je tiens à remercier aussi l'Universidad Central qui m'a permis d'utiliser les laboratoires de Tumbaco. Merci à Edison pour ses conseils précieux lors des manipulations et à Paty Aymara pour toutes les analyses du sol qu'elle a dû faire.

Merci à Victor et Luiss pour avoir rendu plus ensoleillées les journées passées à simuler la pluie!

Merci à Gwenaëlle Menez pour son aide lors de la révision du mémoire et pour ses corrections de mon français pas terrible.

Enfin mon Yves, merci pour tes sourires vespéraux au Pobre Diablo, devant un canelazo, après de journées difficiles.

# SOMMAIRE

Liste des illustrations  
Liste des abréviations

I. INTRODUCTION .....	1
II. CARACTERISATION DE LA ZONE ETUDIEE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE .....	3
II.1 Localisation.....	3
II.1.1 Localisation de la zone interandine et de la cangahua.....	3
II.1.2 Localisation de l'essai.....	4
II.2 Le climat.....	4
II.3 La cangahua.....	4
II.3.1 L'origine de la cangahua.....	5
II.3.2 La composition de la cangahua et ses caractéristiques chimiques et physiques.....	5
II.3.3 La réhabilitation et la conservation de la cangahua .....	6
II.3.4 Conclusions sur l'état des connaissances relatives à la productivité de la cangahua réhabilitée et objectif de cette étude.....	7
III. MATERIELS ET METHODES.....	9
III.1 L'essai au champs.....	9
III.1.1 Disposition des parcelles .....	9
III.1.2 Les traitements du sol.....	9
III.1.2.1 Les traitements mécaniques.....	9
III.1.2.2 Les traitements agronomiques.....	10
III.1.3 Mesures des rendements.....	12
III.1.4 La simulation de pluie.....	12
III.1.4.1 Description du matériel.....	12
III.1.4.2 L'utilisation du simulateur .....	14
III.1.5 Le point quadrat .....	14
III.1.6 La stabilité structurale.....	15
III.1.7 Mesure de l'humidité.....	15
IV. RESULTATS ET LEUR INTERPRETATION.....	16
IV.1 La fertilité du sol et le rendement de la culture de pois .....	16
IV.2 Les propriétés hydrodynamiques.....	17
IV.2.1 Bilan hydrique des parcelles .....	17
IV.2.1.1 L'infiltration minimale $F_n$ .....	19
IV.2.1.2 L'humidité du sol en fonction de la profondeur.....	23
IV.2.1.3 La pluie d'imbibition ( $P_i$ ) et sa relation avec l'humidité du sol.....	23

IV.2.1.4 La relation entre la lame ruisselée (Lr) et la pluie utile (Pu).....	23
IV.2.1.5 Le coefficient de ruissellement (Kru) pour la totalité des pluies.....	26
IV.2.2 Les états de surface du sol.....	26
IV.2.3 Evolution des états de surface.....	28
IV.2.4 Evolution de l'infiltration suivant les états de surface.....	30
IV.2.5 L'indice de rugosité IR .....	30
<b>IV.3 Transport solide .....</b>	<b>33</b>
<b>IV.4 Les caractéristiques physiques et chimiques du sol (stabilité structurale, densité apparente, taux de matière organique) .....</b>	<b>35</b>
IV.4.1 La stabilité structurale.....	35
IV.4.2 Le taux de matière organique et la densité apparente .....	37
<b>V. DISCUSSION.....</b>	<b>38</b>
<b>V.1 Le comportement hydrodynamique des parcelles expérimentales.....</b>	<b>38</b>
<b>V.2 La sensibilité à l'«érosion» des parcelles expérimentales.....</b>	<b>38</b>
<b>V.3 Les relations entre la stabilité et la fertilité dans les parcelles organiques</b>	<b>38</b>
<b>V.4 Les relations entre stabilité et fertilité dans les parcelles chimiques ....</b>	<b>39</b>
<b>VI. CONCLUSION .....</b>	<b>40</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>41</b>
<b>ANNEXES</b>	
<b>Annexe I.</b> Localisation de la zone d'étude en Amérique du sud.	
<b>Annexe II.</b> Carbone organique total.	
<b>Annexe III.</b> Mesures de stabilité structurale.	
<b>Annexe IV.</b> L'intensité d'infiltration minimale $F_n$ , l'intensité de ruissellement maximal $R_x$ , la pluie d'imbibition $P_i$ , la pluie utile $P_u$ , la lame ruisselée $L_r$ et le coefficient de ruissellement $K_{ru}$ pour l'ensemble des parcelles.	
<b>Annexe V.</b> Pourcentages de recouvrement des composantes de la surface des parcelles avant les pluies.	
<b>Annexe VI.</b> Pourcentages de recouvrement des composantes de la surface des parcelles après les pluies.	
 <b>Résumé, Abstract, Resumen</b>	

## Liste des illustrations.

### Liste des figures.

<b>Figure 1.</b> Localisation de la Sierra et de <i>lacangahua</i> . en Equateur	2
<b>Figure 2.</b> Localisation de la zone d'étude dans le contexte paysager et climatique	3
<b>Figure 3.</b> Schéma du simulateur de pluie	11
<b>Figure 4.</b> Schéma du point quadrat	13
<b>Figure 5.</b> Variation de l'intensité d'infiltration ( $F_n$ ) et de l'intensité $I$ en fonction du temps dans les parcelles traitées avec engrais organique	18
<b>Figure 6.</b> Variation de l'intensité d'infiltration ( $F_n$ ) et de l'intensité $I$ en fonction du temps dans les parcelles traitées avec engrais chimique	20
<b>Figure 7.</b> Variation de l'humidité du sol en fonction de la profondeur dans les parcelles traitées avec engrais organique	22
<b>Figure 8.</b> Variation de l'humidité du sol en fonction de la profondeur dans les parcelles traitées avec engrais chimique	24
<b>Figure 9.</b> Variation de la hauteur de la pluie d'imbibition ( $P_i$ ) en fonction de l'humidité du sol, mesurée avant les pluies, entre 0 et 10 cm de profondeur	25
<b>Figure 10.</b> Variation de la hauteur de la lame ruisselée ( $L_r$ ) en fonction de la hauteur de la pluie utile ( $P_u$ ) au cours de la première pluie	25
<b>Figure 11.</b> Evolution des organisations superficielles avant et après les pluies	27
<b>Figure 12.</b> Variation de la pluie d'imbibition ( $P_i$ ) en fonction de la modification des états de surface dans les parcelles traitées avec engrais organique	29
<b>Figure 13.</b> Variation de la pluie d'imbibition ( $P_i$ ) en fonction de la modification des états de surface dans les parcelles traitées avec engrais chimique	29
<b>Figure 14.</b> Evolution des sédiments transportés en fonction de la lame ruisselée ( $L_r$ ) au cours des trois averses dans les parcelles traitées avec engrais organique	32
<b>Figure 15.</b> Evolution des sédiments transportés en fonction de la lame ruisselée ( $L_r$ ) au cours des trois averses dans les parcelles traitées avec engrais chimique	34
<b>Figure 16.</b> Stabilité des agrégats en sec et en humide, selon leur taille, et pourcentage d'agrégats instables en humide (AIH) dans les parcelles traitées avec engrais organique	36
<b>Figure 17.</b> Stabilité des agrégats en sec et en humide, selon leur taille, et pourcentage d'agrégats instables en humide (AIH) dans les parcelles traitées avec engrais chimique	36

## Liste des tableaux.

<b>Tableau I.</b> Précipitations et ETP mensuelles pour la période Juillet 1997 - Juin 1998	4
<b>Tableau II.</b> Caractérisation granulométrique et chimique du sol	6
<b>Tableau III.</b> Les parcelles expérimentales dans le site d'étude	9
<b>Tableau IV.</b> Disposition des traitements mécaniques du sol grossier et fin dans les parcelles (P)	10
<b>Tableau V.</b> Calendrier cultural du cycle de culture précédant la simulation de pluie	10
<b>Tableau VI.</b> Récapitulation des traitements sur les parcelles	11
<b>Tableau VII.</b> Rendement des plants de pois	16
<b>Tableau VIII.</b> Moyenne des coefficients de ruissellement (Kru) en fonction de la pluie utile (Pu)	26
<b>Tableau IX.</b> L'indice de rugosité IR avant la première pluie p1 et après la troisième pluie p3	31
<b>Tableau X.</b> Différence moyenne de l'indice de rugosité IR avant et après les averses dans chaque parcelle	31
<b>Tableau XI.</b> Charges solides (g/m <sup>2</sup> ) et lames ruisselées (mm) pour les parcelles à traitement organique	33
<b>Tableau XII.</b> Charges solides (g/m <sup>2</sup> ) et lames ruisselées (mm) pour les parcelles à traitement chimique	33
<b>Tableau XIII.</b> Récapitulation des propriétés physiques et chimiques des parcelles	37

## Liste des abréviations

P	parcelle
p	pluie (p1, p2 et p3, première, deuxième et troisième pluie)
E.O.G.	Traitement avec engrais organique et préparation grossière du sol
E.O.F.	Traitement avec engrais organique et préparation fine du sol
E.C.G.	Traitement avec engrais chimique et préparation grossière du sol
E.C.F.	Traitement avec engrais chimique et préparation fine du sol
I	Intensité de la pluie
Fn	Intensité d'infiltration minimale
Hum	Humidité du sol
Pi	Pluie d'imbibition
Pu	Pluie utile
Lr	Lame ruisselée
Kru	Coefficient de ruissellement

## I. INTRODUCTION

Le nord de la Sierra équatorienne est constitué de sols d'origine volcanique souvent représentés par des formations de cendres meubles ou pyroclastes. Ces sols sont le lieu d'une culture intensive et la densité de population rurale y est très forte (parfois supérieure à 100 habitants par km<sup>2</sup>), en majeure partie indigène. L'agriculture vivrière développée par les paysans, parfois sur forte pente, fournit l'essentiel des aliments de consommation aux zones urbaines.

Cette agriculture est concentrée dans une frange d'altitude comprise entre 2600 et 3600 mètres. Durant ces vingt dernières années, la forte progression démographique et le morcellement des terres cultivées, suite à la réforme foncière, ont provoqué une pénurie de nouvelles terres (Barsky, 1980 et 1984 ; Costales, 1971 ; De Noni et Viennot, 1995). Les petits agriculteurs, rélégués vers les zones hautes, appelées *páramos*, ont été obligés de mettre en valeur ces terres malgré les risques de gel et les chutes de fertilité (dues à des phénomènes d'alumino-toxicité). L'expansion anthropique sur les grands pâturages de montagnes, à l'origine constitués de sols assez stables, a modifié profondément la végétation naturelle ainsi que le mode de fonctionnement de l'écosystème d'altitude qui représente, en plus, le château d'eau de la Sierra.

Les zones en contrebas, comprises entre 2200 et 2800 mètres, sont en général occupées par des sols volcaniques indurés. La partie supérieure de ces sols est constituée de cendres récentes meubles qui, en s'érodant par une mécanisation mal maîtrisée comme ce fût le cas à l'époque des grandes haciendas du début du siècle, mettent à nu des cendres anciennes consolidées appelées localement *cangahua*.

La réhabilitation de ces surfaces indurées a été une problématique commune à d'autres pays dont le Mexique (*tepetates*) ou le Nicaragua (*talpetates*). Aussi l'ORSTOM en collaboration avec l'Université de Giessen (Allemagne) et le Mexique, l'Equateur et le Chili a-t-il mis en œuvre deux programmes d'étude financés par la CEE de 1990 à 1996 (Quantin *et al.*, 1992) qui se sont terminés par une synthèse générale l'an passé (Zebrowski *et al.*, 1997). Ces études, qui se sont en grande partie déroulées au Mexique, ont donné certaines indications quant aux étapes à suivre pour réhabiliter la *cangahua* (Arias, 1992 ; Marquez-Ramos, Zebrowski et Navarro-Garza, 1992 ; Quantin et Zebrowski, 1995).

Le programme, dans lequel s'insère cette étude, est un programme de faisabilité : comment se comporte la *cangahua* réhabilitée avec différents types d'engrais ou différents types de préparation du sol, en suivant les techniques déjà utilisées par expérimentation dans d'autres pays comme le Mexique. En se basant sur un essai au champ, l'étude simple des rendements ne donne un aperçu que ponctuel sur la fertilité d'un sol. Il ne rend pas bien compte de son comportement à plus long terme, en particulier son comportement physique (quant à la porosité, perméabilité, érodibilité).

Cette étude porte donc sur l'analyse de certains paramètres physiques, en particulier la résistance à l'érosion, par la méthode de la simulation de pluie, pour donner une idée de la structuration du sol, essentielle pour assurer une fertilité durable au sol même.

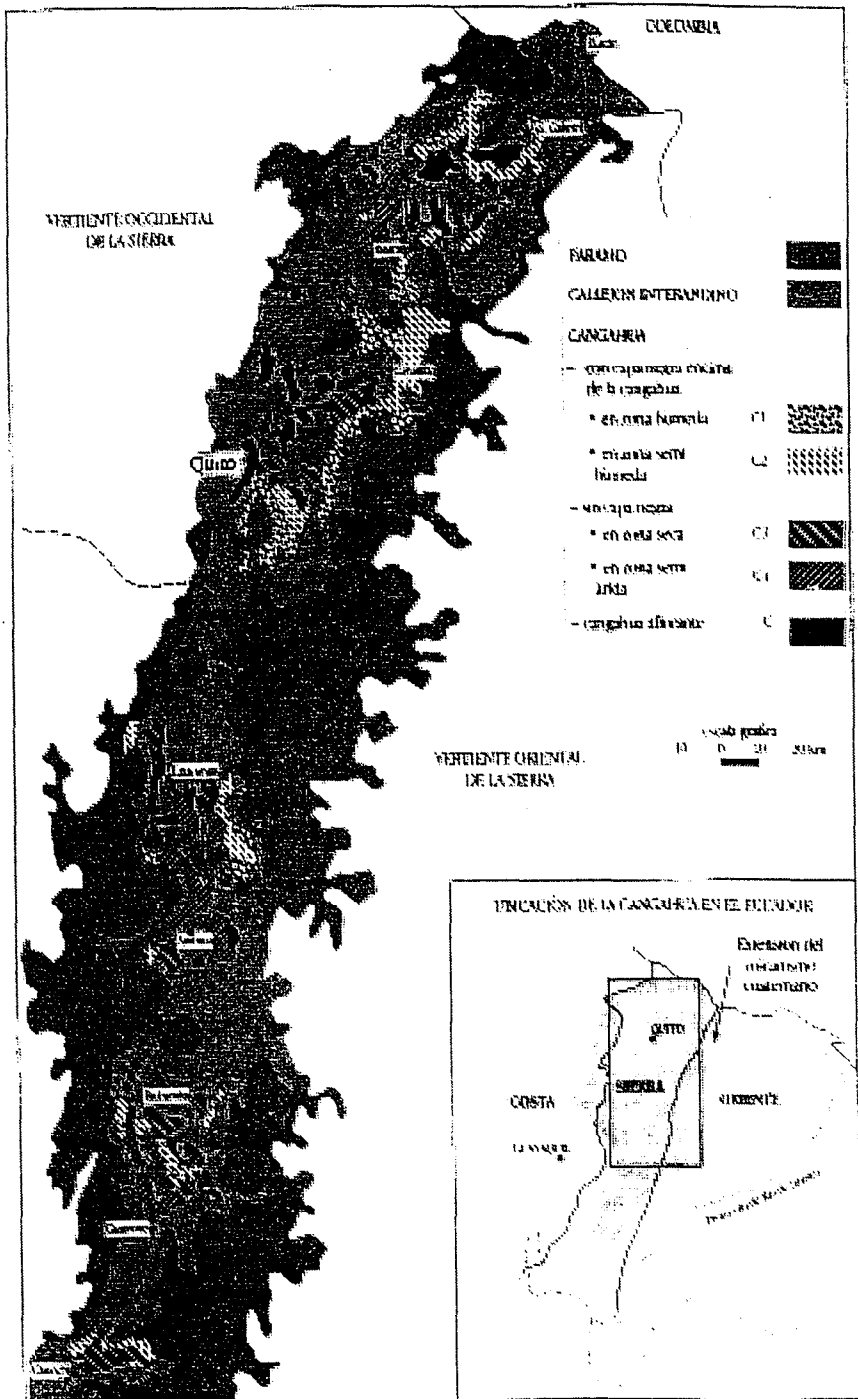


Figure 1. Localisation de la Sierra et de la *cangahua* en Equateur (d'après Zebrowski *et al.*, 1997).



## II. CARACTERISATION DE LA ZONE ETUDIEE ET PROBLEMATIQUE DE L'ETUDE

### II.1 Localisation

La position de l'Equateur en Amérique du sud et la carte de la zone d'étude à proximité de la capitale Quito sont présentées dans l'annexe I.

#### II.1.1 Localisation de la zone interandine et de la cangahua

La montagne andine est divisée en deux cordillères parallèles, qui atteignent environ 4000 mètres, entre lesquelles se situe une étroite dépression, large jusqu'à 40 km, dont l'altitude varie de 2200 m à 3800 m et qui est aussi appelée «couloir» interandin.

La Sierra s'étend du nord au sud de l'Equateur (fig. 1) et représente le type de paysage où se retrouvent le plus souvent les sols volcaniques indurés.

Ces sols volcaniques, appelés *cangahua*, sont localisés dans la partie septentrionale du couloir interandin (fig. 2).

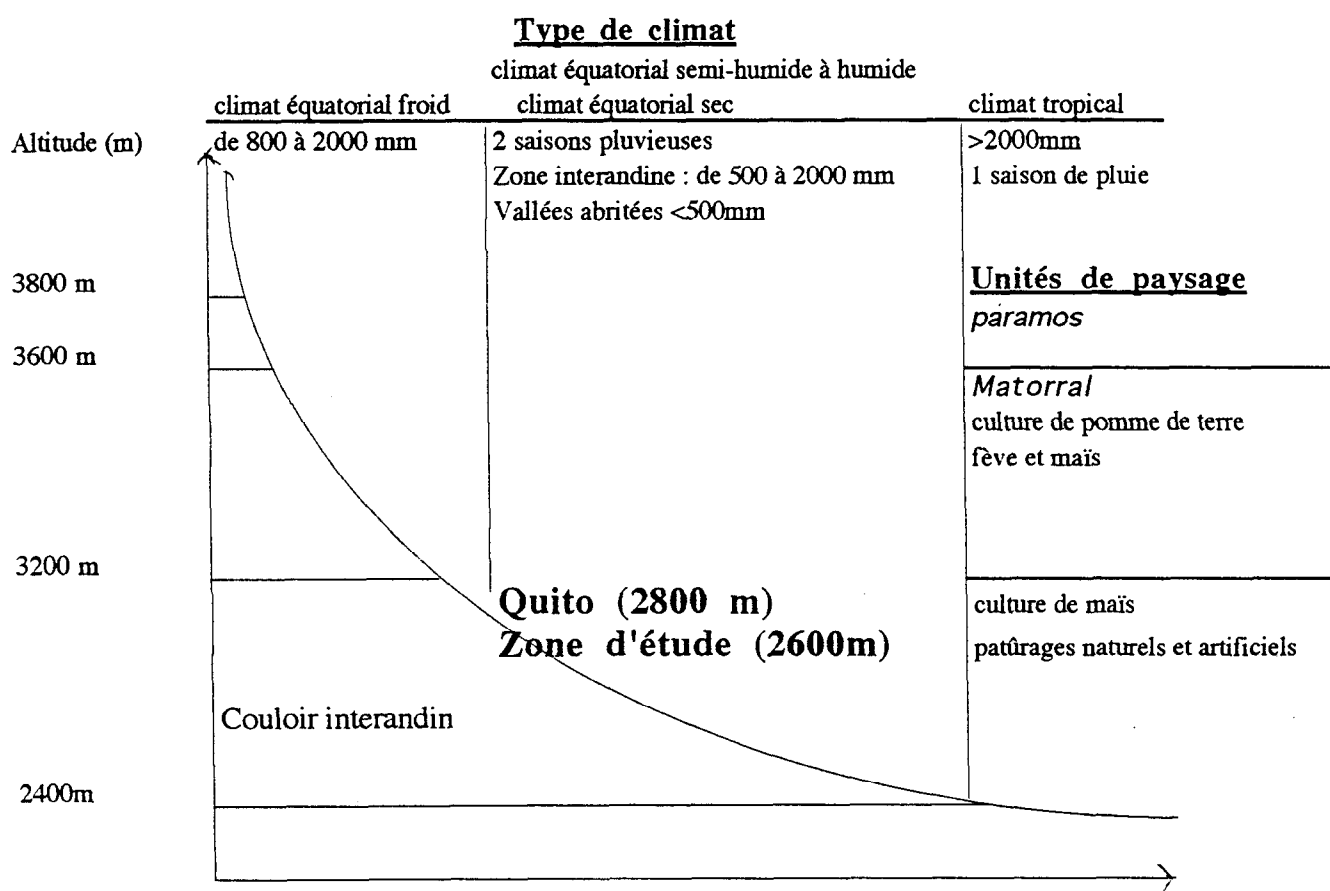


Figure 2. Localisation de la zone d'étude dans le contexte paysager et climatique.

## II.1.2 Localisation de l'essai

Le site d'expérimentation de notre étude se trouve au pied du volcan Ilalo, près du village de Tumbaco, à proximité de la capitale (20 km à l'est de Quito). La station, connue sous le nom de « La Tola », est située au bord d'une plaine à 2600 m d'altitude qui débouche dans une vallée encaissée de 50 m de profondeur.

Le site se trouve dans l'enceinte du terrain de la faculté d'agronomie de l'Université Centrale de l'Equateur ; sa position est particulièrement favorable du fait de la proximité des laboratoires de l'université et des possibilités d'irrigation que cette zone peut offrir.

Cet endroit, où les affleurements de *cangahua* s'étendent jusqu'à devenir la partie prédominante du paysage, paraît bien représenter l'aspect des versants internes de la cordillère andine, pour la composition du sol et son utilisation après réhabilitation de la *cangahua* (Custode *et al.*, 1992).

## II.2 Le climat

Le climat de cette région de l'Equateur est un climat typique des régions de montagne équatoriales. Les températures annuelles sont assez douces (la T. moy. est de 16°C) sans variations mensuelles remarquables au cours de l'année. L'insolation est élevée, atteignant les 2000 heures par an.

Deux saisons sèches s'alternent avec deux saisons humides, tempérées par l'effet de l'altitude; la petite saison sèche qui va du mois de Décembre à Février, est caractérisée par un déficit hydrique qui devient plus élevé pendant la longue saison sèche de Juin à Septembre : où les vents chauds, très secs et très forts, qui accompagnent la pénurie de précipitations, peuvent provoquer une déshydratation accélérée des sols.

Si les températures ne présentent pas de fortes variations intermensuelles et interannuelles, cela n'est pas le cas des précipitations. Grâce à la présence d'une station météorologique très proche du site nous disposons des données de précipitations et d'ETP de la zone.

Le tableau I présente, pour les années 1997 et 1998, les précipitations et l'évapotranspiration potentielle. On y constate que pour ces deux années les valeurs obtenues se situent dans la moyenne des 20 dernières années.

Tableau I. Précipitations et ETP mensuelles pour la période Juillet 1997 - Juin 1998.

Année Mois	1997						Total	1998						Total
	Jt	A	S	O	N	D		J	F	M	A	M	J	
P (mm)	5,5	0,6	97,8	132,2	158	102,1	496,2	77,2	51,9	86,2	53,4	105,4	15,2	389,3
ETP (mm)	252,5	245,2	141,3	118,4	81,7	129,5	888,6	144,5	119,7	100	94,7	105,8	119,8	684,5

## II.3 La *cangahua*

La *cangahua* est un matériel fin induré de couleur kaki-orangé altéré par des processus de météorisation. Ce type de sol se compose de vitre volcanique altérée et d'autres minéraux volcaniques comme les plagioclases, les hornblendes, etc. Sa composante vitreuse s'altère au cours du temps et avec l'humidité, ce qui provoque la formation d'allophane et de minéraux argileux (spécialement haloisite et montmorillonite) (Maldonado, 1973).

Les sols caractérisés par une couche minimum de *cangahua* de 20 cm occupent environ 20% des terres cultivables de la Sierra septentrionale et centrale.

### ***II.3.1 L'origine de la cangahua***

Le mot quechua *cangahua* signifie terre dure et stérile (Custode *et al.*, 1992). Il s'agit de couches dures qui apparaissent souvent à la surface des terres cultivées, après l'érosion du sol superficiel.

Les questions concernant la genèse de ce type de sol sont encore ouvertes, mais les géologues s'accordent sur le fait que la *cangahua* est une formation dérivant de cendres volcaniques anciennes indurées (Entisols). Son origine remonte à plus de 10 000 ans (Winckell et Zebrowski, 1992), période durant laquelle les retombées pyroclastiques se sont indurées juste au moment de leur dépôt.

Ces matériaux pyroclastiques (dont l'épaisseur peut atteindre 30-40 m) se sont déposés, en effet, au cours d'éruptions énormes de type phréato-magmatique avec une cimentation rapide rendue possible par un paléoclimat très sec concordant avec la dernière période glaciaire. Sur ces formations anciennes se sont ensuite déposées en plusieurs cycles des cendres meubles, qui se sont altérées au cours d'une période plus humide plus récente.

L'induration des cendres paraît être due ici à des ciments siliceux, et, même si existent des doutes à ce propos (Quantin, 1997), il paraît peu probable qu'elle soit due aux carbonates qui apparaissent sous forme d'une croûte fine (1-3 cm d'épaisseur) entre 15 et 30 cm sous la surface.

Du fait de la transition brutale entre cendres anciennes indurées et cendres récentes meubles (qui sont très sableuses et n'ont pas une stabilité structurale très forte), cette surface de séparation sert aussi de niveau de décollement lors des phases d'érosion mettant à nu la *cangahua*.

### ***II.3.2 La composition de la cangahua et ses caractéristiques chimiques et physiques***

La différenciation des couches des sols développés au dessus de matériaux anciens augmente avec l'altitude. Dans les régions semi-arides et sèches à l'est de Quito le matériel est peu altéré ; les paléosols correspondent à une succession de couches de type « C » très dures où sont fréquentes des concrétions de carbonate de calcium (Zebrowski *et al.*, 1997)

En région semi-humide les sols présentent par contre une succession de couches bien différenciées qui comprennent :

- une couche humifère noire argileuse, très compacte, à propriétés vertiques ;
- une couche « B » argileuse où l'on peut rencontrer des concrétions calcaires ;
- une succession de couches « C » très dures.

Dans le bassin de Quito, sous l'effet de l'érosion, la *cangahua* affleure après le décapage de l'horizon argileux noir très fertile.

L'habilitation de la *cangahua* comme terre cultivée exige une amélioration de certaines propriétés physiques et chimiques relatives à la productivité du sol. Nous nous référons, ici, aux propriétés physiques qui favorisent la croissance et le développement des racines et la capacité de stockage de l'eau ; aux propriétés biochimiques comme la présence d'une source de carbone

disponible qui permette un bon fonctionnement de l'activité microbienne ; aux propriétés chimiques, enfin, relatives à la nutrition des plants cultivées.

D'après Etchevers (1997) nous pouvons résumer certaines caractéristiques des sols volcaniques liées à leur productivité et les appliquer au cas de la *cangahua* non réhabilitée :

- La disponibilité d'azote et de phosphore est très faible, ce qui empêche un bon développement des plantes. Par contre, les restant éléments essentiels, Ca, Mg, et K, sont présents en quantité suffisante.
- La faible concentration de carbone, en particulier de carbone soluble, provoque une faible activité microbienne. Par conséquent, le taux de matière organique, strictement lié à l'apport de substances nutritives et aux propriétés physiques du sol, est très bas.
- Le pH des sols volcaniques comme la *cangahua* est neutre ou légèrement alcalin, ce qui favorise le développement des plantes. Cependant, la fréquente présence de carbonate de calcium en concentration supérieure à 51% affecte la subministration des éléments nutritifs aux cultivations.
- Ce sol présente des réserves en cations remarquables.
- La granulométrie, selon les analyses faites par le CIRAD de Montpellier (tab. II), est typique des sables fins, à faible dominance d'argiles.
- La capacité d'échange moyennement forte ( $> 15 \text{ cmkg}^{-1}$ ) permet une certaine capacité de rétention d'eau et de substances nutritives.
- La densité apparente de ce type de sol non réhabilité est environ de  $1,6 \text{ g/cm}^3$ . La porosité totale peut atteindre le 50 % mais la macroporosité est très faible, ce qui rend difficile la pénétration des racines, de l'air et de l'eau.

Tableau II. Caractérisation granulométrique et chimique du sol (source

Granulométrie (%)					Matière organique				Ptot	Propriétés d'échange					pH	
A	LF	LG	SF	SG	%	%	%	C/N	ppm	cmol. kg <sup>-1</sup>					eau	KCl
					M.O.	C	N		P	Ca	Mg	K	Na	CEC		
15,0	15,9	12,4	44,2	12,4	0,71	0,41	0,54	7,59	457	7,88	5,52	0,68	0,40	18,8	6,85	5,20

### II.3.3 La réhabilitation et la conservation de la *cangahua*

Suite à l'observation des caractéristiques chimiques et physiques de la *cangahua*, son réintégration au domaine agricole devient une nécessité impérieuse.

D'après De Noni *et al.* (1997), la réhabilitation de ce sol est possible à condition de passer par des opérations manuelles ou mécaniques de défonçage qui visent à rompre la cohésion du matériel induré. Les propriétés physiques de ces sols peuvent, en effet, être améliorées par la fragmentation du sol, même si les dimensions des agrégats pour une efficace réhabilitation doivent rester entre 3 et 5 mm. Cependant, ce sol roturé et affiné devient très sensible à l'érosion, ainsi que sa durabilité et sa productivité ne sont pas assurées (Trujillo et Arias, 1997).

Par ailleurs, l'amélioration des propriétés physiques ne suffit pas à garantir la productivité des sols volcaniques lorsqu'il n'est pas accompagné par des traitements de fertilisation :

- afin d'améliorer la fertilité de ce sol l'apport d'azote et de phosphore est nécessaire. La disponibilité de phosphore est limitée mais sa capacité d'absorption est élevée, ce qui permet d'augmenter facilement sa concentration par un apport de substances fertilisantes inorganiques (engrais phosphatés très solubles) ;
- la stabilité structurale du sol et le taux de matière organique étant faibles, l'apport d'engrais organique associé à une gestion adéquate des résidus des cultures, est indispensable pour améliorer les propriétés physiques et, en général, la fertilité du sol. (Etchevers *et al.*, 1992).

L'incorporation de la *cangahua* à l'agriculture a été réalisée de façon traditionnelle jusqu'aux années '70. Ensuite, lors de l'introduction des méthodes mécanisées, les agriculteurs équatoriens, ont continué à utiliser des techniques culturales anciennes pour travailler la *cangahua*, différemment des mexicains dans le cas des *tepetates*.

La roturation de l'horizon induré est, en effet, encore pratiquée manuellement par les paysans les plus pauvres. Pendant la saison des pluies, lorsque le sol humide devient plus facile à travailler, la *cangahua* est cassée en blocs qui sont laissés à la surface pendant quelque mois. Ensuite, le *campesino* (paysan) ajoute du fumier qui lui provient de son bétail et le mélange au sol avant de semer. Cette pratique, la plus répandue en Equateur, est grossière et n'est pas favorable au bon développement des plantes.

Les méthodes mécanisées ne sont appliquées que rarement par les agriculteurs, qui doivent disposer des moyens financiers pour acheter un bulldozer. La dimension optimale des agrégats qu'on doit obtenir est difficilement déterminable, car il faut tenir compte en même temps d'une optimisation de la rétention d'eau et une minimisation des risques d'érosion du sol (Zebrowski et Sanchez, 1997).

Pour ce qui concerne les méthodes de conservation anti-érosive l'Equateur n'en connaissait presque aucune jusque dans les années '80. A cette époque, des programmes comme le Programa Nacional de Conservación de Suelos PRONACOS, le Proyecto de Manejo y Uso Sostenible de Tierras Andinas PROMUSTA (Projet de gestion et utilisation durable des terres andines) et le Proyecto de Conservación de Suelos y Sistemas Agro-sylvo-pastorales PROCOSA diffusèrent certaines méthodes de conservation de la *cangahua*.

Le ministère de l'agriculture et élevage (MAG) réalisa des essais de terrassement de formation lente dans le cadre de la réhabilitation de ce sol. Cette technique est intéressante surtout parce que les coûts de construction des terrasses sont plus bas que dans le cas du terrassement plan. Les blocs de *cangahua*, formés lors du travail du sol, sont disposés en forme de murets dont la fonction est de retenir la terre. C'est la terre même qui, ensuite, forme les terrasses (De Noni *et al.*, 1997).

Une méthode alternative de conservation du sol érodé et induré est constituée par la reforestation. En Equateur la reforestation réalisée par le ministère de l'agriculture et de l'élevage (MAG) avec des arbres d'eucalyptus n'a pas donné de résultats, l'espace pour le développement de l'arbre et les œuvres de protection contre l'érosion étant limités.

### **II.3.4 Conclusions sur l'état des connaissances relatives à la productivité de la *cangahua* réhabilitée et objectif de cette étude**

Dans le contexte du paysage agricole équatorien, la *cangahua* représente un sol à très faible productivité en raison des mauvaises pratiques culturales appliquées par les agriculteurs de bas niveau d'instruction et aux moyens de production quasiment inexistantes.

La productivité est alors forcément destinée à l'autoconsommation et les paysans doivent souvent chercher des sources de revenus extérieures. Certains d'entre eux, les plus jeunes, s'orientent vers une production destinée à la vente en ayant recours à une main d'œuvre extérieure et ils réussissent à atteindre parfois le limite minimum de production même en surfaces inférieures à 1 hectare.

L'incorporation à l'agriculture des zones érodées est fondamentale afin d'augmenter la surface agricole utile.

L'apport de matière organique suffisante à garantir une production élevée est incompatible avec la réalité du monde *campesino* sudaméricain. Le fumier coûte cher et son application, malheureusement toujours en doses limitées, est possible seulement lorsque les terres sont à proximité des fermes.

L'autre possibilité ou mieux l'autre type d'amendement indispensable pour la fertilité de la *cangahua*, les engrais chimiques, sont souvent mal employés par le paysan qui apprécie mal les propriétés de ce sol et qui fertilise toutes ses cultures de la même façon. Les apports de fertilisants chimiques, en effet, sont souvent trop réduits par rapport aux doses nécessaires.

Des enquêtes intéressantes ont été conduites par Gasselin (1995) sur le type de récupération de la *cangahua* gerée par les agriculteurs : sur le 69 % des enquêtés le 86 % a récupéré ses terres de façon manuelle par faute de connaissances et de moyens économiques, ce qui ne peut certes pas conduire à une correcte réhabilitation du sol. La *cangahua* possède, pourtant, une potentialité agronomique trop importante qui ne peut pas être négligée, parce qu'elle permet une vaste gamme de cultivations.

Cependant, les coûts élevés des projets de réhabilitation des zones érodées ne peuvent pas être soutenus par le paysannat et doivent donc prévoir des programmes d'aides gouvernementales.

Dans le cadre général des sols à *cangahua* équatoriens on peut comprendre l'intérêt de cette étude qui a pour objectif l'amélioration de la fertilité à travers des amendements qui enrichissent les sols en azote et phosphore et l'augmentation de sa résistance vis à vis de l'érosion grâce aux apports organiques qui améliorent sa stabilité structurale, donc sa productivité à long terme.

### III. MATERIELS ET METHODES

#### III.1 L'essai au champ

Bien que nous présentions tout le dispositif expérimental, il est important de préciser que notre étude ne porte que sur quatre parcelles suite à une analyse préliminaire des mesures de fertilité :

- Parcelles avec apport organique et préparation grossière de la surface (P2) ;
- Parcelles avec apport organique et préparation fine de la surface (P4) ;
- Parcelles avec apport chimique et préparation grossière de la surface (P7) ;
- Parcelles avec apport chimique et préparation fine de la surface (P9).

##### III.1.1 Disposition des parcelles

Afin d'étudier les caractéristiques hydriques du sol et leur rôle sur le rendement et la fertilité, nous avons implanté, sur une superficie totale couvrant environ 1000 m<sup>2</sup>, 10 parcelles expérimentales de 22,5 m de long sur 4,5 m de large (avec une partie cultivée d'environ 100 m<sup>2</sup> chacune), disposées en cinq niveaux de terrasses sur une surface à faible pente (maximum 5%) pour la région. Les terrasses sont étagées de 80 cm à 1,20 m de hauteur. Leur disposition est décrite dans le tableau III.

Tableau III. Les parcelles expérimentales dans le site d'étude.

	Haut											
	<table border="1" style="border-collapse: collapse;"><tr><td style="padding: 5px;">P2</td><td style="padding: 5px;">P1</td></tr><tr><td style="padding: 5px;">P4</td><td style="padding: 5px;">P3</td></tr><tr><td style="padding: 5px;">P6</td><td style="padding: 5px;">P5</td></tr><tr><td style="padding: 5px;">P8</td><td style="padding: 5px;">P7</td></tr><tr><td style="padding: 5px;">P10</td><td style="padding: 5px;">P9</td></tr></table>	P2	P1	P4	P3	P6	P5	P8	P7	P10	P9	
P2	P1											
P4	P3											
P6	P5											
P8	P7											
P10	P9											
NORD		SUD										
	Bas											

##### III.1.2 Les traitements du sol

###### III.1.2.1 Les traitements mécaniques

L'essai agronomique a pour but d'essayer de mettre en relation la productivité agricole avec le type de traitement du sol et d'analyser les conséquences des traitements sur l'évolution pédologique du sol. Les parcelles expérimentales (tab. IV), ont reçu deux types de traitement mécanique du sol : grossier et fin.

Tableau IV. Disposition des traitements mécaniques du sol fin et grossier dans les parcelles (P).

<b>P2 Prép.Gross.</b>	<b>P1 Prép.Gross.</b>
<b>P4 Prép.Fine</b>	<b>P3 Prép.Fine</b>
<b>P6 Prép.Fine</b>	<b>P5 Prép.Gross.</b>
<b>P8 Prép.Gross.</b>	<b>P7 Prép.Gross.</b>
<b>P10 Prép.Fine</b>	<b>P9 Prép.Fine</b>

La roturation et le terrassement des parcelles ont été faits à l'aide d'un Caterpillar D6 sur 50 cm de profondeur, ce qui représente une profondeur utile de 35 cm .

Cinq parcelles ont subi un labour fin (F) du sol et cinq un labour grossier (G), labour qui, le plus souvent, est pratiqué par les paysans qui ne disposent pas des moyens mécaniques, du temps et de la main d'œuvre nécessaire pour soutenir des travaux lourds.

### III.1.2.2 *Les traitements agronomiques*

Les 10 parcelles schématisées ont reçu cinq traitements différents.

On en a réservé deux comme témoin non cultivé T, P8 et P10, et deux comme témoin cultivé mais sans engrais S.E., P1 et P3. Les parcelles fertilisées étaient donc :

- P2 et P4 engrais organique (fumier de vache) E.O. ;
- P5 et P6 engrais vert E.V. (enfouissement des résidus de la culture précédente) ;
- P7 et P9 engrais chimique E.C..

Les engrais organiques et verts ont été introduits 20 jours avant le semis, tandis que la fertilisation chimique a été fournie juste avant le semis du pois. Les parcelles, sauf les non cultivées, ont toutes reçu le même traitement de désherbage et la même quantité d'insecticide comme traitement phytosanitaire (tab. V).

Tableau V. Calendrier cultural du cycle de culture précédant la simulation de pluie.

Date	P1	P3	P2	P4	P5	P6	P7	P9
18-02-98	0	0	200 Kg fumier 1.68 kg de N 1.89 Kg de P		Enfouissement de résidus Mais		0	
11-03-98	0	0	0	0	4.40 Kg 18.46.00 (N, P, K) 2.20 Kg de 46.00.00 (N, P, K)			
11-03-98	Semis							
7-04-98	Desherbage							
25-04-98	Insecticide							
5-05-98	Récolte du pois							

Le semis, 385 gr de semence par parcelle, a été fait enfonçant trois grains de pois dans chaque creux profond d'environ 5 cm, tous les 20 cm le long du billon. L'ensemble des parcelles peut être alors ainsi schématisé par le tableau VI.



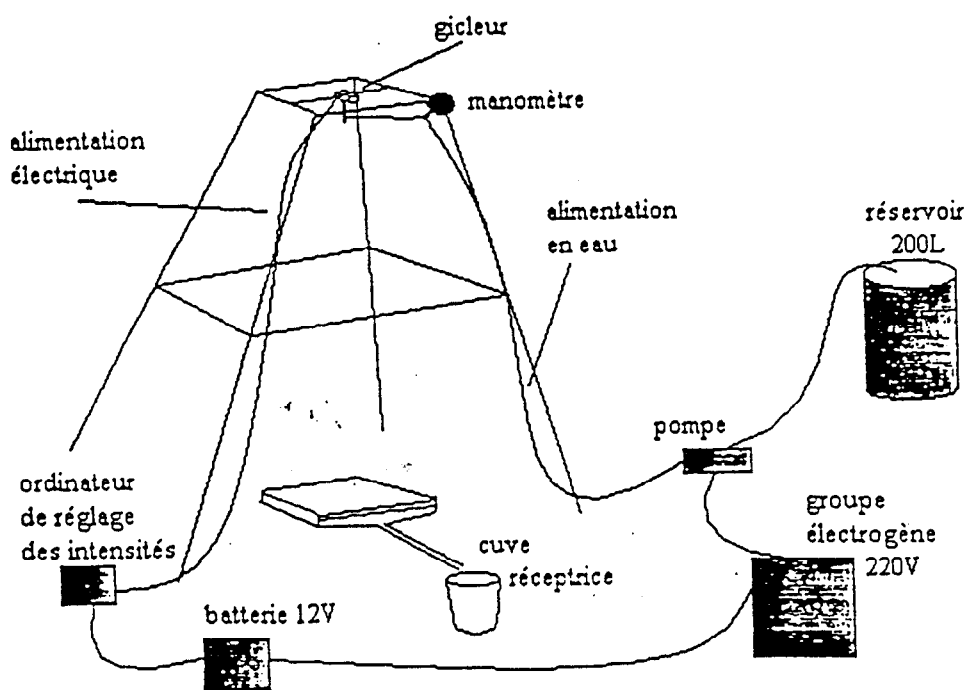


Fig 3. Schéma du dispositif de simulation de pluie.

Tableau VI. Récapitulation des traitements sur les parcelles.

P2 Engr. Org. Gross.	P1 Sans Engr. Gross.
P4 Engr. Org. Fine	P3 Sans Engr. Fine
P6 Engr. Vert. Fine	P5 Engr. Vert. Gross.
P8 Tém. Gross.	P7 Engr. Chim. gross.
P10 Tém. Fine	P9 Engr. Chim. Fine

### III.1.3 Mesures des rendements

Pour les mesures du rendement des plants de pois nous avons effectué une pesée juste au moment de la récolte : après avoir coupé les plantes au niveau des racines à l'aide d'une machette nous les avons pesées pour en obtenir le rendement total sur une surface de 97 m<sup>2</sup> par parcelle. Trois mètres carrés de plantes, sur les 100 environ de chaque parcelle, ont été prélevés au hasard et pesés pour déterminer le rendement par mètre carré en feuilles et racines, en sec et en humide.

En même temps, du poids total, ont été prélevés au hasard, toujours dans chaque parcelle et sans les peser, trois échantillons de plantes pour les mesures d'humidité. Ces prélèvements ont été faits sur différentes parties de la parcelle, pas forcément représentatives de la productivité de l'ensemble de la parcelle.

Pour chaque mètre carré de plantes prélevées nous avons compté le nombre de plantes et le nombre de fleurs. Nous avons séparé, alors, dans tous les échantillons, les parties aériennes des racines qui ont été lavées à l'eau pour éliminer les résidus de terre ; les feuilles et les racines ont été pesées en humide. Ensuite, après une phase de dessiccation en étuve à 105° pendant 24 heures, les feuilles et les racines ont été pesées en sec pour en déterminer le pourcentage d'humidité.

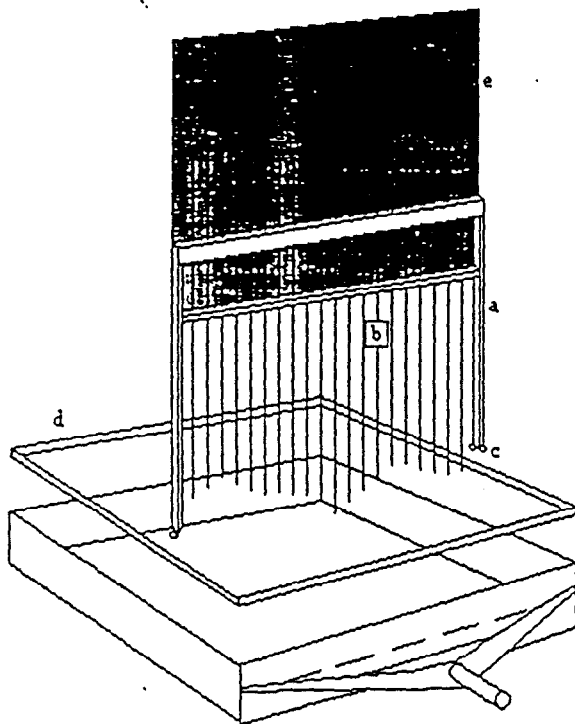
### III.1.4 La simulation de pluie

La technique de simulation de pluie permet de maîtriser de nombreux paramètres tels l'intensité de ruissellement, l'intensité d'infiltration, les pertes en terre dues à l'effet de battance, etc. difficilement isolables lorsqu'on travaille sous précipitations naturelles et en poste fixe.

A l'aide d'un mini-simulateur de pluie (Asseline et Valentin, 1978), nous avons pu apprécier le comportement du sol soumis à l'énergie cinétique des gouttes de pluie qui provoquent le détachement des particules du sol, la restructuration de son état de surface et l'occurrence d'un ruissellement et d'un transport solide.

#### III.1.4.1 Description du matériel

L'appareil permet d'arroser des parcelles d'environ 1 m<sup>2</sup> en produisant des pluies artificielles à intensités contrôlées. Le bâti démontable, en forme de pyramide tronquée de 4 m de haut (fig. 3), supporte, en effet, un système de commande électronique, alimenté par une batterie, qui fait décrire un mouvement de balancier à un gicleur : l'angle du balancement fait varier l'intensité de l'averse.



- a-Cadre métallique vertical
- b-Aiguilles
- c-Roulettes de déplacement
- d-Cadre horizontal placé sur la parcelle
- e-Planche graduée

Fig. 4. Schéma du point quadrat.

Le système est connecté à une pompe hydraulique alimentée en eau (grâce à un canal d'irrigation proche du site) et à un groupe électrogène qui charge soit la pompe soit la batterie. Toute la structure est protégée du vent par une toile qui la recouvre presque entièrement.

Les aspersion à différentes intensités s'effectuent sur 1 m<sup>2</sup> de sol délimité par un cadre rigide enfoncé dans le sol ; ce cadre métallique est doté d'un exutoire connecté à un tube pour les prélèvements des échantillons d'eau ruisselée.

#### *III.1.4.2 L'utilisation du simulateur*

Le sol a été préalablement travaillé et débarrassé des mauvaises herbes afin de le rendre le plus homogène possible sur toutes les parcelles considérées. Les essais de simulation de pluie ont été faits sur trois mètres carrés par parcelle et selon un protocole qui se rapproche le plus possible des intensités réelles des pluies naturelles.

Il a été, donc, ainsi conçu :

- trois pluies sur chaque mètre carré au temps  $T_0$ ,  $T_0 + 2h$ ,  $T_0 + 12h$  ;
- intensités variables et croissantes au cours de chaque pluie de 20 mm/h, 40 mm/h, 60 mm/h, 80 mm/h, la durée de chacune étant de 15 minutes.

Pour situer, finalement, la campagne de simulation dans le calendrier cultural des plants de pois précisons qu'elle a été conduite un mois après la récolte des plantes.

Suite à l'analyse des rendements obtenus sur l'ensemble des parcelles, nous avons décidé de focaliser notre attention sur le comportement hydrodynamique des parcelles traitées avec **engrais organique** et **engrais chimique**, à **préparation grossière** et **fine**, qui présentaient les meilleures productivités. Les parcelles sur lesquelles nous avons, donc, conduit la campagne de simulation étaient **P 2**, **P 4**, **P 7** et **P 9**.

#### *III.1.5 Le point quadrat*

Afin de déterminer le type de recouvrement des différents éléments sur la surface de chaque mètre carré, où a lieu la simulation de pluie, nous avons utilisé un dispositif appelé « point quadrat » (fig. 4).

Il est constitué d'un cadre métallique d'1m<sup>2</sup> en forme de U (a) renversé. Sur la barre horizontale sont disposées 19 aiguilles en cuivre (b). Un autre cadre en forme de U inséré dans le premier permet de lever l'ensemble des aiguilles. Aux pieds du cadre se trouvent des roulettes (c) permettant de déplacer l'ensemble sur un autre cadre horizontal (d) gradué tous les 5 cm et fixé sur la parcelle.

Une planche en bois graduée et installée derrière les aiguilles permet de lire les hauteurs de chaque aiguille.

Le quadrillage du sol ainsi obtenu est constitué de 342 points qui représentent la configuration de la surface en trois dimensions. Les mesures sont effectuées chaque fois avant la première pluie et après la troisième, ce qui nous permet d'évaluer les modifications de la surface dues à l'effet des pluies. Même si l'emplacement des aiguilles ne peut pas être toujours exact et, donc, même si la représentativité des mesures ne peut pas être toujours garantie, cela permet, cependant, d'apprécier l'évolution moyenne du relief de la parcelle.

Une fois remanié le sol, comme il a été décrit dans le paragraphe précédent, nous avons choisi comme éléments de recouvrement de la surface les éléments suivants :

- **pa**, petit agrégat (agrégat de diamètre inférieur à 1 cm)
- **a**, agrégat (agrégat de diamètre compris entre 1 et 5 cm)
- **ga**, grand agrégat (agrégat de diamètre supérieur à 5 cm)
- **b**, bloc de dimensions supérieures à 10 cm
- **ra**, racines
- **Veg**, résidus de végétales
- **ero**, croûte d'érosion
- **rui**, croûte de ruissellement
- **dec**, croûte de décantation.

Il faut bien préciser, ici, qu'avec la notation « agrégat » on indique soit les fragments de sol à consistance dure (*cangahua*) qui disparaissent difficilement sous l'effet de la pluie, soit les vrais agrégats; mottes de terre effritables entre les doigts qui se désagrègent généralement sous l'action des précipitations.

### ***III.1.6 La stabilité structurale***

C'est la structure grumeleuse qui rassemble les agrégats de diamètre inférieur à 0.25 mm et supérieur à 10 mm qui est intéressante du point de vue agronomique ; une structure dont la stabilité peut être facilement mesurée avec une analyse des agrégats en sec et en humide, selon la méthode Kaouritchev.

Cette analyse sert à déterminer la quantité d'agrégats de diamètre compris entre 0.25 et 10 mm environ et à observer leur résistance à l'eau.

Dans le cas de l'étude de sols indurés, il est fréquent de parler de fragments et d'agrégats : les premiers désignent des particules de terre indurée ou dotées d'une structure résistante à l'eau, difficilement émiettable et substantiellement dépossédée de matière organique ; les deuxièmes indiquent plutôt une petite motte dont les particules restent agrégées grâce à de la matière organique, surtout racinaire, qui rend la structure très fragile au toucher.

### ***III.1.7 Mesure de l'humidité***

Comme nous l'avons déjà souligné dans le paragraphe introductif sur le bilan hydrique, l'analyse des propriétés hydrodynamiques du sol ne peut pas se passer de la mesure de l'humidité préalable de l'horizon de surface qui affecte la sensibilité à l'infiltration du sol même. Boudjemline (1987) a démontré que c'est l'humidité de la couche superficielle qui influence le plus la réaction du sol à la pluie : au-delà de 10 cm de profondeur, sauf cas particuliers, l'information des mesures est négligeable.

Pour comparer l'état d'humectation du sol dans chaque parcelle, nous avons prélevé, à côté du mètre carré où était menée la simulation de pluie, des échantillons de terre entre 0 et 10 cm de profondeur, juste avant chaque pluie. (La mesure de l'humidité a été faite par une pesée des échantillons en humide et en sec afin d'obtenir le pourcentage d'humidité).

## IV. RESULTATS ET LEUR INTERPRETATION

### IV.1 La fertilité du sol et le rendement de la culture de pois

La fertilité d'un sol exprime la capacité du sol même à produire des récoltes (Morel, 1996) ; cette capacité est améliorée par l'agriculteur à travers plusieurs actions qui consistent prioritairement dans l'optimisation de la circulation de l'eau et de son stockage dans le sol, mais aussi dans l'utilisation de techniques culturales qui stabilisent la structure et développent le bon fonctionnement de l'activité biologique du sol.

Le travail du sol et l'introduction de substances fertilisantes font partie des techniques d'amélioration du rendement d'une culture : les deux, en effet, peuvent corriger les déficiences du sol du point de vue de ses propriétés physiques et chimiques qui limitent le développement de la vie microbienne.

Les engrais organiques et chimiques employés sur les parcelles ont des effets différents sur les cultures ; les uns ne sont pas directement assimilables par la plante mais ils apportent des oligo-éléments, ils stimulent l'activité biologique et agissent très longtemps. Les autres, les engrais chimiques, sont, par contre, facilement dispersés et à action rapide, car leur solubilité les rend facilement assimilables, mais ils sont exposés au lessivage.

Le tableau VII présente les rendements des plantes de pois cultivées dans les parcelles, exprimés en gr /m<sup>2</sup>, lorsqu' ils représentent la moyenne entre trois mètres carrés de chaque parcelle, et en t/ha lorsque leur valeurs ont été extrapolés de la parcelle à l'hectare.

Une préparation du sol grossière ou fine n'est pas déterminante pour le rendement des racines (mesuré sur les racines sèches) car les valeurs pour les parcelles organiques et chimiques sont à peu près les mêmes. Par contre, la fertilisation chimique garantie un meilleur développement de l'appareil racinaire, le responsable de l'absorption de l'eau et des éléments minéraux.

Tableau VII. Rendement des plantes du pois.

Traitement	Rend. Rac. sèches (gr/m <sup>2</sup> )		Rend. Feuilles sèches (t/ha)		Rapport F/R sèches (gr/m <sup>2</sup> )	
	Prép.G.	Prép.F.	Prép.G.	Prép.F.	Prép.G.	Prép.F.
E.O.	7,6	9,4	1,87	1,82	10	15
E.C.	12,1	12,0	1,73	1,95	10	8

Dans les parcelles à engrais organique, un labour de type grossier facilite le rendement total des plantes, relatif aux parties vertes, mais paraît défavoriser la productivité lorsque l'engrais utilisé est de type minéral ou chimique. La dispersion des substances fertilisantes, sous forme de poudre, garantit une meilleure pénétration au niveau des racines si le sol est finement travaillé, et une meilleure alimentation en eau et en facteurs de croissance de la plante. Globalement, la productivité des parcelles soumises au deux traitements fertilisants étant similaire, les résultats ne permettent pas d'établir des avantages nets sur l'utilisation d'un type d'engrais plutôt que de l'autre.

Un dernier paramètre a été présenté comme indice de «qualité» de la production : la relation entre la partie aérienne et subaérienne des plantes de pois. Le rapport entre feuilles et racines, exprimé en gr/m<sup>2</sup>, reste constant pour les deux traitements si le sol a été labouré grossièrement. Les parties vertes sont, par contre, légèrement plus développées (on est toujours à l'échelle des grammes) dans les parcelles organiques traitées finement plutôt que dans celles chimiques.

Globalement, les données dont on dispose ne permettent pas d'apprécier de remarquables différences entre les rendements obtenus suite à l'utilisation des deux types d'engrais.

La comparaison entre les résultats, exprimés en  $\text{gr/m}^2$  et  $\text{t/ha}$ , bien qu'elle ait été la seule possible, ne peut que rendre cette analyse superficielle et insuffisante. Cette étude ne permettra pas, donc, d'atteindre une complète compréhension des vrais effets des engrais sur le rendement des plantes de pois.

Cependant, cette approche agronomique préliminaire peut déjà mettre en évidence le poids du labour de la terre et du type de fertilisation sur la productivité d'un sol dont le comportement ne peut être compris que par l'étude de ses propriétés hydrodynamiques.

## IV.2 Les propriétés hydrodynamiques

Pour réaliser un bon diagnostic de l'origine du ruissellement, de l'érosion et des risques de dégradation des parcelles cultivées, il est nécessaire d'étudier le fonctionnement hydrique du sol, et, donc, d'analyser l'évolution des processus hydrodynamiques qui interviennent au cours d'une averse.

### IV.2.1 Bilan hydrique des parcelles

La simulation de pluie permet d'apprécier de façon plus précise ce qui se passe lorsque le sol est proche de son état de saturation et sa vulnérabilité vis à vis de l'impact de la pluie. Nous avons étudié la dynamique de l'infiltration déduite par une différence entre l'intensité de pluie et l'intensité maximale de ruissellement en fonction des paramètres agro-physiques des différentes parcelles expérimentales.

Pour interpréter les résultats des mesures d'infiltration à l'échelle du  $\text{m}^2$  et tenter de les extrapoler à l'échelle de la parcelle, on a utilisé un des paramètres les plus significatifs du point de vue agronomique pour caractériser l'hydrodynamique du sol, l'intensité d'infiltration minimale  $F_n$ , qui représente la capacité du sol à infiltrer l'eau lorsqu'il est saturé.

Nous avons observé et comparé l'évolution du processus de l'infiltration et du ruissellement à l'aide de différents paramètres ou des relations entre ceux-ci :

$F_n$  = Infiltration minimale

$Hum$  = Humidité du sol en fonction de la profondeur.

$P_i$  = Pluie d'Imbibition et  $Hum$  = Humidité

$L_r$  = Lamelle ruissellée et  $P_u$  = Pluie Utile pour la première pluie

$K_{ru}$  = Coefficient de ruissellement et  $P_u$  = Pluie Utile

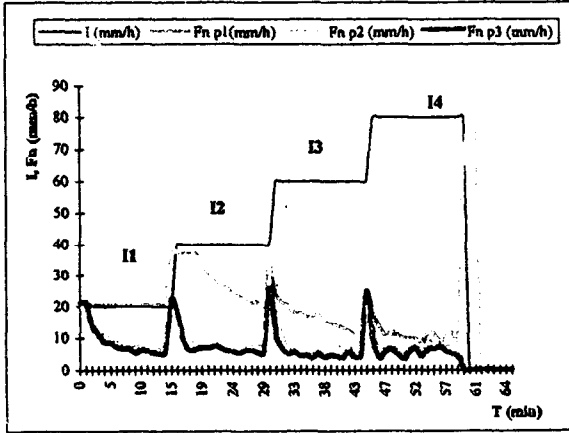
Ces paramètres ont été étudiés pour les deux préparations mécaniques du sol, grossier (G) et fin (F) et pour les deux traitements agronomiques, engrais organique (E.O) et engrais chimique (E.C.).

L'analyse permettra, en effet, de déduire des différences éventuelles de comportement du sol, soumis aux deux traitements, vis à vis de leur capacité d'infiltration.

Il faut bien préciser, cependant, que toute analyse de cette sorte ne peut pas être exhaustive si elle ne tient pas compte d'autres variables comme l'état d'humectation du sol, l'évolution des états de surface et la stabilité structurale du sol, facteurs qui jouent un rôle déterminant dans la dynamique de l'infiltration. L'étude de ces facteurs sera présentée dans les chapitres 2.1 et 3.1.

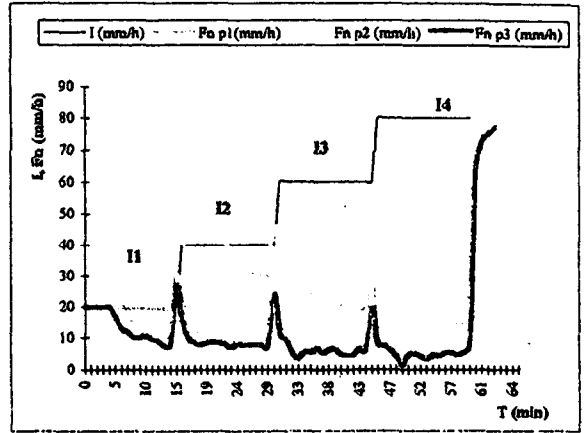
### Préparation du sol grossière

P2.1

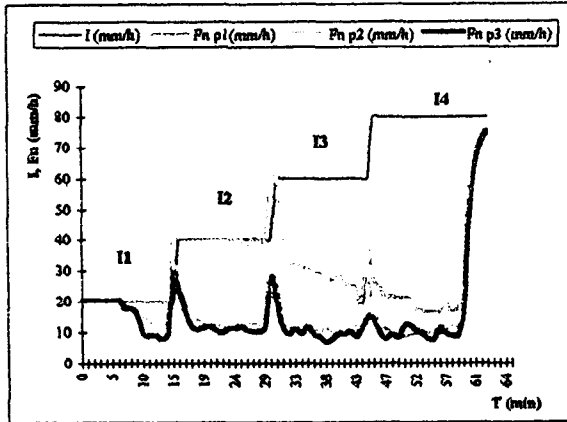


### Préparation du sol fine

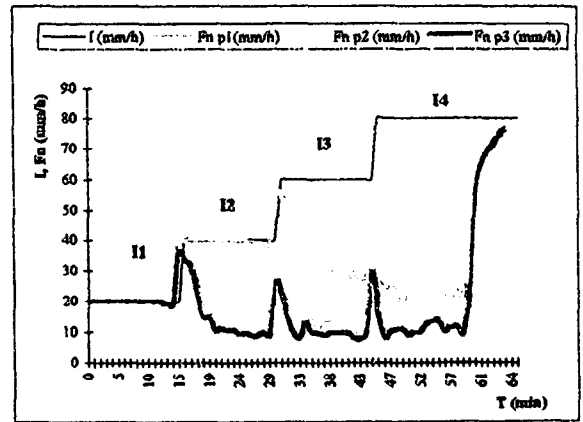
P4.1



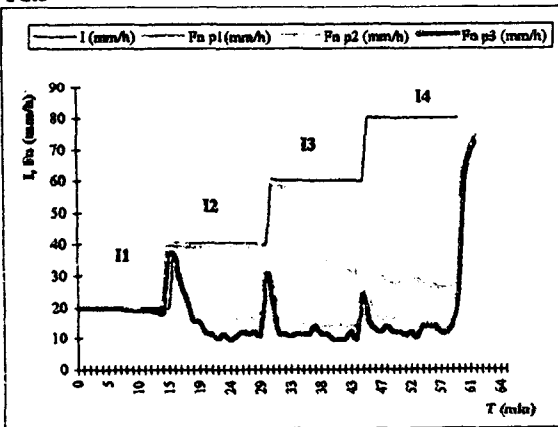
P2.2



P4.2



P2.3



P4.3

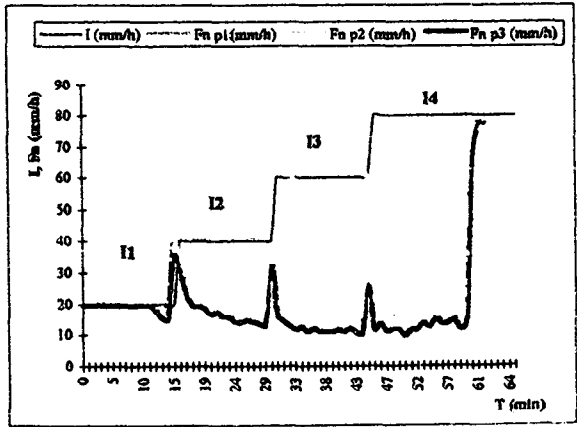


Fig. 5. Variation de l'intensité d'infiltration minimale  $F_n$  et de l'intensité  $I$  en fonction du temps dans les parcelles traitées avec engrais organique.



#### IV.2.1.1 L'infiltration minimale $F_n$

##### a) Parcelles avec engrais organiques.

Dans les figures 5 et 6 les valeurs de  $F_n$ , relatives aux trois pluies ( $p_1$ ,  $p_2$  et  $p_3$ ) sur chaque parcelle P, sont exprimées en fonction des intensités (I) variables au cours de chaque pluie, de 20, 40, 60, et 80 mm/h.

Les pics des maxima pour les trois pluies sont dûs aux perturbations provoquées par le changement d'intensité et ne sont pas pris en considération, vu qu'ils ne seraient pas présents lors d'une averse à intensité constante. Cela vaut, aussi, pour les maxima d'infiltration à la fin de chaque pluie, dûs à l'arrêt du simulateur. Les courbes en rouge montrent que, lors de la première pluie, la quantité d'eau qui s'infiltré dans le sol correspond à l'intensité de la pluie fournie par le simulateur ( $F_n = I$ ), ce qui se vérifie partout, sauf pour la parcelle P2.1 jusqu'à 25-28ème minute pour les parcelles avec engrais organique, quelque soit le type de préparation. Ce phénomène indique l'absence de ruissellement au cours de la première intensité et montre, en même temps, une forte humectation du sol.

Dès que l'infiltration commence à diminuer un ruissellement intervient : presque toutes les parcelles commencent à ruisseler au cours de la troisième intensité (I3). La diminution progressive de l'infiltration au cours des intensités I3 et I4 baisse les valeurs de  $F_n$  à environ 15 mm/h, sauf dans le cas des parcelles P2.3 et P 4.3 où l'infiltration se stabilise sur des valeurs plus hautes.

Les courbes qui représentent la deuxième et troisième pluie, 2 et 12 heures après la première, se chevauchent : le  $F_n$  ne diminue plus et se stabilise autour de 10 mm/h. Le sol ne paraît presque plus capable d'absorber de l'eau et cela déjà après seulement deux heures d'intervalle entre  $p_1$  et  $p_2$  (intervalle qui indique le temps de ressuyage du sol).

Du point de vue de l'infiltration on peut remarquer une certaine homogénéité entre les parcelles organiques à préparation fine F. et grossière G.

##### b) Parcelles avec engrais chimique

Dans les parcelles P7 et P9 de  $F_n$ , traitées avec engrais chimique, l'infiltration se maintient maximale jusqu'à l'intensité I3 : le sol pendant la première pluie  $p_1$  continue à se gorger d'eau jusqu'à environ la 35ème minute. A ce moment, lorsqu'il commence à se saturer, l'intensité d'infiltration  $F_n$  chute très rapidement et de façon abrupte. Les mêmes considérations faites précédemment pour les pics des maxima valent ici pour toutes les courbes.

Les courbes de  $F_n$  dans les pluies  $p_2$  et  $p_3$  sont assez détachées : à l'occasion de  $p_2$  le sol dans toutes les parcelles est encore capable d'absorber assez d'eau et de se stabiliser autour des valeurs supérieures à 20 mm/h : par ailleurs, la  $p_3$  atteint des valeurs souvent inférieures de 10 mm/h par rapport à ceux de  $p_2$ .

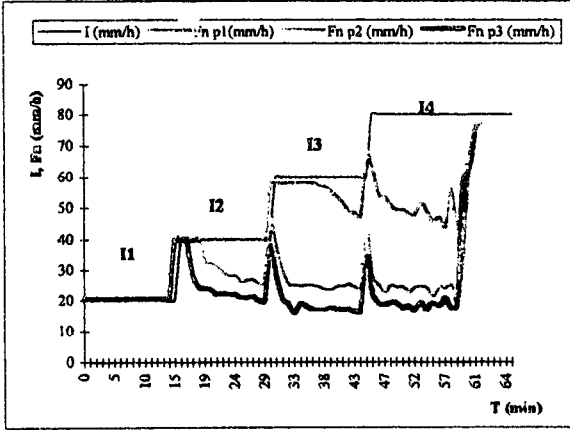
Le sol grossier G. de la parcelle P7 commence à ruisseler, à partir de la première pluie, à la fin de I3 : l'eau s'infiltré plus efficacement que dans le sol fin. Lors des pluies  $p_2$  et  $p_3$ , l'infiltration reste maximale au cours des premières 20 minutes, ensuite elle diminue pour atteindre assez rapidement un plateau.

La préparation fine de la parcelle P9 répond différemment de la préparation grossière de P7 seulement au cours de  $p_1$  : il semble se saturer d'eau plus vite car l'eau commence à ruisseler au début de la troisième intensité I3.

L'influence du ressuyage entre les pluies  $p_1$  et  $p_2$  semble ici être plus marquée que dans la parcelle P7, la distance entre la courbe rouge et bleue étant plus grande au cours des différentes intensités. Les courbes de  $p_2$  et  $p_3$  restent aussi détachées que dans P7.

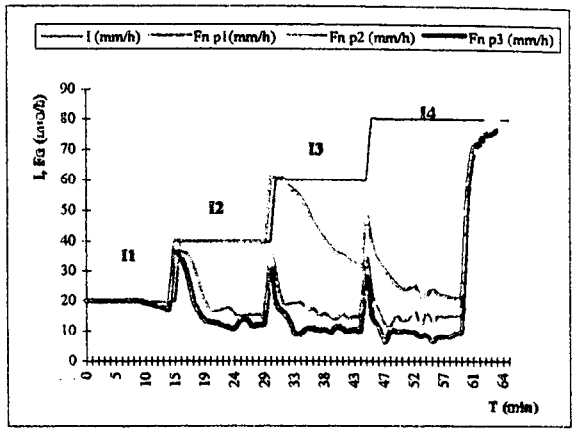
### Préparation du sol grossière

P7.1

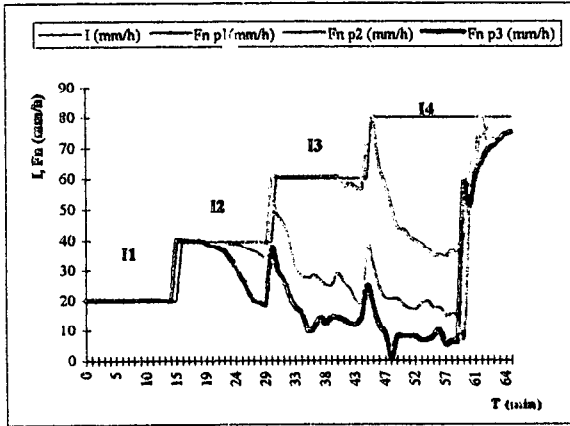


### Préparation du sol fine

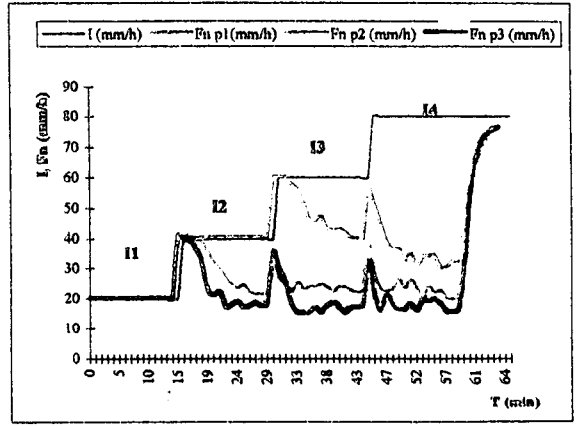
P9.1



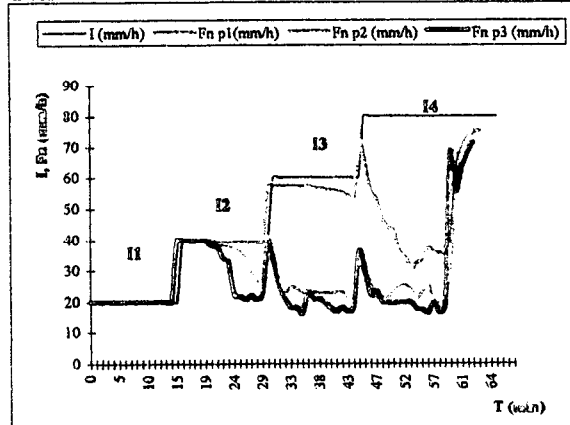
P7.2



P9.2



P7.3



P9.3

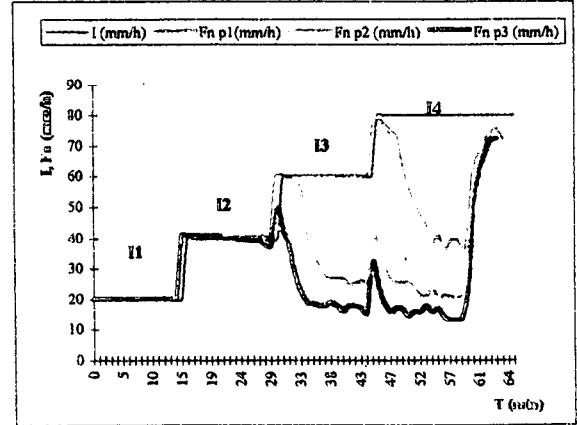


Figure 6. Variation de l'intensité d'infiltration minimale  $F_n$  et de l'intensité  $I$  en fonction du temps dans les parcelles traitées avec engrais chimique.

On peut résumer l'ensemble de ces observations pour définir les principaux points de discordance des résultats d'infiltration minimale sur les parcelles organiques et chimiques :

- L'évolution de l'intensité d'infiltration au cours des trois averses montre l'enchaînement de trois phases. En début de pluie, période où l'intensité est la plus faible (20mm/h) toute l'eau s'infiltré dans le sol, puis le ruissellement apparaît et l'intensité d'infiltration  $F_n$  diminue jusqu'à stabilisation de celle-ci.
- On remarque une tendance à une plus forte infiltration dans les parcelles chimiques, spécialement au cours de la première pluie, surtout par rapport au temps de déclenchement du processus du ruissellement qui intervient ici plus tard que dans les parcelles organiques.
- Les courbes relatives aux pluies p2 et p3 des parcelles P7 et P9 présentent des valeurs de  $F_n$  supérieures à celles de P2 et P4.

La saturation du sol entre les pluies p1 et p2 et entre p2 et p3 semble intervenir plus rapidement dans les parcelles E.O. que dans celles E.C., comme on peut déduire de la distance entre les trois courbes dans chaque graphique.

**Préparation du sol grossière (engrais organique)**

**Préparation du sol fine (engrais organique)**

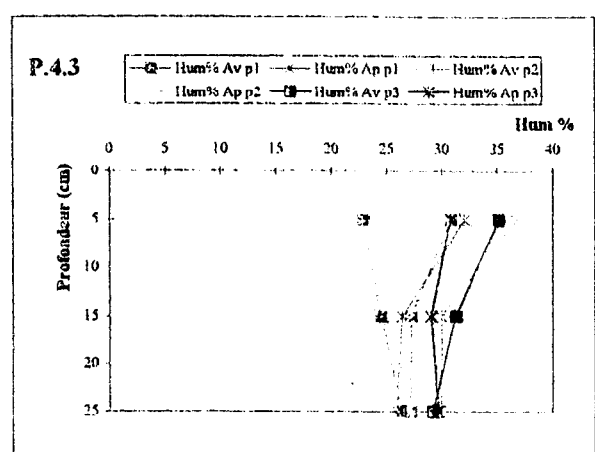
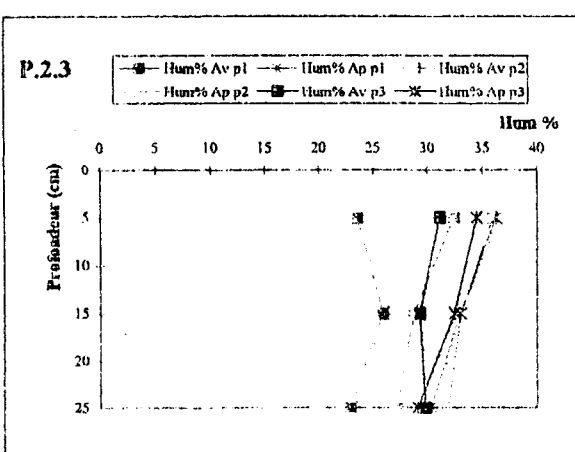
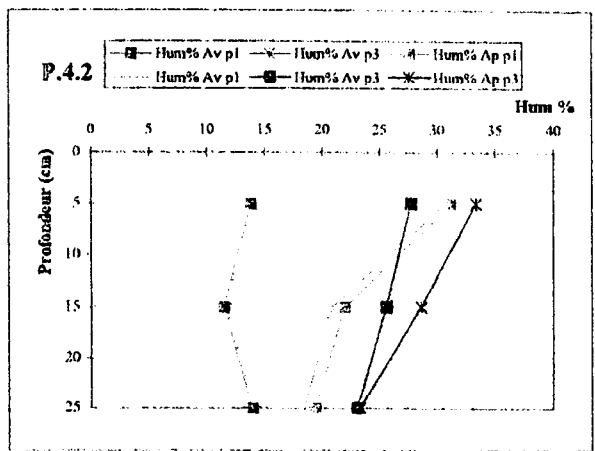
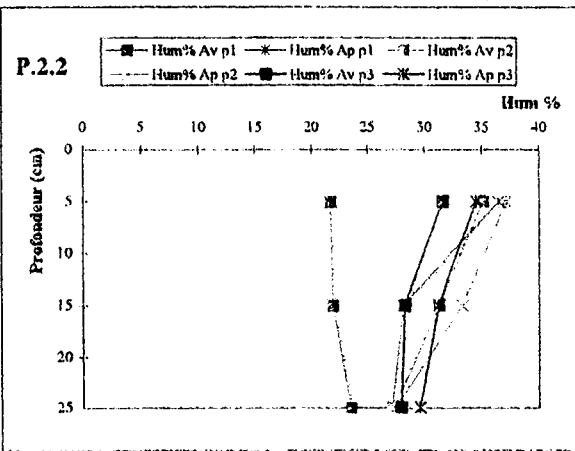
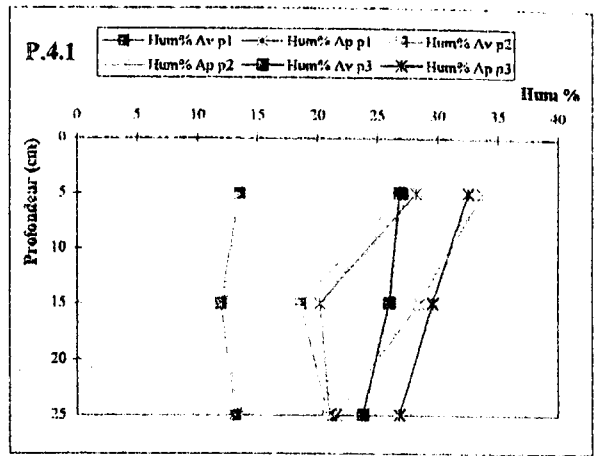
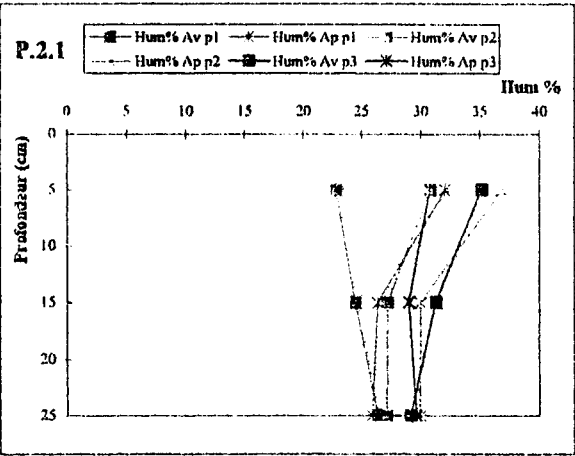


Figure 7. Variation de l'humidité du sol en fonction de la profondeur dans les parcelles traitées avec engrais organique.

#### *IV.2.1.2 Hum = Humidité du sol en fonction de la profondeur*

Les figures 7 et 8 démontrent une concentration de l'infiltration au sein des premiers 10 centimètres du sol et un accroissement logique de l'humidité du sol après les pluies.

Il est important de remarquer que les préparations grossières (P2 et P7) ont tendance à stocker plus d'humidité avant ou post pluie que les parcelles de préparations fines (différence de 5 à 10%) et cela malgré un ruissellement plus faible pour ces dernières. La plus forte porosité explique ce résultat.

La matière organique contenue dans les parcelles grossières en retenant l'humidité engendre un ressuyage moins rapide avec les amendements organiques qu'avec les engrais chimiques.

#### *IV.2.1.3 La pluie d'imbibition ( $P_i$ ) et sa relation avec l'humidité du sol*

Le choix du paramètre hydrodynamique le plus représentatif par rapport à l'humectation du sol s'est porté sur  $P_i$ , la pluie d'imbibition, qui exprime la hauteur d'eau nécessaire à saturer le sol.  $P_i$  est, en effet, la hauteur de précipitation infiltrée totalement dans le sol ou stockée sur la surface entre le début de l'averse et l'instant où se déclenche le ruissellement sur la parcelle (Chevallier, 1983).

Lafforgue (1977) met cette pluie d'imbibition en relation soit avec le déficit hydrique à saturation, soit avec le temps de ressuyage, ce qui revient à comparer cette pluie à l'état d'humectation du sol. On a donc décidé de représenter  $P_i$  en fonction du pourcentage d'humidité calculé avant les trois pluies.

On a rassemblé et traité les données en considérant 9 valeurs de  $P_i$  et d'humidité par parcelle (trois pour chaque pluie sur les trois répétitions).

Les coefficients de corrélation entre la pluie d'imbibition et l'humidité de la figure 9 montre que toutes les parcelles présentent une relation inversement proportionnelle entre les deux paramètres : en effet, comme on pouvait s'y attendre, les résultats indiquent que plus il y a d'humidité dans le sol, moins d'eau est nécessaire pour déclencher le ruissellement.

Les parcelles P2 et P4 présentent des valeurs d'humidité concentrées entre 25 et 35 % indépendamment du temps passé entre une mesure et l'autre, c'est-à-dire entre les pluies p1-p2 et p2-p3.

Par rapport aux parcelles P7 et P9 (E.C.), les valeurs de  $P_i$  de celles organiques sont un peu plus basses : la hauteur d'eau nécessaire à déclencher le ruissellement est moins importante que sur traitement chimique. Les données des parcelles chimiques, par contre, sont plus dispersées et atteignent des maxima de  $P_i$  de plus de 30 mm : le sol est moins humide ou plutôt il se sèche plus rapidement, ce qui fait que la quantité d'eau à chaque pluie qui sature le sol est plus importante.

#### *IV.2.1.4 La relation entre la lame ruisselée ( $L_r$ ) et la pluie utile ( $P_u$ )*

Cette relation, aussi, est essentielle du point de vue de la compréhension de l'hydrodynamique du sol. Elle est liée à l'état de saturation du sol analysé dans le paragraphe précédent sous forme de pourcentage d'humidité avant les pluies.

Après l'observation détaillée de l'allure des courbes de  $L_r$  cumulée (en mm) sur  $P_u$  cumulée (en mm) pour les trois pluies, sur les trois simulations de pluie conduites sur chaque parcelles, on a préféré résumer les résultats obtenus et ne concentrer notre attention que sur la première pluie p1, la plus intéressante par rapport au déclenchement du ruissellement.

Préparation du sol grossière (engrais chimique)

Préparation du sol fine (engrais chimique)

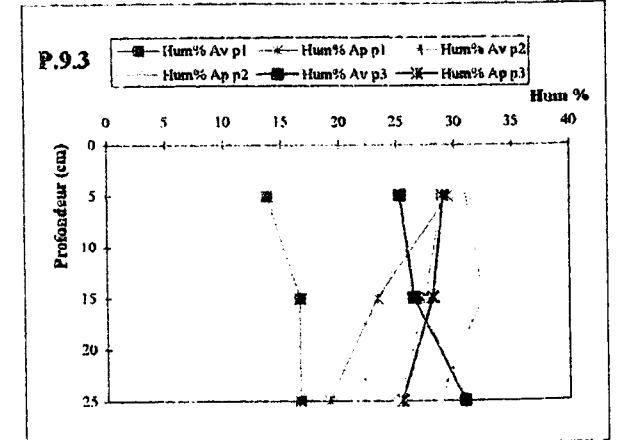
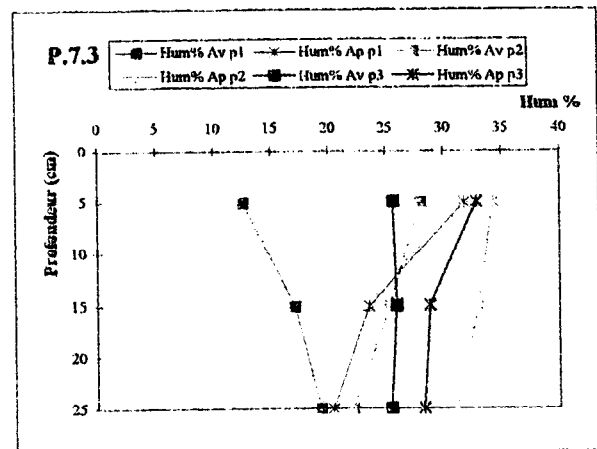
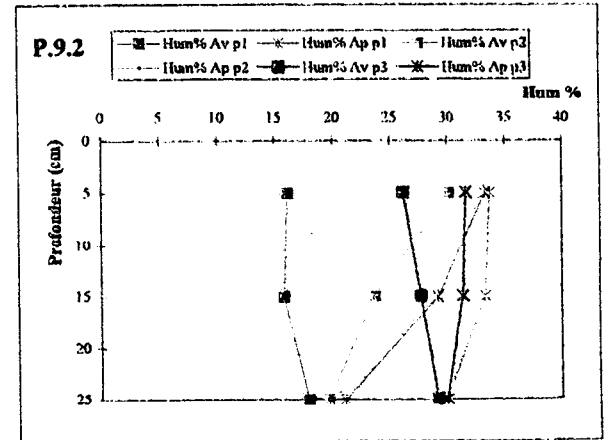
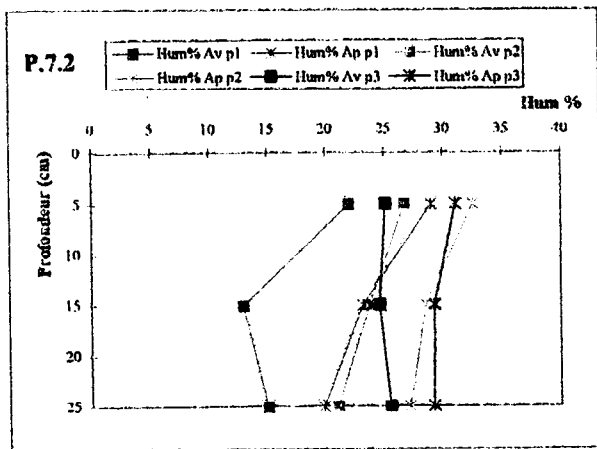
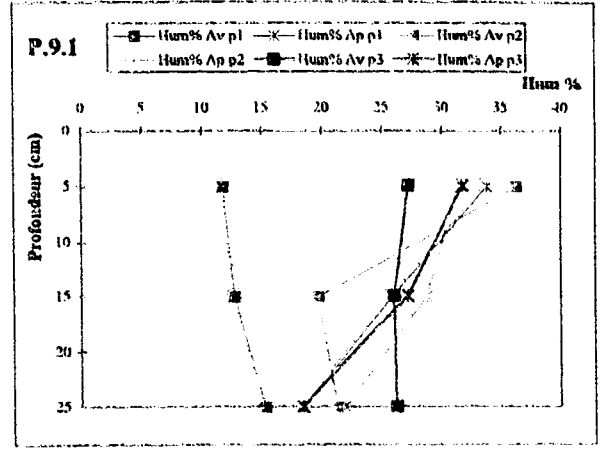
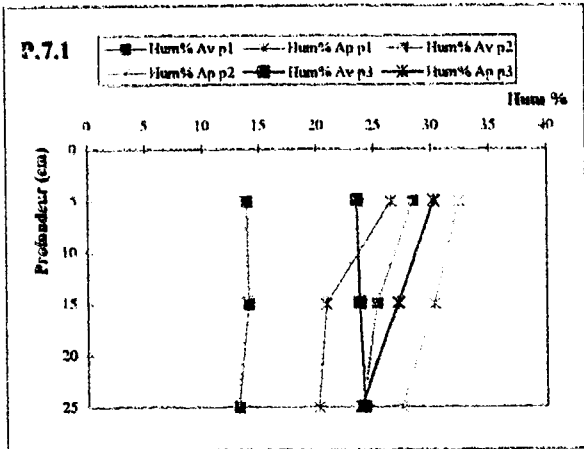


Fig. 8. Variation de l'humidité du sol en fonction de la profondeur dans les parcelles traitées avec engrais chimique.

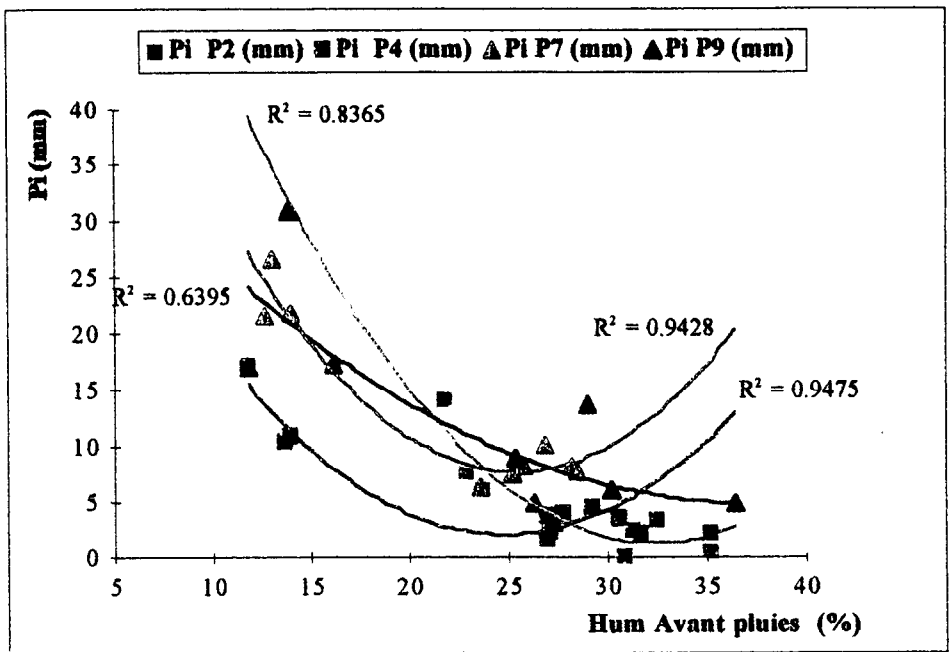


Figure 9. Variation de la hauteur de la pluie d'imbibition  $P_i$  en fonction de l'humidité mesurée, avant les pluies, entre 0 et 10 cm de profondeur.

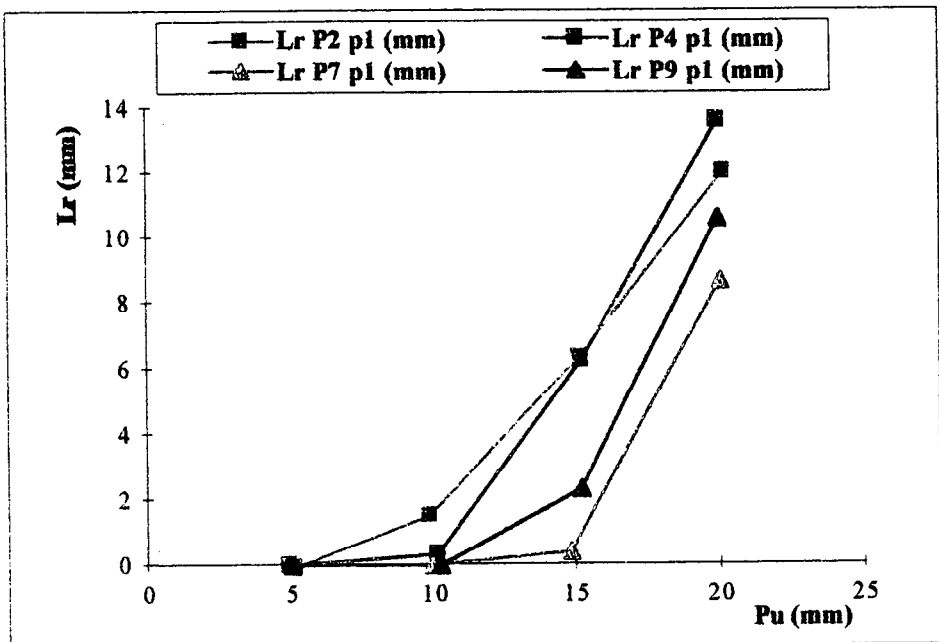


Figure 10. Variation de la hauteur de la lame ruisselée ( $L_r$ ) en fonction de la hauteur de la pluie utile ( $P_u$ ) au cours de la première pluie.

Chaque pluie étant composée de quatre intensités différentes, on a dépouillé, au cours de p1, quatre valeurs de Lr correspondantes aux valeurs de Pu pour chaque intensité. Dans la figure 10 la comparaison entre les courbes permet de déterminer le rôle de l'hétérogénéité du sol (Casenave, 1982) dans ce cas, on le rappelle, préalablement dépourvu de végétation et rendu, donc, le plus homogène possible.

#### IV.2.1.5 Le coefficient de ruissellement (Kru) pour la totalité des pluies

Les coefficients de Kru correspondants indiquent une tendance logique à l'augmentation du ruissellement au cours des trois pluies : le sol se saturant d'eau et opposant chaque fois plus de résistance à l'infiltration.

Pour une pluie utile (Pu) sensiblement identique pour toutes les pluies de toutes les parcelles expérimentales, les parcelles organiques ruissellent plus que celles chimiques (tab. VIII).

Ce ruissellement plus important est notable spécialement pour la première pluie, le sol arrivant à saturation pour les pluies suivantes quelque soit le traitement.

Tableau VIII. Moyenne des coefficients de ruissellement en fonction de la pluie utile.

Traitement ORGANIQUE - GROSSIER				Traitement CHIMIQUE - GROSSIER			
P 2	Kru (%)	Kru (%)	Kru (%)	P 7	Kru (%)	Kru (%)	Kru (%)
	pluie1	pluie2	pluie3		pluie1	pluie2	pluie3
Int I1	0,00	21,25	26,66	Int I1	0	0	0
Int I2	8,11	61,92	72,58	Int I2	0	11,12	26,05
Int I3	50,11	82,74	88,53	Int I3	2,73	57,32	72,00
Int I4	78,12	89,46	93,19	Int I4	43,64	75,59	84,52
Kru Tot.	41,78	76,02	82,66	Kru Tot.	19,18	50,67	62,41
Pu (mm)	49,7	50,3	49,8	Pu (mm)	50,1	50,1	49,1

Traitement ORGANIQUE - FIN				Traitement CHIMIQUE - FIN			
P 4	Kru (%)	Kru (%)	Kru (%)	P 9	Kru (%)	Kru (%)	Kru (%)
	pluie1	pluie2	pluie3		pluie1	pluie2	pluie3
Int I1	0	6,59	11,89	Int I1	0	0	0,94
Int I2	3,16	59,32	68,26	Int I2	0	25,65	35,29
Int I3	41,24	81,48	87,95	Int I3	15,23	58,82	74,16
Int I4	68,45	87,15	92,68	Int I4	53,39	77,11	85,79
Kru Tot.	41,33	72,53	79,89	Kru Tot.	26,85	54,70	64,05
Pu (mm)	49,9	49,9	50,4	Pu (mm)	50,2	50,2	50,1

L'analyse de ces paramètres ne peut pas suffire seule à une explication de la dynamique de l'eau dans le sol ; l'intégration de ceux-ci et d'autres facteurs étudiés ci-dessous qui jouent sur la capacité d'infiltration du sol pourra offrir une meilleure interprétation de l'ensemble des résultats.

#### IV.2.2 Les états de surface du sol

Un sol nu, dépourvu d'une formation végétale comme nos parcelles expérimentales, subit sous l'impact d'une averse une réorganisation de sa surface. Cette réorganisation des structures



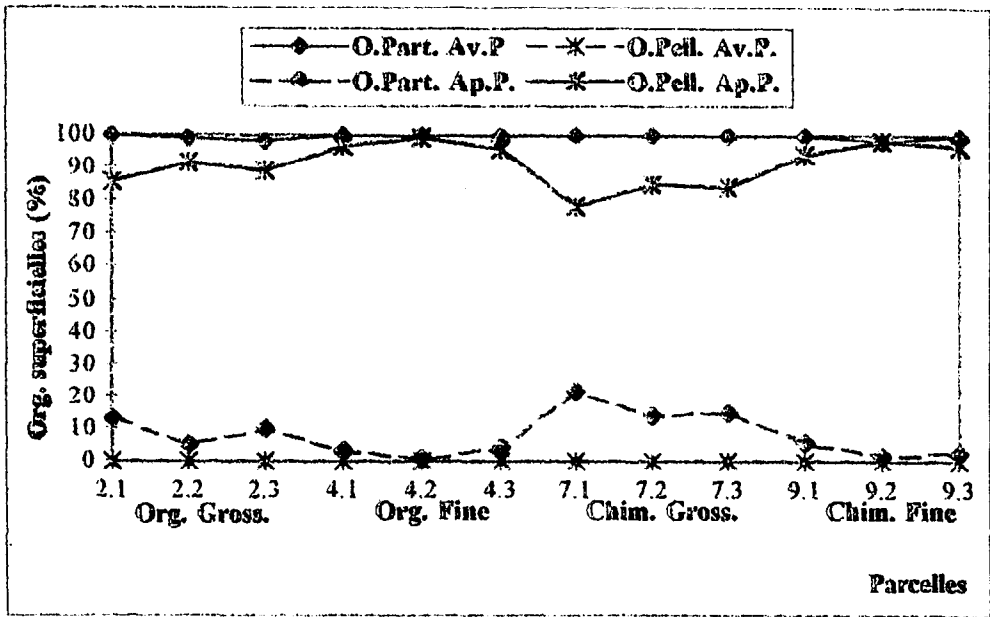


Fig. 11. Variation des organisations superficielles avant et après les pluies.

superficielles est responsable d'une diminution de l'infiltration au cours de la pluie (Poss, 1989-90).

Les états de surface jouent, en effet, un rôle fondamental sur les paramètres hydriques (Casenave et Valentin, 1989 ; Valentin et Janeau, 1989-90 ; Leroux, 1996), d'où la nécessité d'employer la méthode du point quadrat, indispensable à leur détermination.

Ces organisations superficielles se composent de deux grands types de structures particulières et pelliculaires. Les différentes classes d'agrégats et de fragments (dont la terminologie varie en fonction de leur diamètre), de croûtes structurales et de résidus de végétation ou de racines sont ainsi regroupés :

#### **Organisations particulières :**

- **pa**, petit agrégat (agrégat de diamètre inférieur à 1 cm) ;
- **a**, agrégat (agrégat de diamètre compris entre 1 et 5 cm) ;
- **ga**, grand agrégat (agrégat de diamètre supérieur à 5 cm) ;
- **b**, bloc de dimensions supérieures à 10 cm.

#### **Organisations pelliculaires :**

- **ero**, croûte d'érosion ;
- **rui**, croûte de ruissellement ;
- **dec**, croûte de décantation.

#### **Autres types de recouvrement de la surface :**

- **ra**, racines ;
- **Veg**, résidus de végétales.

L'influence des résidus de végétation et des racines étant négligeable dans cette étude (absence quasi totale), nous ne considérerons que les organisations particulières, qui regroupent tous les agrégats et les blocs, et les organisations pelliculaires, c'est à dire les croûtes d'érosion, de ruissellement et de décantation.

### ***IV.2.3 Evolution des états de surface***

On a déjà observé dans les figures 5 et 6 une diminution de l'intensité d'infiltration  $F_n$  au cours des averses ; à cette diminution correspond une réorganisation de la surface de la parcelle. Les mottes sont détruites sous l'effet mécanique des impacts des gouttes de pluie et un important rejaillissement se produit (Poss, Pleuvret et Saragoni, 1989-90). Les particules plus fines, dérivées de la fragmentation des agrégats, comblent la porosité superficielle ; par ailleurs, elles participent à la formation des premières croûtes structurales.

Les observations sur l'évolution des états de surface ont été faites avant la première pluie  $p_1$  et après la troisième  $p_3$ . La figure 11 montre une certaine homogénéité au sein d'un même traitement : absence d'organisations pelliculaires et un pourcentage d'organisations particulières de presque 100 % avant  $p_1$ .

Après la troisième pluie  $p_3$  des différentes situations se présentent dans les parcelles organiques et chimiques. Les parcelles à préparation grossière présentent un recouvrement plus important d'organisations particulières par rapport aux parcelles à préparation fine. Elles sont constituées, avant les pluies, par une fraction plus grande d'agrégats de dimensions majeures. Les croûtes,

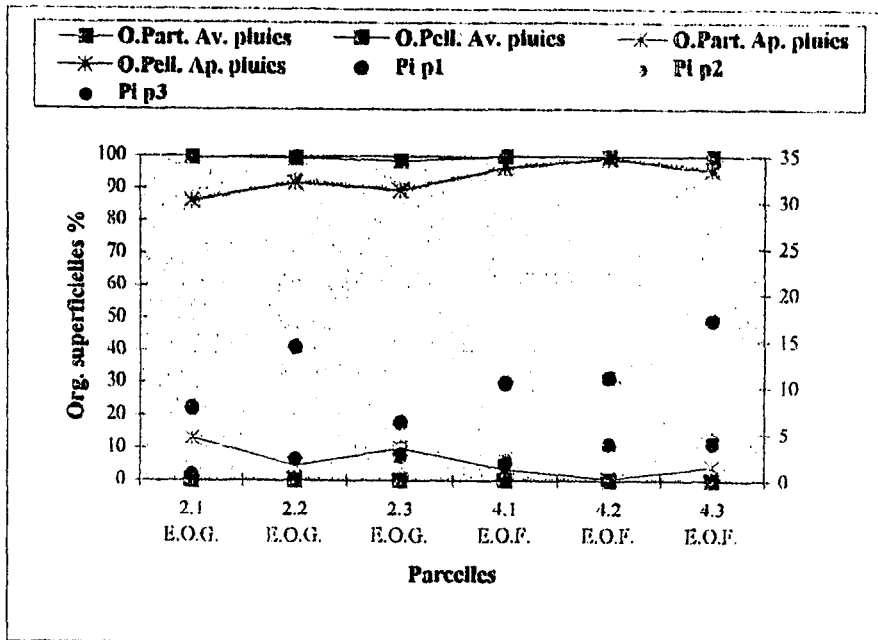


Figure 12. Variation de la pluie d'imbibition (Pi) en fonction de la modification des états de surface dans les parcelles traitées avec engrais organique.

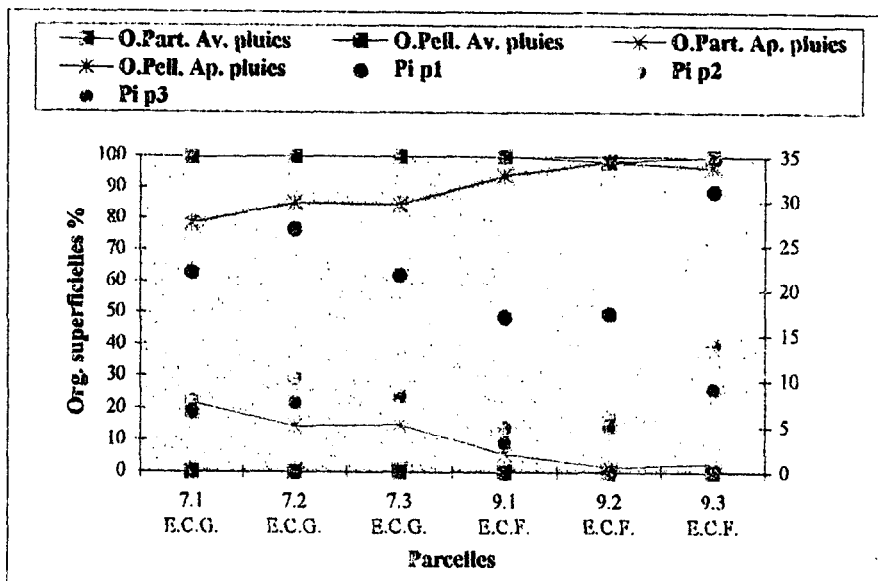


Figure 13. Variation de la pluie d'imbibition (Pi) en fonction de la modification des états de surface dans les parcelles traitées avec engrais chimique.

par contre, sont plus abondantes dans les parcelles à préparation fine : cela s'explique par le fait que la dynamique de fragmentation des petits agrégats et, par conséquent, la formation des croûtes est plus rapides lorsque le sol a été finement labouré (Le Bissonnais, Bruand et Jamagne, 1989-90). Les mêmes observations valent pour l'ensemble des parcelles chimiques, mais on remarque, après les pluies, une présence d'organisations particulières plus importante que dans le traitement avec engrais organique.

#### *IV.2.4 Evolution de l'infiltration suivant les états de surface*

La pluie d'imbibition  $P_i$  représente la hauteur de pluie absorbée par la parcelle avant l'apparition du ruissellement. L'évolution de ces valeurs au cours des trois pluies permet d'évaluer l'état de la porosité en fonction de la modification des états de surface.

En général, on s'attendrait à des valeurs des hauteurs de pluie d'imbibition plus modestes lorsque les croûtes sont plus développées, c'est à dire lorsque la préparation du sol est fine. Ce phénomène devrait être d'autant plus évident que la formation des croûtes évolue, comme au moment de la troisième averse.

La figure 12 montre un comportement de  $P_i$  dans les parcelles organiques différent par rapport à ce à quoi on s'attendait. En effet, nous retrouvons dans la parcelle à préparation grossière (P2 E.O.G.) un recouvrement pelliculaire moins important que sur P4 E.O.F., la parcelle à préparation fine. Cependant, la pluie d'imbibition  $P_i$  est plus faible en P2.

Cette dégradation de la porosité n'est donc pas ici dépendant directement des états de surface mais de l'état hydrique initial du sol.

La figure 13 représente, par ailleurs, le comportement des parcelles chimiques. Ici la tendance du sol dans la parcelle grossière, où les organisations pelliculaires sont moins évidentes que dans celle fine, est de tarder à se saturer d'eau. La hauteur de  $P_i$  est, en effet, au cours de toutes les averses plus importante en P7 que en P9 (sauf pour P9.3). Le phénomène est provoqué non seulement par la moindre présence des croûtes en P7, mais aussi par la persistance d'éléments grossiers, qui ne se désagrègent pas en particules plus fines («ciment» indispensable à la formation des croûtes).

#### *IV.2.5 L'indice de rugosité IR*

La méthode du point quadrat permet, aussi, de mesurer la variation de la rugosité du sol qui quantifie l'action battante de la pluie. Après l'impact d'une averse la configuration superficielle du sol change ; par conséquent, les hauteurs, par rapport à l'horizontale, de tous les éléments qui font partie des organisations particulières et pelliculaires changent aussi.

La détermination de telles hauteurs a été conduite avant la première pluie  $p_1$  et après la troisième  $p_3$ , ce qui n'a permis que d'évaluer l'effet global des trois pluies (et pas celui de chaque averse) sur la rugosité des parcelles.

Le tableau IX indique une diminution généralisée de IR à la fin de la troisième pluie (sauf le cas de la P4.2), en raison de la désagrégation des particules de terre, indépendamment de la préparation du sol.

Au sein de chaque traitement, organique et chimique, les parcelles à préparation grossière P2 et P7 présentent une différence d'indice de rugosité plus marquée que dans les parcelles à préparation fine P4 et P9 en raison du traitement même de la parcelle : les grosses particules en P2 et P7 sont évidemment plus abondantes dans la préparation grossière et leur disparition sous l'impact de la pluie crée une différence plus haute entre IR avant et après les pluies.

Les parcelles chimiques, par contre, occupées par un pourcentage plus fort d'organisations particulières, en raison de la présence de fragments durs de *cangahua*, présentent un indice de rugosité IR plus marqué que celles organiques, même avant la première pluie p1.

Le tableau X indique la différence moyenne de IR dans chaque parcelle.

Il est intéressant de remarquer que lors du traitement organique, les nouvelles structures qui se sont formées grâce à l'apport de matière organique (observations déduites des mesures de stabilité structurale) sont encore fragiles et donc sensibles à l'impact de la pluie. Cependant, la différence de l'indice de rugosité avant et après les averses reste limitée (IR = 0,091 pour P2 et IR = 0,049 pour P4) par rapport aux parcelles traitées avec engrais chimique (IR = 0,116 pour P7 et IR = 0,069 pour P9).

Le sol qui a reçu une fertilisation chimique est riche en fragments et paraît donc plus sensible à l'effet d'humectation-dessiccation. La porosité reste plus élevée, ce qui explique la meilleure capacité d'infiltration de ce sol par rapport au sol à traitement organique.

Tableau IX. L'indice de rugosité IR avant la première pluie p1 et après la troisième pluie p3.

Parcelle	IR Av p1	IR Ap p3
2.1 E.O.G.	1,213	1,171
2.2 E.O.G.	1,215	1,131
2.3 E.O.G.	1,409	1,262
4.1 E.O.F.	1,248	1,139
4.2 E.O.F.	1,149	1,161
4.3 E.O.F.	1,223	1,175
7.1 E.C.G.	1,522	1,463
7.2 E.C.G.	1,632	1,464
7.3 E.C.G.	1,546	1,424
9.1 E.C.F.	1,278	1,204
9.2 E.C.F.	1,275	1,202
9.3 E.C.F.	1,242	1,180

Tableau X. Différence moyenne de l'indice de rugosité IR avant et après les averses dans chaque parcelle.

Parcelle	Diff. moy IR
P 2 E.O.G	0,091
P 4 E.O.F	0,049
P 7 E.C.G	0,116
P 9 E.C.F	0,069

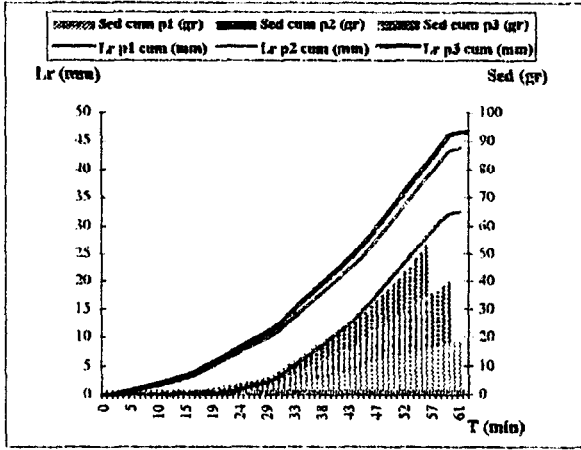
Globalement, l'essai au champ a révélé que le sol traité avec engrais organique est moins sensible à l'impact des averses, même si les mesures de stabilité au laboratoire (qui seront présentées dans un paragraphe suivant) indiquent la forte présence dans ce sol de structures qui se désagrègent après le tamisage en eau.

Inversement, même si le sol traité avec engrais chimique révèle au laboratoire une plus forte résistance au tamisage en humide, au champ il reste sujet encore intensément à l'effet d'humectation - dessiccation dont le résultat est une plus forte proportion d'organisations particulières, ce qui le rend poreux et plus perméable.

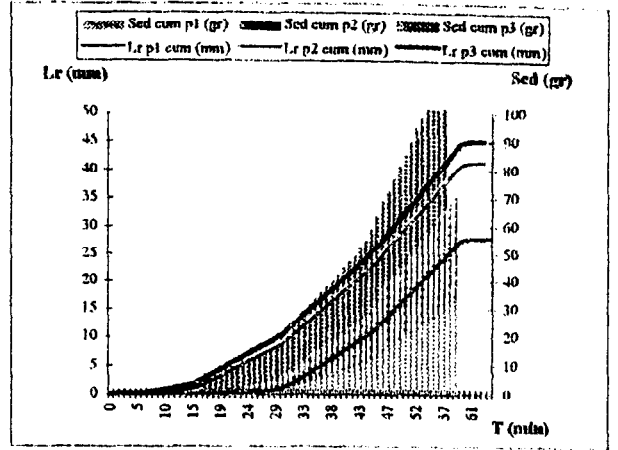
**Préparation grossière du sol**

**Préparation fine du sol**

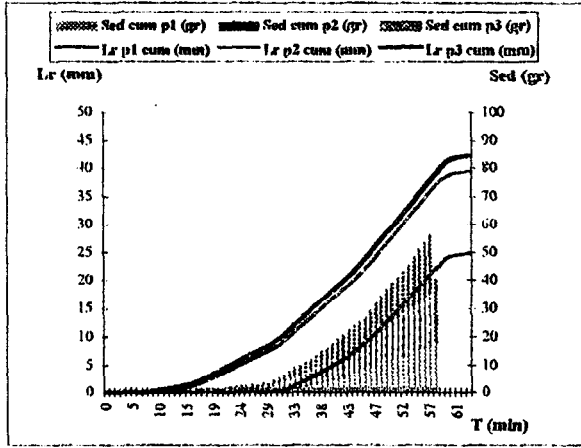
**P2.1**



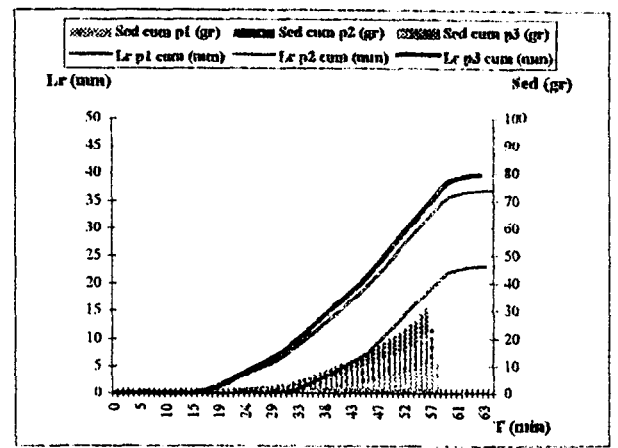
**P4.1**



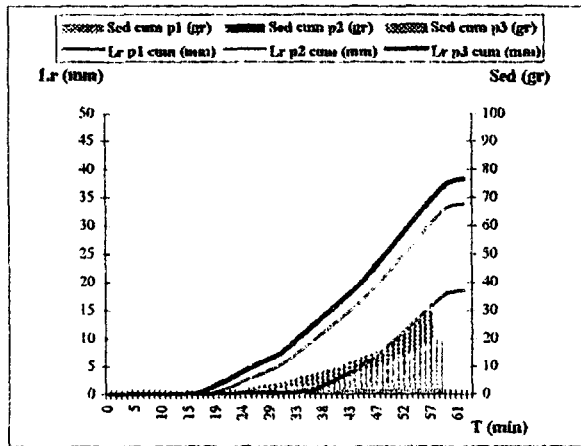
**P2.2**



**P4.2**



**P2.3**



**P4.3**

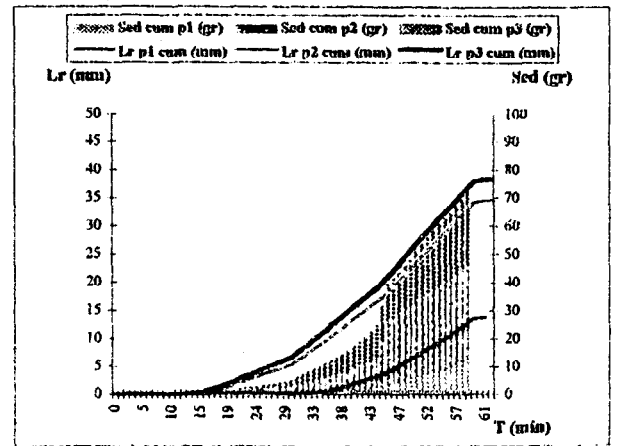


Fig. 14. Evolution des sédiments en fonction de la lame ruisselée (Lr), au cours des trois averses, dans les parcelles traitées avec engrais organique.

### IV.3 Transport solide

La simulation de pluie permet d'évaluer la détachabilité de la surface du sol mais ne rend pas possible une mesure de l'érosion, car la faible longueur de pente à l'intérieur du mètre carré, sur lequel est conduite la manipulation, ne permet pas à l'énergie du ruissellement de s'exprimer (Roose et Smolikovski, 1997) : il faut, en effet, au moins de 5 à 20 m pour que naissent des rigoles selon le type de sols et les techniques culturales appliquées.

Tous les processus, déjà évoqués, liés à l'analyse des hydrogrammes, sont dépendants des modifications structurales de la surface du sol. Ces modifications se traduisent par les dégradations d'organisations superficielles accompagnées de pertes de matière plus ou moins importantes.

Les figures 14 et 15 expriment les quantités de sédiments transportés en fonction des lames ruisselées au cours des trois pluies dans chaque échantillon des quatre parcelles.

On observe que, au sein du traitement organique, pour des valeurs de lame ruisselée similaires en P2 et P4 correspondent des quantités de sédiments transportés plus marquées en P4. Le tableau XI sert à résumer et comparer les tendances des données moyennes de charge solide (C.S.), exprimée en  $gr/m^2$ , et les valeurs moyennes correspondantes des lames ruisselées relatives à chaque pluie et aux parcelles organiques.

Tableau XI. Charges solides ( $g/m^2$ ) et lames ruisselées Lr (mm) pour les parcelles à traitement organique.

Pluie	Lr moy P2	Charge Solide P2	Lr moy P4	Charge Solide P4
p1	23,97	15,13	20,17	19,34
p2	37,53	15,95	36,01	27,73
p3	40,48	18,20	39,26	28,84

Même si l'intensité du ruissellement paraît un peu plus forte dans la parcelle grossière P2, les sédiments de la préparation fine sont les mieux entraînés par le ruissellement. Le transport solide du matériel augmente d'une averse à l'autre en raison de l'état de saturation du sol, qui devient de plus en plus marqué et favorise le ruissellement.

Les parcelles chimiques ont un comportement différent : la figure 15 montre dans tous les cas la tendance des lames ruisselées à atteindre des valeurs plus faibles de celles des parcelles organiques et cela vaut, aussi, par conséquence, pour les charges solides transportées.

Le tableau XII décrit la situation pour les parcelles chimiques : on en peut déduire une certaine difficulté à tirer des conclusions sur la relation entre lames ruisselées et détachabilité des particules du sol. La première pluie semble confirmer la théorie qu'un ruissellement plus fort entraîne plus de sédiments, ce qui se passe en P9, la parcelle à préparation fine ; au cours de l'averse successive, par contre, cette tendance n'est plus respectée car la lame d'eau plus faible en p2 s'accompagne du maximum de charge solide. La pluie p3 reconferme la théorie générale pour P9.

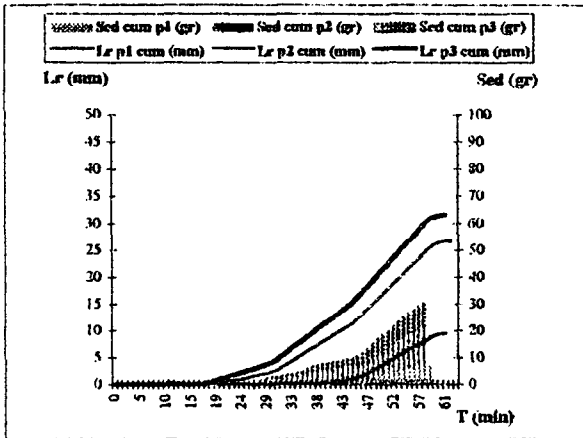
Tableau XII. Charges solides et lames ruisselées pour les parcelles à traitement chimique.

Pluie	Lr moy P7 (mm)	Charge solide P7 ( $g/m^2$ )	Lr moy P9 (mm)	Charge solide ( $g/m^2$ )
p1	9,12	6,17	12,94	7,65
p2	24,70	9,64	26,85	6,21
p3	30,18	7,01	31,92	7,90

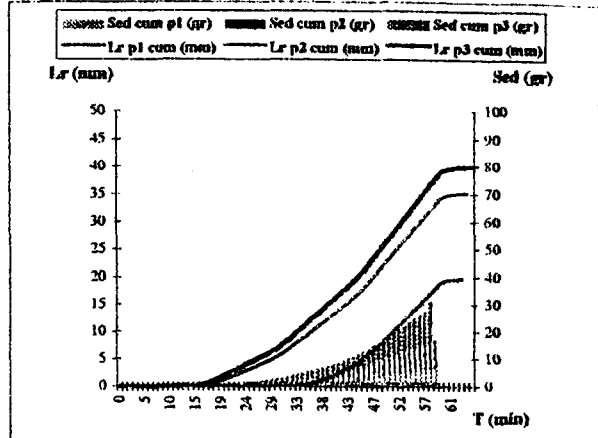
Préparation grossière du sol

Préparation fine du sol

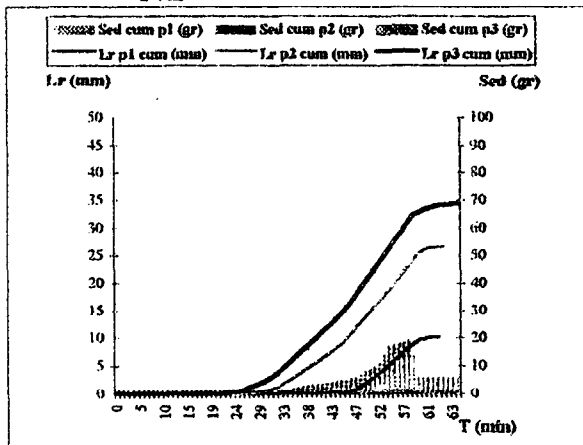
P7.1



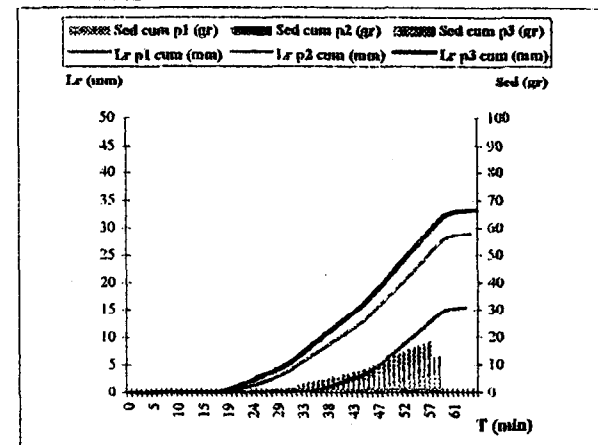
P9.1



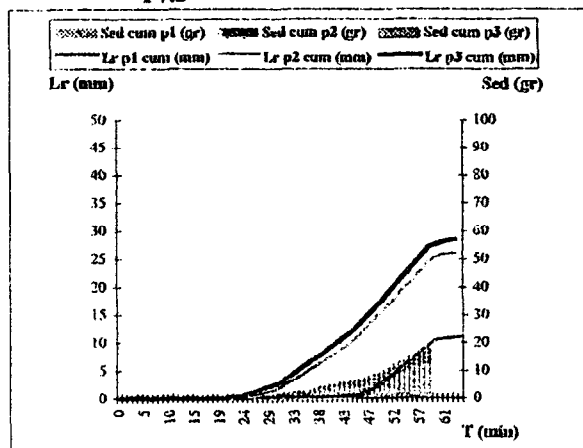
P7.2



P9.2



P7.3



P9.3

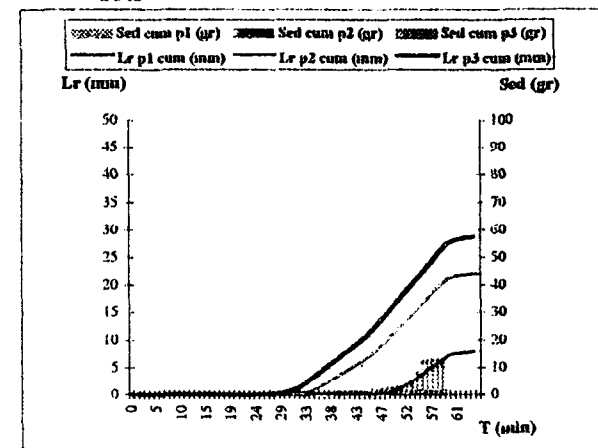


Fig.15. Evolution des sédiments en fonction de la lame ruiselée (Lr), au cours des trois averses, dans les parcelles traitées avec engrais chimique.



Globalement, comme deux valeurs sur trois de C.S. sont plus forts en P9 qu'en P7, le poids de la préparation du sol semble ici faiblement déterminant dans la relation entre ruissellement et charge solide pour provoquer une érosion plus forte lors de la préparation fine.

L'étude de la stabilité et d'autres paramètres utiles à comprendre le phénomène de l'infiltrabilité d'un sol sont présentés dans le paragraphe suivant.

#### **IV.4 Les caractéristiques physiques et chimiques du sol (stabilité structurale, densité apparente, taux de matière organique)**

##### ***IV.4.1 La stabilité structurale***

Les figures 16 et 17 montrent les résultats de la stabilité des fractions d'agrégats, calculée en sec et en humide, dans les parcelles organiques et chimiques. L'indice AIH (Agrégats Instables en Humide), qui apparaît dans les figures, représente la somme des différences entre le poids en sec et en humide de chaque classe d'agrégats.

Dans les parcelles organiques la différence entre l'analyse en sec et celle en humide est plus marquée. Les éléments de diamètre supérieur à 12,7 mm se désagrègent à l'avantage des particules les plus fines qu'on retrouve très abondantes dans l'analyse en humide, d'autant plus lorsque la préparation du sol est fine.

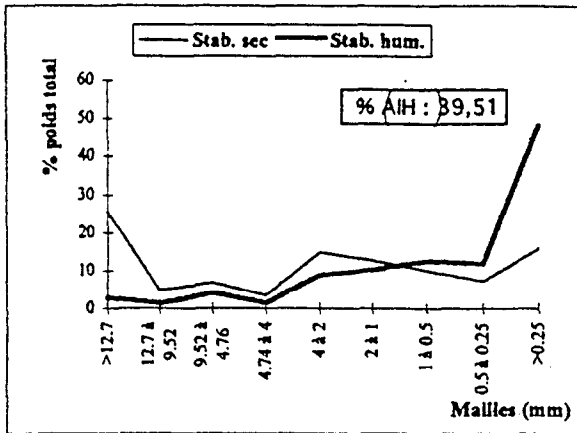
Le passage de l'eau a provoqué la disparition d'une quantité remarquable de matériel dans la parcelle P2, comme indique le pourcentage d'Agrégats Instables en Humide (AIH), qui est ici supérieur à toutes les autres parcelles (AIH = 39,51%). La désagrégation d'éléments fragiles et riches en matière organique de cette parcelle témoigne la formation de nouvelles structures. Même si la stabilité de ces néoformations est encore faible en raison de la récente introduction d'engrais, leur présence permet déjà d'apprécier les premiers effets de cet apport de matière organique sur la structure du sol. Au sein du traitement organique la texture fine du sol de P4 semble réagir moins à l'incorporation du fumier, comme indique le pourcentage des Agrégats Instables en Humide AIH de 23,84 %.

Les parcelles chimiques, par contre, ne présentent pas de différences remarquables entre l'analyse de la stabilité en sec et en humide ; les quantités d'éléments d'une certaine taille se retrouvent presque invariées après le passage de l'eau. L'indice d'Agrégats Instables en Humide AIH est faible en P7 et très faible en P9, car les néoformations sont ici presque absentes. Les structures qui persistent dans l'analyse en humide sont les mêmes présentes dans celle en sec. Il s'agit, en effet, des durs fragments de *cangahua* qui sont pauvres en matière organique et peu sensibles à la désagrégation provoquée par le passage de l'eau.

L'apport d'engrais organique au sol s'avère, donc, comme le traitement le plus favorable à une bonne stabilité du sol à long terme, surtout s'il est associé à un labour de type grossier.

Par contre, même si on observe des légers avantages en terme de stabilité dans P7, l'engrais chimique ne semble avoir qu'un faible effet sur ce paramètre physique, car la structure du sol reste à peu près invariée après son introduction.

**P 2 Préparation grossière (engrais organique)**



**P4 Préparation fine (engrais organique)**

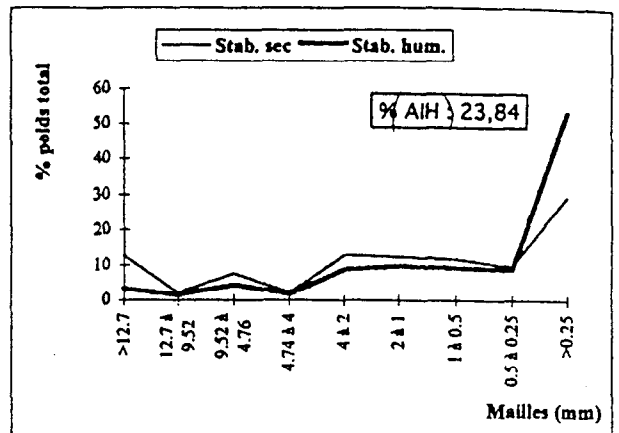
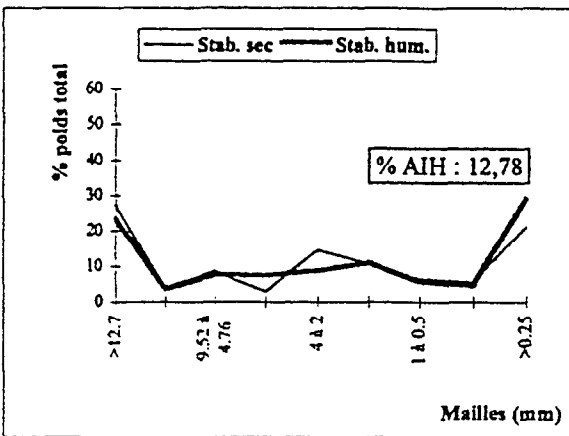


Figure 16. Stabilité des agrégats en sec et en humide, selon leur taille, et pourcentage d'Agrégats Instables en Humide (AIH) dans les parcelles traitées avec engrais organique.

**P 7 Préparation grossière (engrais chimique)**



**P 9 Préparation fine (engrais chimique)**

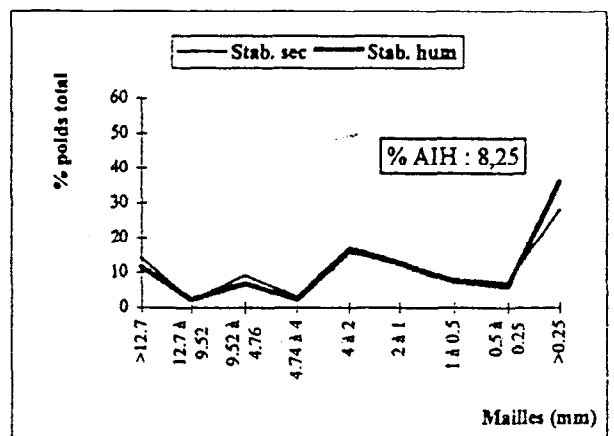


Figure 17. Stabilité des agrégats en sec et en humide, selon leur taille, et pourcentage d'Agrégats Instables en Humide (AIH) dans les parcelles traitées avec engrais chimique.

#### **IV.4.2 Le taux de matière organique et la densité apparente**

Les mesures de ces paramètres ont permis d'évaluer des différences importantes entre parcelles du point de vue de l'activité biologique du sol et de sa structure.

Le tableau XIII montre que les valeurs plus fortes du taux de matière organique sont associées à un pourcentage plus fort d'Agrégats Instables en Humide AIH, ce qui confirme l'influence de l'apport de fumier sur la structure du sol en particulier de P2 et, ensuite, de P4. Par contre, les mesures de densité apparente ne varient pas pour les deux types de préparation du sol.

Tableau XIII. Récapitulation des propriétés physiques et chimiques des parcelles.

<b>Parcelle</b>	<b>Traitement</b>	<b>Agr.Inst.Hum. AIH (%)</b>	<b>Taux M.O.</b>	<b>Densité app.</b>
<b>P2</b>	E.O.G.	39,51	1,05	1,02
<b>P4</b>	E.O.F.	23,84	0,98	1,02
<b>P7</b>	E.C.G.	12,78	0,61	1,08
<b>P9</b>	E.C.F.	8,25	0,36	1,17

Le taux de M.O. diminue dans les parcelles chimiques P7 et P9, tandis que la densité devient de plus en plus importante jusqu'à atteindre une valeur de 1,17 en P9. Ces mesures permettent de mettre en évidence l'étroite relation qui existe entre le taux de M.O. qui détermine directement la densité et la stabilité des néo-agrégats d'autant plus faible que cette densité est faible.

## V. DISCUSSION

Cette étude se propose d'analyser la productivité du sol soumis à différentes techniques d'amélioration de la fertilité. Dans le contexte de la *cangahua*, une telle amélioration est considérée comme une réhabilitation du sol en prenant en compte son extrême sensibilité à l'érosion.

Roose et Sarrailh (1989-90) indiquent que l'érodibilité d'un sol est fonction de ses propriétés hydrodynamiques et structurales qui dépendent fortement du travail du sol et du taux de matière organique présent. Les résultats des tests sur le bilan hydrique des parcelles nous permettent, donc, de tirer des informations sur la capacité d'infiltration de l'eau et sur la susceptibilité à l'érosion de la *cangahua*.

Par ailleurs, les mesures de stabilité et de densité, conduites au laboratoire, complétées par les données sur la fertilité, nous permettent d'estimer les types d'engrais et le type de travail du sol souhaitables dans une optique de réhabilitation du sol à long terme.

### V.1 Le comportement hydrodynamique des parcelles expérimentales

Le comportement hydrique des sols est intimement lié à sa préparation fine ou grossière plus qu'à son type de fertilisation.

La structure fine réagit comme une structure particulière (sableuse) et permet une infiltration rapide lors des deux premières intensités pour la première pluie. Une formation importante de croûtes de surface réduit drastiquement la porosité pour les pluies successives.

Par contre, si la préparation grossière permet un ruissellement plus important dans un premier temps, elle résiste mieux à l'agressivité des pluies et permet une dynamique hydrique plus constante à long terme. La preuve notable en est le stockage hydrique plus important pour les parcelles grossières, pour l'ensemble des pluies, que pour les parcelles fines.

### V.2 La sensibilité à l'«érosion» des parcelles expérimentales

Les parcelles fines ont une tendance à produire une exportation de matériaux plus forte que les parcelles à préparation grossière qui du fait de leur rugosité limitent le transport solide.

Si les parcelles fines ont produit plus de sédiments que les parcelles grossières au cours de notre expérimentation, cela résulte du seul fait que le ruissellement fut plus important sur les parcelles avec amendements organiques que celles avec fertilisation chimique.

### V.3 Les relations entre la stabilité et la fertilité dans les parcelles organiques

Des observations faites sur la productivité de parcelles soumises à différents traitements agronomiques, notamment par fertilisation avec engrais vert, ont révélé l'utilisation de l'engrais organique et de l'engrais chimique comme les plus souhaitables en terme d'optimisation du rendement. La finalité de cette recherche est, bien sûr, d'améliorer la fertilité du sol, mais aussi de proposer une gestion mieux adaptée et plus durable de la *cangahua* réhabilitée.

Les mesures de densité apparente ont révélé des valeurs assez faibles pour les parcelles organiques (1,02 pour les deux types de préparation du sol, grossière et fine).

Par contre, le pourcentage très fort d'agrégats instables en humide indique la forte présence de nouvelles structures qui, pour l'instant, ne sont pas encore assez stables, mais qui témoignent de la dépendance de la stabilité structurale de l'apport de matière organique.

#### V.4 Les relations entre stabilité et fertilité dans les parcelles chimiques

Le taux de M.O. mesuré révèle, par contre, une faible activité biologique dans le sol qui ne peut donc pas assurer un bon développement et fonctionnement de la vie microbienne racinaire dont dépend la productivité. Cependant, l'action de la fertilisation minérale a permis d'obtenir de très bons rendements, en particulier dans P9, lorsqu'elle était associée à la préparation fine du sol.

L'utilisation de ce type d'engrais est souvent liée à des exigences d'amélioration rapide de la productivité. Dans une optique de faisabilité, la facilité de dispersion de cet engrais et son action directe, due à sa composition en éléments facilement assimilables par les plantes, feraient préférer son emploi à celui d'un engrais de type organique.

Les valeurs de densité apparente, relativement élevées, témoignent une faible porosité du sol, mais l'infiltration de l'eau en profondeur est due à la persistance des fragments de *cangahua*. A long terme, la destruction de ces fragments s'accompagnera d'une fermeture progressive de la porosité et d'une diminution de l'infiltration.

La préparation grossière de la parcelle P7 paraît favoriser le bon fonctionnement hydrodynamique du sol, même si notre étude n'a pas révélé de meilleurs résultats dans les parcelles traitées de la sorte.

## VI. CONCLUSION

Du point de vue du bilan hydrique, les résultats des tests de simulations de pluie ont permis de caractériser l'influence des traitements culturaux sur l'érodibilité de ce sol ; en général, l'érosion augmente en fonction de la diminution de la taille des agrégats, ce qui se vérifie, en effet, au sein du traitement avec engrais organique, dans la parcelle P4.

Les parcelles avec traitements chimiques ont démontré un plus faible transport solide lié à une lame ruissellée nettement inférieure à celle des parcelles organiques.

Une telle susceptibilité à l'érosion contraste avec les exigences de rentabilité et durabilité du bon rendement des cultures, qui doit être garanti le plus longtemps possible. Comment peut-on favoriser la résistance d'un sol à l'agressivité des pluies? L'incorporation de matière organique dans le sol est, certes, une méthode très efficace pour augmenter la stabilité structurale (l'action favorable de l'apport de matière organique sur la stabilité a été démontrée à plusieurs reprises (Sebillotte, 1968 ; Boiffin et Monnier 1986 ; Valentin et Janeau, 1989-90)), l'activité biologique et le bon fonctionnement du système racinaire, mais un gain de 1% de matières organiques dans l'horizon labouré n'entraîne qu'une faible diminution de l'érosion, comme concluent Roose E. et Sarrailh, 1989-90. Le comportement des parcelles P2 et P4 semble répondre assez bien à ces observations.

D'un point de vue agronomique le stockage de l'eau est favorisé par une préparation grossière du sol, le sol ayant une tendance à se ressuyer moins vite avec un apport organique et les rendements étant similaire, ce traitement agronomique est donc à privilégier.

Un paramètre comme le taux de matière organique ne se modifie que lentement ; il faut, donc, prévoir des temps longs de stabilisation de la structure du sol et de bons résultats, durables, en terme de rendement, comme témoigne le peu d'influence du fumier, au bout de deux mois, sur les propriétés physiques du sol dans les recherches de Roose, Assogba et Guillermin en 1997. Ces temps d'attente deviennent d'autant plus longs en zone tropicale, où les processus de minéralisation de la matière organique sont très rapides.

Les techniques culturales appliquées par les paysans équatoriens comprennent, parfois, l'utilisation de fumier, surtout de fumier de poulet, car de nombreux élevages de ce volatile existent notamment dans la zone d'étude (De Noni *et al.*, 1996), mais les coûts de ce type d'engrais sont souvent prohibitifs pour le petit agriculteur du *minifundio*, la propriété agricole la plus commune dans le contexte du paysage andin.

Pour ce qui concerne le choix du type de travail du sol, souvent encore manuel, la préparation grossière garantit, globalement, une résistance relativement plus forte à l'érosion par rapport à la préparation fine. La matière organique introduite provoque l'apparition de nouvelles structures fragiles qui sont le signe d'une activité biologique plus intense susceptible d'améliorer la stabilité du sol au cours du temps. Ces résultats, en fait, sont préliminaires, car une étude de la stabilité structurale doit être conduite sur plusieurs années pour pouvoir en tirer des conclusions sur les effets réels de l'apport de M.O. sur les sols. Pour l'instant, les avantages de ce caractère de rentabilité à long terme peuvent seulement être aperçus. Ce type de sol, en effet, a révélé une fragilité ou facilité à la désagrégation de l'horizon de surface encore trop intense.

Afin de confirmer ces résultats et de pouvoir les extrapoler au niveau du champ, il est souhaitable, notamment pour une étude du transport solide, d'effectuer ce genre de mesures à long terme et sur parcelle paysanne.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ARIAS H., 1992. Rehabilitación de *tepetates* ; una alternativa para la producción agropecuaria y forestal. *Terra*, Mexico, vol. 10 : 309-317.
- ASSELIN J. et VALENTIN C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM* , sér. *Hydrol.*, 15,4 : 321-347.
- BARSKY O. et al., 1980. *Ecuador : cambios en el agro serrano*. FLACSO-CEPLAES, Quito, 531 p.
- BARSKY O., 1984. *La reforma agraria ecuatoriana*. FLACSO, Quito, 406 p.
- BOLLINNE A. et ROUSSEAU P., 1978. Erodibilité des sols de moyenne et haute Belgique. Utilisation d'une méthode de calcul du facteur K de l'équation universelle de perte en terre. *Bull. Soc. Géogr. de Liège*, 14, 4 : 127-140.
- BRYAN R.-B., 1981. Soil erosion under simulated rainfall in the field and laboratory: variability of erosion under controlled conditions. In : *Proc. Florence Symposium «Erosion and sediment transport measurements»*, IAHS, 135 : 391-403.
- CHEVALLIER P., 1983. L'indice des précipitations antérieures. *Cah. ORSTOM*, sér. *Hydrol.*, 20, 3 : 179-189.
- COLLINET J. et VALENTIN C., 1979. Analyse des différents facteurs intervenant sur l'hydrodynamique superficielle. Nouvelles perspectives - Applications agronomiques. *Cah. ORSTOM*, sér. *Pédol.*, 17, 4 : 283-328.
- COSTALES P. et A., 1971. Reforma agraria. In : *Historia Social del Ecuador*, Casa de la Cultura Ecuatoriana, Quito, 202 p.
- DE NONI G. et VIENNOT M., 1995. Environnement histoire de l'érosion des sols dans les Andes de l'Equateur. In : *Environnement humain de l'érosion..* Réseau Erosion. Bull. 15 : 97-103. ORSTOM Editions, Paris.
- DE NONI G., VIENNOT M., TRUJILLO G. et CUSTODE E., 1997. Ruissellement et érosion sur des parcelles de cangahua réhabilitée (période 1994-1996). In : *Memorias del III Simposio Internacional* (Quito, Décembre 1996). *Suelos volcánicos endurecidos* , ORSTOM Editions, Paris. : 331-342.
- ETCHEVERS J., ZEBROWSKI C., HIDALGO C., QUANTIN P., 1992. Fertilidad de los tepetates. Situation del fosforo y del potasio en tepetates de Mexico y Tlaxcala. *Terra*, 10 (N° spécial : *Primer Simposio Internacional. sobre los suelos volcanicos endurecidos*. 20-26 octubre 1991 ORSTOM - Colegio de postgraduados de Montecillo, Mexico) : 385-391.
- GASSELIN P., 1995. Systèmes de production minifundistes sur sols volcaniques indurés et érodés en Equateur. ORSTOM, Quito, 57 p., annexes.

- LAFFORGUE A., 1977. Inventaire et examen des processus élémentaires de ruissellement et d'infiltration sur parcelles. Application à une exploitation méthodique des données obtenues sous pluies simulées. *Cah. ORSTOM, sér. Hydrol.*, 14, 4 : 243-299.
- LE BISSONNAIS Y., BRUAND A. et JAMAGNE M., 1989-90. Etude expérimentale sous pluie simulée de la formation des croûtes superficielles. Apport à la notion d'érodibilité des sols. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 25, 1-2 : 31-40.
- LEROUX Y., 1996. Caractérisation hydrodynamique de sols volcaniques indurés (Cangahuas), cultivés en Equateur. Mémoire DESS, Gestion des systèmes agro-sylvo-pastoraux en zones tropicales. Univ. Paris XII Val-de-Marne, 79 p., annexes.
- MALDONADO F., 1973. Estudio de una secuencia topo-climática en suelos volcánicos del Ecuador. Thèse Doctorat Géologie, Université de Rijks, 173 p., Ghent, Belgique.
- MARQUEZ - RAMOS A., ZEBROWSKI C. et NAVARRO-GARZA H., 1992. Alternativas agronomicas para la recuperación de tepetates. *Terra*, 10 : 465-473.
- MOREL R., 1996. *Les sols cultivés*. Ed. Lavoisier Tech. and Doc., Paris, 314 p.
- POSS R., PLEUVRET C. et SARAGONI H., 1989-90. Influence des réorganisations superficielles sur l'infiltration dans les terres de Barre (Togo méridionale). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 25, 4 : 405-415.
- QUANTIN P. *et al.*, 1992. Etude des sols volcaniques indurés « tepetates » des Bassins de Mexico et de Tlaxcala, en vue de leur réhabilitation agricole. In : Rapp. Sci. Final, Programme CEE n° TS2-A212C, 77p.
- QUANTIN P. et ZEBROWSKI C., 1995. Impact de l'homme sur l'érosion des sols à « tepetate » de la region de Mexico. In : *Environnement humain de l'érosion*. Réseau Erosion. Bull. 15 : 104 -110. ORSTOM Editions, Paris.
- ROOSE E. et SARRAILH J.-M., 1989-90. Erodibilité de quelques sols tropicaux. Vingt années de mesures en parcelles d'érosion sous pluies naturelles. *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 25, 1-2 : 7-30.
- ROOSE E. et SMOLIKOVSKI B., 1997. Comparaison de trois techniques de mesure de l'infiltration sur fortes pentes : monocylindre et 2 simulateurs de pluies. Application à un versant de la vallée de Godim au Cap Vert. In : *Erosion et montagnes semi-arides et méditerranéennes*. Réseau Erosion. Bull. 17.: 282-296. ORSTOM Editions, Paris.
- SOLTNER D., 1996. *Les bases de la productivité végétale. Tome I : Le sol et son amélioration*. 21ème édition 1996. Editions Collection Sciences et techniques agricoles. Sainte-Gemmes-Sur-Loire, 464 p.
- TRUJILLO G. et ARIAS J., 1997. Productividad en cangahua rehabilitada. Ensayos agronómicos. Memorias del III Simposio Internacional (Quito, Décembre 1996). In : *Suelos volcánicos endurecidos*, ORSTOM Editions, Paris. : 260-270.



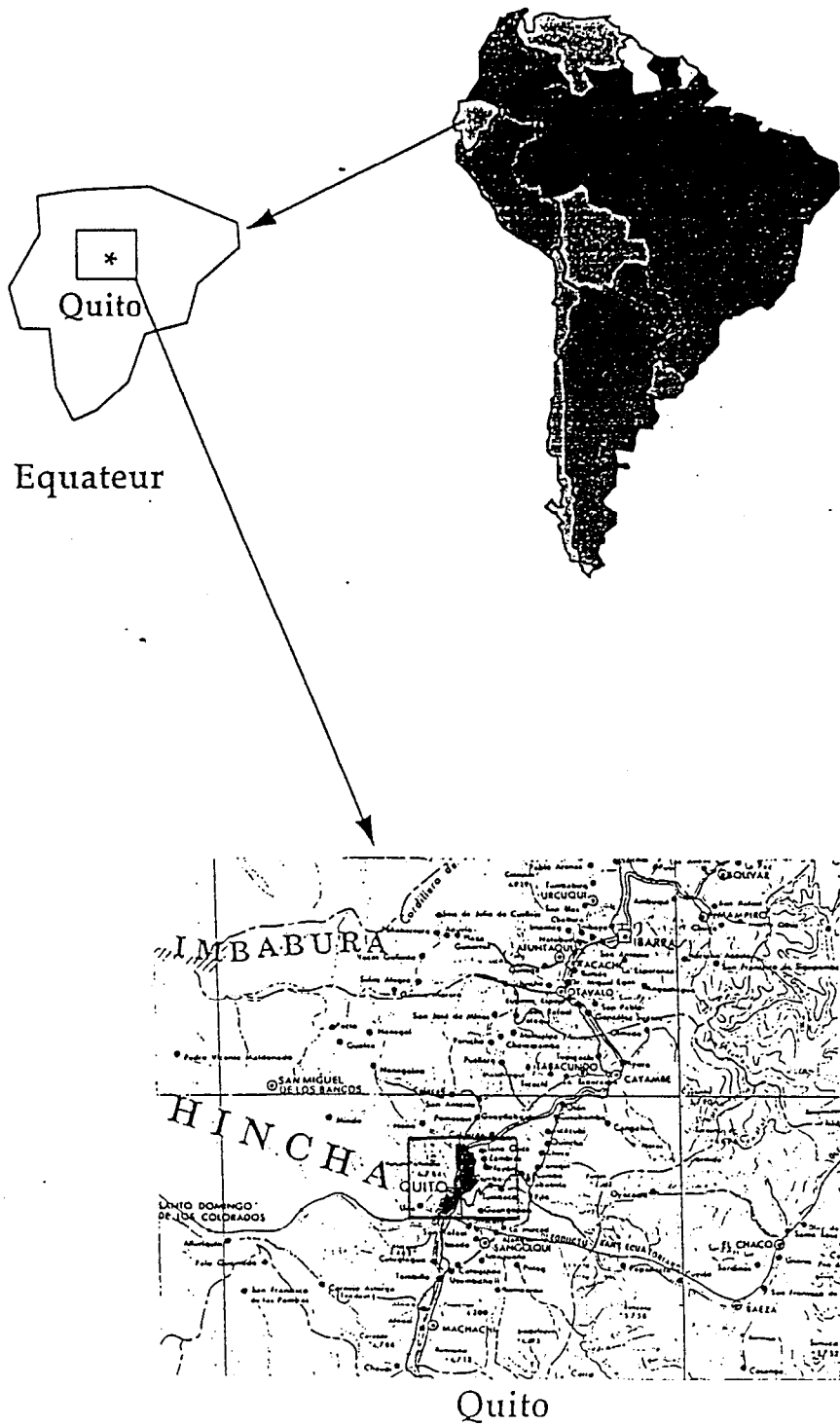
- VALENTIN C. et JANEAU J.-L., 1989-90. Les risques de dégradation structurale de la surface des sols en savane humide (Côte d'Ivoire). *Cah. ORSTOM, sér. Pédol.*, 25, 1-2 : 41-52.

- WINCKELL A. et ZEBROWSKI C., 1992. La cangahua en Equateur, le contexte paléogéographique de sa formation. *Terra*, 10 (N° spécial : *Primer Simposio Internacional sobre los suelos volcanicos endurecidos*). 20-26 octobre 1991 ORSTOM - Colegio de postgraduados de Montecillo, Mexico) : 107 - 112.

- ZEBROWSKI C., QUANTIN P. et TRUJILLO G., 1997. *Suelos volcánicos endurecidos*. Memorias del III Simposio Internacional (Quito, Décembre 1996), ORSTOM Editions, Paris, 510 p.

- ZEBROWSKI C. et SANCHEZ B., 1997. Los costos de rehabilitación de los suelos endurecidos. Memorias del III Simposio Internacional (Quito, Diciembre 1996). In : *Suelos volcánicos endurecidos* , ORSTOM Editions, Paris. : 462 - 471.

# ANNEXES



Annexe I. Localisation de la zone d'étude en Amérique du sud.

## Annexe II. Carbone organique total.

La méthode la plus couramment utilisée pour la mesure de la concentration de carbone organique est celle de Walkley et Black.

Le principe analytique se fonde sur l'action oxydante, à froid, du bichromate de potassium en excès sur le carbone, en milieu sulfurique. Le carbone ne réduit qu'une partie du bichromate, tandis que celle qui reste est réduite par le titrage avec une solution de sel de Mohr ( $\text{FeSO}_4$ ); le moment où le sel neutralise l'excès de bichromate est mis en évidence par le point de virage de bleu à vert de l'indicateur diphénylamine.

Pour ce qui concerne la quantité qui doit être choisie pour l'analyse, elle dépend du pourcentage d'azote total. Dans notre cas le poids de chaque échantillon est de 0.50 gr pour les parcelles traitées avec de l'engrais organique (dont le sol contient donc, à priori, assez de matière organique) et de 1 gr pour toutes les autres.

Les réactifs nécessaires à l'analyse sont une solution 1N de bichromate de potassium ( $\text{K}_2 \text{Cr}_2 \text{O}_7$ ), une solution de sel de Mohr ( $\text{Fe}(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ) 0.5N en milieu sulfurique 0.5N,  $\text{H}_2 \text{SO}_4$  concentré, diphénylamine et  $\text{H}_3\text{PO}_4$  concentré.

Il est nécessaire de bien vérifier la normalité de la solution de sel de Mohr pour qu'on puisse sortir un facteur F de correction qui sera appliqué aux valeurs du titrage des échantillons et du «blanc» (réactifs sans échantillon de sol).

Dans ce but, on prépare un mélange de réactifs comme celui qu'on utilisera pour les mesures de l'azote des échantillons. On mesure, donc, très précisément, 10 ml de dichromate de potassium, auquel on ajoute 200 ml d'eau distillée, 10 ml d'acide phosphorique et 8 gouttes de diphénylamine. On titre avec le sel de Mohr et on retient la valeur comme facteur de correction de la normalité F.

On commence à ce point là le dosage de l'azote : on pose les échantillons de sol dans des meyers de 500 ml ; on remplit une burette de 50 ml avec la solution de ( $\text{K}_2 \text{Cr}_2 \text{O}_7$ ) et on en ajoute 10 ml dans chaque meyers.

Ensuite on additionne dans les meyers mêmes 20 ml de  $\text{H}_2 \text{SO}_4$  concentré ; on agite un peu pour que le liquide s'homogénéise et on laisse reposer pendant une demie heure. Il faut bien faire attention que la préparation des différents échantillons soit complétée entre le même intervalle de temps.

Une fois passées les 30 minutes, à chaque échantillon on ajoute dans l'ordre 200 ml d'eau distillée, 10 ml de  $\text{H}_3\text{PO}_4$  et 8 gouttes d'indicateur.

On remplit, ensuite, une autre burette de 25 ml avec la solution de sel de Mohr qui servira à titrer l'excès de bichromate. La couleur de la diphénylamine passe, au point de virage, de bleu à vert, comme on a déjà dit. Généralement, la quantité de sel utilisée va de 7 à 16 ml.

On peut déduire, enfin, à l'aide de simples calculs, le pourcentage de carbone total et le taux de matière organique pour ce sol :

- A volume du sel de Mohr 0.5N utilisé dans le titrage de l'échantillon ;
- B volume du sel de Mohr utilisé dans le titrage du « blanc » ;
- F facteur de correction de la normalité du sel de Mohr ;
- P poids de l'échantillon.

Sur la base de mesures standardisées on sait que 1 ml de  $\text{K}_2 \text{Cr}_2 \text{O}_7$  correspond à 3.9 mg de carbone.

Une remarque ultérieure concernant la formule qu'on va utiliser est que le sel de Mohr ayant une normalité de 0.5, elle doit être élevée à celle du dichromate de potassium (1N) ; il faudra, donc, diviser par 2, les deux volumes nécessaires pour l'échantillon et le blanc.

$$\frac{(B-F) - (A-F)}{2} \times 0.39 = \% \text{ de carbone total dans le sol échantilloné}$$

Le taux de matière organique M.O. sera obtenu en multipliant le pourcentage de carbone total par un facteur de 1,724 :

$$\% \text{ carbone} \times 1,724 = \% \text{ M.O. dans l'échantillon}$$

### Annexe III. Mesures de stabilité structurale.

On appelle stabilité structurale, dans un sol, l'ensemble des agrégats de différentes dimensions, formes, porosités, qui présentent une résistance différente et solidité mécanique par rapport aux agents de dégradation, tous liés à l'eau.

La méthode est de très simple application ; sur la base des différences entre le matériel présent au début et celui qui disparaît après l'analyse humide on peut déduire la stabilité des agrégats.

On commence par le prélèvement d'un échantillon de sol gardé le plus possible intact, c'est à dire non concassé. Trois échantillons ont été prélevés de façon homogène sur chaque parcelle pour garantir une représentativité statistique. On enlève soigneusement de l'échantillon les racines et autres inclusions.

On passe alors au tamisage du sol ; les dimensions des mailles des tamis utilisés étaient les suivantes : 12,7 ; 9,52 ; 4,76 ; 4 ; 2 ; 1 ; 0,5 ; 0,25 mm. On a pesé 250 gr environ de sol et on l'a tamisé sur la colonne de tamis sans trop la secouer. On a recueilli dans chaque tamis les fractions de sol et on les a pesées, en obtenant le pourcentage de la masse de différentes dimensions du sol sec à l'air.

Pour l'analyse de la stabilité en humide on dépose, sans les casser, les mêmes fractions dans un cylindre , en éliminant la fraction la plus fine, celle inférieure à 0,25 mm, afin de ne pas obstruer les mailles les plus fines. On remplit le cylindre avec de l'eau, au début avec précaution, à l'aide d'une pissette pour éviter que se forment des bulles d'air qui pourraient détruire les agrégats. On le bouche, on le retourne quatre fois et on poursuit avec le tamisage en eau, comme précédemment, en séparant les fractions de sol de différents diamètres. Celles-ci sont laissées à sécher à l'air, puis pesées.

Le pourcentage des particules  $< 0,25$  mm est déterminé en soustrayant de 100% du total la somme des pourcentages des autres fractions obtenues.

On a calculé un autre paramètre, le pourcentage d'Agrégats Instables en Humide, qui rassemble toutes les valeurs positives de IS des fractions recueillies dans les différentes mailles (les valeurs négatives représentent la partie du sol qui a été détruite par l'action de l'eau).

Afin de comparer les fractions plus significatives au niveau de l'analyse on pourrait éviter de considérer les fractions  $< 0,25$  mm et celles  $> 12,7$ , mm en faisant une différence entre les fractions restantes en sec et en humide.

**Annexe IV.** L'intensité d'infiltration minimale Fn, l'intensité de ruissellement maximal Rx, la pluie d'imbibition Pi, la pluie utile Pu, la lame ruisselée Lr et le coefficient de ruissellement Kru pour l'ensemble des parcelles.

Parc. organ.	Pluies	Fn (inf. min.) (mm/h)				Rx (Int max) (mm/h)				P (mm)	Pu (mm)	Lr (mm)	Kru (%)
		I1	I2	I3	I4	I1	I2	I3	I4				
2.1 Gross.	p1	20,88	20,52	11,16	9,36	0,00	17,28	48,60	71,28	7,74	49,77	32,52	65,3
	p2	6,84	7,56	6,48	5,76	14,04	30,24	53,28	74,88	0,35	49,77	43,88	88,2
	p3	5,04	5,40	3,60	3,24	15,84	32,40	56,16	77,40	0,70	49,77	46,48	93,4
2.2 Gross.	p1	20,24	38,87	19,34	16,08	0,00	1,62	41,40	63,72	14,35	50,32	24,7	49,1
	p2	10,88	12,05	9,26	8,88	9,36	28,44	51,48	70,92	2,37	50,32	39,42	78,3
	p3	8,00	9,89	6,74	7,80	12,24	30,60	54,00	72,00	2,37	50,32	42,09	83,6
2.3 Gross.	p1	19,68	39,21	29,97	26,55	0,00	0,39	29,88	53,64	6,26	49,83	18,5	37,1
	p2	19,24	14,40	13,05	12,51	0,44	25,20	46,80	67,68	3,66	49,83	33,86	68,0
	p3	17,88	9,36	9,45	9,99	1,80	30,24	50,40	70,20	2,64	49,83	38,26	76,8
4.1 Fine	p1	19,71	28,53	19,17	12,96	0,00	12,24	41,40	65,88	10,38	49,97	27,91	55,9
	p2	10,71	8,73	7,65	6,12	9,00	32,04	52,92	72,72	2,32	49,97	41,48	83,0
	p3	7,47	6,93	3,69	1,44	12,24	33,84	56,88	77,40	1,66	49,97	45,18	90,4
4.2 Fine	p1	19,98	37,86	26,46	18,90	0,00	1,92	33,48	61,20	10,98	49,95	23,07	46,2
	p2	18,18	10,98	9,54	11,34	1,80	28,80	50,40	68,76	3,68	49,95	36,99	74,1
	p3	18,72	8,82	7,74	8,10	1,26	30,96	52,20	72,00	4,01	49,95	39,6	79,3
4.3 Fine	p1	19,53	40,95	39,96	35,37	0,00	0,00	21,24	44,64	17,18	50,42	13,7	27,2
	p2	18,45	17,55	14,40	15,21	1,08	23,40	46,80	64,80	4,58	50,42	34,55	68,5
	p3	14,85	12,87	10,08	9,45	4,68	28,08	51,12	70,56	3,93	50,42	38,3	76,0
Parc. chim.	Pluies												
7.1 Gross	p1	20,25	40,32	47,52	43,56	0,00	0,00	10,80	37,44	21,96	50,13	9,39	18,7
	p2	20,52	25,56	23,76	20,16	0,00	14,04	36,36	60,12	7,78	50,13	26,61	53,1
	p3	20,52	19,80	15,84	16,56	0,00	19,80	44,28	63,72	6,46	50,13	31,57	63,0
7.2 Gross	p1	19,89	39,78	57,15	34,92	0,00	0,00	3,78	45,00	26,77	50,13	10,16	20,3
	p2	19,89	34,38	19,53	15,12	0,00	5,40	41,40	64,80	10,29	50,13	26,46	52,8
	p3	19,89	18,54	9,81	0,72	0,00	21,24	51,12	79,20	7,64	50,13	34,48	68,8
7.3 Gross	p1	19,98	39,78	53,28	30,69	0,00	0,00	4,32	48,60	21,68	49,16	10,97	22,3
	p2	19,98	24,30	19,80	19,53	0,00	15,48	37,80	59,76	8,33	49,16	25,97	52,8
	p3	19,98	20,70	16,20	16,29	0,00	19,08	41,40	63,00	8,32	49,16	28,47	57,9
9.1 Fine	p1	19,80	40,23	30,33	21,33	0,00	0,00	30,60	58,68	17,06	50,24	19,69	39,2
	p2	19,80	15,03	14,13	11,97	0,00	25,20	46,80	68,04	4,97	50,24	35,12	69,9
	p3	17,28	10,71	9,09	6,21	2,52	29,52	51,84	73,80	3,32	50,24	39,94	79,5
9.2 Fine	p1	0,00	0,00	19,80	48,60	0,00	0,00	19,80	48,60	17,33	50,29	15,4	30,6
	p2	20,16	19,44	22,23	20,16	0,00	21,60	38,16	59,40	6,08	50,29	28,87	57,4
	p3	20,16	17,28	15,39	15,84	0,00	23,76	45,00	63,72	5,05	50,29	33,25	66,1
9.3 Fine	p1	20,07	41,04	60,39	36,18	0,00	0,00	0,00	42,84	31,05	50,13	7,77	15,5
	p2	20,07	39,42	25,11	20,34	0,00	1,62	35,28	58,68	13,92	50,13	21,95	43,8
	p3	20,07	37,44	15,39	13,14	0,00	3,60	45,00	65,88	9,14	50,13	28,68	57,2

**Annexe V. Pourcentages de recouvrement des composantes de la surface des parcelles avant les pluies.**

Parcelle	Agrégats				Total	Croûtes			Total	Autres		Total	Total
	pa	a	ga	b		ero	rui	dec		Rac	Veg		
2.1 E.O.G.	93,27	3,801	2,632	0	99,7	0	0	0	0,0	0,292	0	0,3	100,0
2.2 E.O.G.	93,27	5,6	0,585	0	99,5	0	0	0	0,0	0,292	0,292	0,6	100,0
2.3 E.O.G.	80,99	8,187	9,357	0	98,5	0	0	0	0,0	0	1,462	1,5	100,0
4.1 E.O.F.	89,77	8,48	1,754	0	100,0	0	0	0	0,0	0	0	0,0	100,0
4.2 E.O.F.	94,44	5,556	0	0	100,0	0	0	0	0,0	0	0	0,0	100,0
4.3 E.O.F.	88,01	8,772	3,216	0	100,0	0	0	0	0,0	0	0	0,0	100,0
7.1 E.C.G.	78,07	6,725	1,754	13,16	99,7	0	0	0	0,0	0,292	0	0,3	100,0
7.2 E.C.G.	82,75	4,971	0	12,28	100,0	0	0	0	0,0	0	0	0,0	100,0
7.3 E.C.G.	84,5	6,433	1,462	7,602	100,0	0	0	0	0,0	0	0	0,0	100,0
9.1 E.C.F.	92,4	5,263	0	2,339	100,0	0	0	0	0,0	0	0	0,0	100,0
9.2 E.C.F.	94,15	3,216	0,877	0	98,2	0	0	0	0,0	1,754	0	1,8	100,0
9.3 E.C.F.	90,35	8,48	0,292	0,877	100,0	0	0	0	0,0	0	0	0,0	100,0

**Annexe VI. Pourcentages de recouvrement des composantes de la surface des parcelles après les pluies.**

Parcelle	Agrégats				Total	Croûtes			Total	Autres		Total	Total
	pa	a	ga	b		ero	rui	dec		Rac	Veg		
2.1 E.O.G.	8,772	3,216	1,17	0	13,2	54,09	31,87	0,292	86,3	0	0,585	0,6	100,0
2.2 E.O.G.	2,632	1,462	0,585	0	4,7	40,35	50,58	1,17	92,1	0	3,216	3,2	100,0
2.3 E.O.G.	2,339	4,386	0	3,216	9,9	41,52	43,86	4,094	89,5	0,292	0,292	0,6	100,0
4.1 E.O.F.	0,877	2,632	0	0	3,5	32,16	64,04	0,292	96,5	0	0	0,0	100,0
4.2 E.O.F.	0	0,585	0	0	0,6	57,02	42,4	0	99,4	0	0	0,0	100,0
4.3 E.O.F.	0	2,924	1,462	0	4,4	61,99	33,33	0,292	95,6	0	0	0,0	100,0
7.1 E.C.G.	0,292	7,895	0	13,45	21,6	38,6	39,77	0	78,4	0	0	0,0	100,0
7.2 E.C.G.	0	3,216	0	11,11	14,3	44,15	39,77	1,17	85,1	0	0,585	0,6	100,0
7.3 E.C.G.	2,047	2,047	0	10,82	14,9	57,31	26,61	0,585	84,5	0	0,585	0,6	100,0
9.1 E.C.F.	1,462	0,292	1,754	2,047	5,6	45,61	47,37	0,877	93,9	0	0,585	0,6	100,0
9.2 E.C.F.	0	0,877	0,585	0	1,5	73,1	23,98	1,17	98,2	0	0,3	0,3	100,0
9.3 E.C.F.	0	2,339	0,292	0	2,6	59,94	35,67	0,877	96,5	0	0,9	0,9	100,0

**Légende**

- pa, petit agrégat (agrégat de diamètre inférieur à 1 cm)
- a, agrégat (agrégat de diamètre compris entre 1 et 5 cm)
- ga, grand agrégat (agrégat de diamètre supérieur à 5 cm)
- b, bloc de dimensions supérieures à 10 cm
- ra, racines
- Veg, résidus de végétaux
- ero, croûte d'érosion
- rui, croûte de ruissellement
- dec, croûte de décantation

# CONTRIBUTION A L'ETUDE DE CERTAINS PARAMETRES PHYSIQUES D'UN SOL VOLCANIQUE INDURE (CANGAHUA) REHABILITE

par Silvia RITOSSA, Mémoire de stage de DESS, année 1997-1998

## Résumé

**Mots Clefs :** Equateur, cendres volcaniques indurées, structure, hydrodynamique, réhabilitation du sol.

Dans le contexte agraire équatorien la *cangahua* (formation dérivant de cendres volcaniques indurées) occupe des vastes superficies où le développement de toutes les cultures est limité par la faible fertilité et la forte sensibilité à l'érosion qui caractérisent ce type de sol. Afin d'augmenter la surface agricole utile et en général de garantir une gestion correcte de la ressource sol, des programmes de réhabilitation de la *cangahua* ont été mis en place. Cette étude répond à l'exigence d'évaluer les effets des traitements agronomiques sur les propriétés physiques et chimiques de la *cangahua* récupérée. L'objectif était d'améliorer la fertilité du sol grâce à l'incorporation d'amendements et, par ailleurs, d'augmenter sa résistance à l'érosion à travers des apports de matière organique qui stabilisent la structure du sol et peuvent garantir une productivité à long terme. Les résultats concernant les caractéristiques hydrodynamiques du sol, obtenus grâce à l'utilisation d'un simulateur de pluie, les observations au champ et les analyses de laboratoires ont montré que du point de vue agronomique le traitement avec engrais organiques, associé à une préparation grossière du sol, se révèle comme le meilleur en termes de stockage d'eau, de stabilité structurale et de rendement des cultures à long terme.

## Abstract

**Keys words :** Equator, hardened volcanic ashes, structure, hydrodynamics, soil rehabilitation.

In Equator's agrarian context the *cangahua* (a hardened volcanic ash derived formation) spreads over huge areas where the development of all kind of cultivations is limited by the weak fertility and high sensivity to erosion of this kind of soil. In order to increase the active agricultural surface and, moreover, to warrant a correct management of the soil, some programs of rehabilitation of the *cangahua* have been set up. This study is concerned with the valuation of effects of agronomical treatments over the physical and chemical properties of the recovered *cangahua*. The goal was to increase soil fertility by the use of fertilizers and to increase its resistance to erosion by means of organic matter which could stabilize the soil structure and guarantee a higher productivity in the long run. The results concerning soil hydrodynamics, which have been obtained by means of a rain simulator, some field observations and laboratory works, showed that, by an agronomic point of view, treatments with organic fertilizers together with a rough soil preparation are the best ones in terms of water storage, structural stability and crop yield in the long run.

## Resumen

**Palabras claves :** Ecuador, cenizas volcánicas endurecidas, estructura, hidrodinámica, rehabilitación del suelo.

En el medio agropecuario ecuatoriano, la *cangahua* (formación procedente de las cenizas volcánicas endurecidas) ocupa unas anchas áreas donde el desarrollo de todos los cultivos es limitado por la insuficiente fertilidad y la fuerte sensibilidad a la erosión que caracterizan este tipo de suelo. Al fin de acrecentar la superficie agraria útil y en general de garantizar un correcto manejo del recurso suelo, se han establecidos algunos programas de rehabilitación de la *cangahua*. Este papel intenta responder a la exigencia de evaluación de los efectos de los tratamientos agronómicos sobre las cualidades físicas y químicas de la *cangahua* recuperada. El objetivo era lo de mejorar la fertilidad del suelo por la incorporación de abonos y por otro lado de acrecentar su resistencia a la erosión por aporte de material orgánico estabilizante la estructura del suelo y puede garantizar una productividad en el largo plazo. Los resultados acerca de las características hidrodinámicas del suelo, obtenidos por la utilización de un simulador de lluvia, las observaciones en el terreno y las análisis de laboratorio han mostrado que del punto de vista agronómico el tratamiento por abonos orgánicos, junto a una preparación gruesa del suelo se manifiesta como el mejor en términos de abastecimiento de agua, de estabilidad estructural y de rendimiento de largo plazo temporal de los cultivos.

## Resumé

**Mots Clés :** Equateur, cendres volcaniques indurées, structure, hydrodynamique, réhabilitation du sol.

Dans le contexte agraire équatorien la *cangahua* (formation dérivant de cendres volcaniques indurées) occupe des vastes superficies où le développement de toutes les cultures est limité par la faible fertilité et la forte sensibilité à l'érosion qui caractérisent ce type de sol. Afin d'augmenter la surface agricole utile et en général de garantir une gestion correcte de la ressource sol, des programmes de réhabilitation de la *cangahua* ont été mis en place. Cette étude répond à l'exigence d'évaluer les effets des traitements agronomiques sur les propriétés physiques et chimiques de la *cangahua* récupérée. L'objectif était d'améliorer la fertilité du sol grâce à l'incorporation d'amendements et, par ailleurs, d'augmenter sa résistance à l'érosion à travers des apports de matière organique qui stabilisent la structure du sol et peuvent garantir une productivité à long terme. Les résultats concernant les caractéristiques hydrodynamiques du sol, obtenus grâce à l'utilisation d'un simulateur de pluie, les observations au champ et les analyses de laboratoires ont montré que du point de vue agronomique le traitement avec engrais organiques, associé à une préparation grossière du sol, se révèle comme le meilleur en termes de stockage d'eau, de stabilité structurale et de rendement des cultures à long terme.

## Abstract

**Keys words :** Equator, hardened volcanic ashes, structure, hydrodynamics, soil rehabilitation.

In Equator's agrarian context the *cangahua* (a hardened volcanic ash derived formation) spreads over huge areas where the development of all kind of cultivations is limited by the weak fertility and high sensivity to erosion of this kind of soil. In order to increase the active agricultural surface and, moreover, to warrant a correct management of the soil, some programs of rehabilitation of the *cangahua* have been set up. This study is concerned with the valuation of effects of agronomical treatments over the physical and chemical properties of the recovered *cangahua*. The goal was to increase soil fertility by the use of fertilizers and to increase its resistance to erosion by means of organic matter which could stabilize the soil structure and guarantee a higher productivity in the long run. The results concerning soil hydrodynamics, which have been obtained by means of a rain simulator, some field observations and laboratory works, showed that, by an agronomic point of view, treatments with organic fertilizers together with a rough soil preparation are the best ones in terms of water storage, structural stability and crop yield in the long run.

## Resumen

**Palabras claves :** Ecuador, cenizas volcánicas endurecidas, estructura, hidrodinámica, rehabilitación del suelo.

En el medio agropecuario ecuatoriano, la *cangahua* (formación procediente de las cenizas volcánicas endurecidas) ocupa unas anchas áreas donde el desarrollo de todos los cultivos es limitado por la insuficiente fertilidad y la fuerte sensibilidad a la erosión que caracterizan este tipo de suelo. Al fin de acrecentar la superficie agraria útil y en general de garantizar un correcto manejo del recurso suelo, se han establecidos algunos programas de rehabilitación de la *cangahua*. Este papel intenta responder a la exigencia de evaluación de los efectos de los tratamientos agronómicos sobre las cualidades físicas y químicas de la *cangahua* recuperada. El objetivo era lo de mejorar la fertilidad del suelo por la incorporación de abonos y por otro lado de acrecentar su resistencia a la erosión por aporte de material orgánico estabilizante la estructura del suelo y puede garantizar una productividad en el largo plazo. Los resultados acerca de las características hidrodinámicas del suelo, obtenidos por la utilización de un simulador de lluvia, las observaciones en el terreno y las análisis de laboratorio han mostrado que del punto de vista agronómico el tratamiento por abonos orgánicos, junto a una preparación gruesa del suelo se manifiesta como el mejor en términos de abastecimiento de agua, de estabilidad estructural y de rendimiento de largo plazo temporal de los cultivos.