AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

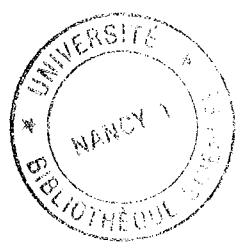
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4
Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10
http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php
http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm

UNIVERSITE DE NANCY I

INRA - Science du Sol
(Versailles)

THESE

présentée pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE NANCY I



par
João TAVARES FILHO

ORGANISATION ET COMPORTEMENT DE LATOSOLS DU PARANA (BRESIL). INFLUENCE DE LEUR MISE EN CULTURE.

Soutenue publiquement le 16 juin 1995.

Membres du Jury

MM.	A. HERBILLON, Professeur à l'Université de Nancy I.	Président
	A. BRUAND, Chargé de Recherche à l'I.N.R.A.	Rapporteur
	J.C. LEPRUN, Directeur de Recherche à l'ORSTOM.	Rapporteur
	B. DELVAUX, Professeur à l'Université Catholique de Louvain.	Examinateur
	M.F. GUIMARAES, Professeur à l'Université de Londrina, Brésil.	Examinateur
	A. RUELLAN, Professeur de Science du Sol et Directeur du CNEARC.	Examinateur
	D.TESSIER, Directeur de Recherche à l'I.N.R.A.	Directeur de thèse

AVANT PROPOS.

C'est grâce à l'aide de l'UNIVERSIDADE DE LONDRINA, du CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nivel Superior) et du COFECUB (Comité Français d'Evaluation de la Coopération Universitaire avec le Brésil) que j'ai pu venir en France et préparer cette thèse principalement à la Station de Science du Sol de l'INRA de VERSAILLES, mais aussi à l'INRA de Rennes.

J'ai surtout profité de l'aide et du soutien de très nombreuses personnes à qui je voudrais exprimer ici mes remerciements :

- Mr. HERBILLON, professeur de l'Université de Nancy I, qui m'a fait l'honneur de présider le jury ;

- Mr. TESSIER, Directeur de Recherche à l'INRA, pour m'avoir accueilli pour ce sujet de thèse, pour sa bienveillance à mon égard, pour son ouverture d'esprit et pour avoir consacre autant de temps et d'énergie à l'amélioration de ce manuscrit. Il a beaucoup contribué pour ma formation de chercheur. Qu'il voie ici l'expression de respect et reconnaissance ;

- Mr. BRUAND, Chargé de Recherche à l'INRA et Mr. LEPRUN directeur de Recherches à l'ORSTOM, qui ont accepté la charge de rapporteur de cette thèse ;

- Mr. RUELLAN, Professeur de Science du Sol et Directeur du CNEARC et Mr. DELVAUX, Professeur à l'Université Catholique de Louvain, qui ont accepté de participer à ce jury ;

- Maria de Fatima GUIMARAES Professeur à l'Université de Londrina (PR) - Brésil, qui m'a permis de venir en France et qui a également accepté de faire part de ce jury. Profonde estime pour ses qualités humaines et sa bienveillance à mon égard et je me permets de lui faire part en Portugais : "Muito obrigado por tudo que voçê fez por mim" ;

-Mr. BALBINO et Mr. CARRARA de l'OCEPAR (organização das Cooperativas do Estado do Paraná - Brésil) qui m'ont beaucoup aide pour la réalisation du travail de terrain, en me permettant toutes les facilités lors de mon séjour à Cascavel et Palotina ;

- Mr. GRIMALDI, de l'ORSTOM qui ma beaucoup aidé et soutenu pour la réalisation de ce travail par son ouverture d'esprit il a ainsi contribué à l'amélioration de ce manuscrit ;

- Mr. CURMI, de l'INRA de Rennes m'a donné les premières orientations pour le choix d'un sujet de thèse correspondant à mes préoccupations, et m'a fait part de ses remarques pertinentes aux différents étapes de l'étude de la porosité et de l'organisation des sols à partir de lames minces ;

- Mr. van OORT et Madame DENAIX, de l'INRA de Versailles et Mr. HALLAIRE de l'INRA de Rennes pour les discussions, leurs conseils pratiques, leurs remarques pertinentes aux différents étapes de l'étude de la minéralogie, de la porosité et de l'organisation des sols qui m'ont permis de mener à bien ces études.

C'est à Versailles que j'ai passé le plus grand nombre de mois et ce travail doit beaucoup à l'ensemble des personnes que je côtoyais tous les jours. Je témoigne ici toute ma gratitude et reconnaissance à A. BEAUMONT, M.LEMAIN, J.LAPEYRONNIE, M.HERVIO, A.M. JAUNET, G.VENEAU, M.PERNES, qui m'ont apporté, outre leur aide technique dans la réalisation de ce travail, leur amitié et leur soutien dans la vie de tous les jours. Je remercie toute l'équipe du secrétariat et du service de reproduction qui ont tout fait pour me faciliter la tâche. Je remercie aussi J.BERIER et Y.BERNARD de l'INRA de Rennes, pour l'aide qu'ils m'ont apportée lors de mon séjour à Rennes.

J'ai une pensée pour les différents stagiaires que j'ai côtoyé au long des ses années à Versailles et avec lequels se sont tissés des liens d'amitié.

****

Esta tese é dedicada aos meus pais, João e Edna,
à toda minha familia, à M. F. Guimarães e à Sandra L. Rezende.

SOMMAIRE.

INTRODUCTION GENERALE.

CHAPITRE 1 : CADRE GENERALE DE L'ETUDE.

Introduction.

I) Aperçu bibliographique. Présentation et démarche de l'étude.

II) Les sites étudiés.

III) Synthèse et conclusion.

CHAPITRE 2 : NATURE ET CONSTITUTION DES SOLS. ASPECTS PEDOGENETIQUE.

Introduction.

I) Données physico-chimique des sols étudiés.

II) Minéralogie des sols étudiés. Etude des constituants.

CHAPITRE 3 : INFLUENCE DES PRATIQUES CULTURALES SUR L'ORGANISATION DU SOL. EVOLUTION DE LA POROSITE

Introduction.

I) Approche de l'organisation du sol par la méthode du profil cultural.

II) Analyse de la porosité des horizons travaillés.

CHAPITRE 4 : ORGANISATION DE LA PHASE SOLIDE ET CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL DES SOLS

Introduction.

I) Organisation de la phase solide.

II) Organisation de l'espace poral des sols cultivés. Analyse quantitative à partir des lames minces.

III) Organisation de l'espace poral. Apport de la porosimétrie au mercure.

CHAPITRE 5 : COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MECANIQUE DES SOLS

Introduction.

I) Analyse du comportement physique.

II) Etude du tassement et influence de l'histoire hydrique.

CHAPITRE 6 : INTERPRETATION GENERALE DES RESULTATS

Introduction

I) Genèse des sols et conséquences au plan agronomique.

II) Rôle des facteurs anthropiques et de la constitution du sol sur leur stabilité physique.

III) Contribution à la définition d'une agriculture plus conservatrice.

SYNTHESE ET CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

BIBLIOGRAPHIE

ANNEXES.

INTRODUCTION GENERALE

Un certain nombre d'écosystèmes terrestres, notamment les écosystèmes tropicaux manquent de données scientifiques établies et utilisables pour entreprendre de manière rationnelle et optimale leur mise en valeur. Le besoin d'informations lorsqu'ils sont transformés en systèmes agro-sylvo-pastoraux, se fait ressentir chaque jour davantage. Les nécessités de production accrue et l'obligation d'un développement durable respectant l'environnement sont rarement compatibles avec des écosystèmes complexes comme c'est le cas dans les régions tropicales et, en particulier, au Brésil (LEPRUN, 1994).

Dans l'Etat du Parana les sols ferralitiques ou Latosols sont parmi les plus riches et les plus productifs du Brésil. Ils ont une importance primordiale pour le pays car on y fait des cultures vivrières et d'exportation. Bien qu'ils ne soient mis en culture que depuis une période récente, souvent moins de trente ans, des chutes de rendement importantes ont été observées ces dernières années. Ces chutes de rendement sont observées sur l'ensemble du territoire du Parana mais semblent affecter plus particulièrement certains sols.

Jusqu'à une date récente, l'accent était mis sur les phénomènes d'érosion et de pertes solides. Il apparaît aujourd'hui que la dégradation des sols est aussi liée à leur densification, c'est-à-dire la disparition d'une partie des pores du sol. Elle conduit à un changement des propriétés d'infiltration et de la disponibilité de l'eau, de l'aération et de la pénétration racinaire, qui sont la cause première de la baisse de rendement. L'hypothèse d'une dégradation de l'espace poral due aux pratiques culturales qui modifient la structure du sol et, en conséquence, son foctionnement hydrique est souvent avancée.

Parallèlement à une dégradation de type physique, il semble qu'une dégradation chimique se produit, c'est-à-dire, des phénomènes d'aluminisation des sols et donc de phytotoxicité (RALISCH, communication orale).

Des études reposant sur l'approche du profil cultural [HENIN *et al.*, (1960 et 1969) ; MANICHON, (1982)], ont été réalisées [CURMI (1990) ; TAVARES FILHO (1991), GUIMARAES (1993) ; RALISH *et al.*, (1991, 1993) ; RALISCH et GUIMARAES (1994)]. Elles ont montré que le phénomène de dégradation dont il s'agit n'affecte pas seulement les premiers centimètres puisqu'une densification est observée parfois sur l'ensemble du profil, ou au moins jusqu'à 50 cm.

A propos de l'origine et des conséquences de la densification, des questions de plusieurs ordres ont été posées :

- pourquoi des sols classés comme des Latosols roxos (sols ferrallitiques), possèdent-ils des comportements physiques et mécaniques très variables ?

- quelles sont les conséquences de la mise en valeur de ces sols sur l'évolution de l'espace poral au cours du temps ?

- quelles sont les caractéristiques mécaniques et comment évoluent les propriétés des sols préalablement tassés lorsqu'ils sont soumis à différentes histoires énergétiques induites notamment par les pratiques culturales?

L'objectif de la thèse consiste à tenter de relier les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sols, en relation avec les facteurs de la pédogenèse, aux propriétés physiques et mécaniques de ces sols dans une perspective de compréhension de l'évolution à court et moyen terme. Il s'agit de pouvoir répondre aux questions posées sur la nature de différents comportements et sur les modalités de la dégradation physique.

A cet effet, le mémoire comportera six chapitres. Le premier sera consacré à la présentation du cadre général de l'étude aux plans géologique, climatique, géomorphologique et pédologique (classification des sols).

Dans le deuxième chapitre les sols seront présentés en précisant la nature des constituants et leur environnement géochimique.

Le troisième chapitre portera sur l'étude de l'évolution des caractéristiques physiques en fonction de travaux culturaux. Nous étudierons l'influence des pratiques culturales sur l'espace poral. Ceci sera abordé à différentes échelles et par différentes approches.

Dans le chapitre quatre nous analyserons en détail l'organisation de la phase solide et de l'espace poral.

Le chapitre cinq sera consacré à l'étude du comportement des sols soumis expérimentalement au compactage. Nous traiterons donc de la sensibilité à la dégradation des sols, notamment sous l'influence de l'état hydrique, de façon à mettre en évidence les mécanismes d'évolution de la structure.

Pour finir, et avant de conclure, le chapitre VI sera consacré à la synthèse et à la discussion générale des résultats, notamment en vue de formuler quelques propositions pour une gestion plus durable de ces sols.

CHAPITRE 1 :

CADRE GENERAL DE L'ETUDE

De nombreux travaux d'agronomie réalisés dans l'Etat du Paraná montrent que des sols développés sous le même type de climat, sur un matériau parental d'origine similaire (basalte), et se trouvant dans une situation topographique comparable, peuvent manifester des comportements agronomiques très différents comme par exemple la susceptibilité au compactage du sol et la destruction des structures superficielles liées à la dégradation de l'espace poral. Les observations des agriculteurs, confirmées par les travaux récents de CURMI (1990) et (RALISCH *et al.*, (1991 et 1993), font apparaître des différences très tranchées entre les sites étudiés.

Nous commencerons par un aperçu bibliographique des travaux réalisés par d'autres chercheurs sur les "Latosolos", et qui ont utilisé différentes méthodologies pour expliquer les changements des propriétés physiques.

Dans un second paragraphe, nous présenterons les sites d'étude, c'est-à-dire, le cadre géographique et géomorphologique, le climat, la végétation présente avant la mise en culture, la géologie, l'hydrologie de la zone d'étude et nous finirons par la mise en valeur des sols, en donnant un aperçu de la classe de sol étudiée. Enfin, dans le troisième paragraphe, nous présenterons les données physico-chimiques des sols choisis pour notre étude.

I) APERÇU BIBLIOGRAPHIQUE. PRESENTATION ET DEMARCHE DE L'ETUDE.

A) ASPECTS GEOGRAPHIQUES ET HISTORIQUES.

L'état du Paraná, situé dans la région sud du Brésil (Fig. I.1), est entouré:
- au nord par l'état de São Paulo,
- à l'est par l'Océan Atlantique,
- au sud par l'état de Santa Catarina et la République de l'Argentine, et
- à l'ouest par l'Etat du Mato Grosso et la République du Paraguay.



Fig.I.1 : Localisation de l'état du Paraná et des sites d'étude (Cascavel et Palotina (adapté de Lévêque, 1967)

Avec une surface de 199 362 Km², qui équivaut seulement à 2,4% de la surface du Territoire Brésilien (8 500 000 Km²), le Paraná produit près de 25% de la production céréalière de tout le pays et environ un tiers des produits agricoles exportés (DERPSCH, 1991). Le Paraná est donc un état à très forte vocation agricole avec 41% de sa population (7,6 millions d'habitants) qui vit en milieu rural.

Au début du XX^{e} siècle, 84% de la superficie du Paraná était recouverte par une forêt tropicale et subtropicale naturelle. En 1965, avec le début de la colonisation, la superficie de forêt a été réduite à 24% (MAACK, 1968). Principalement à cause du développement de l'agriculture, l'aire de forêt a encore diminué, pour atteindre 9% dans les années 70 et 7% dans les années 80 (DERPSCH, 1991). Actuellement 6,5 millions d'hectares sont utilisés pour l'agriculture.

Au sein du Paraná les régions de Cascavel et Palotina (Fig.I.1), se distinguent par leurs excellentes potentialités agricoles. Le processus accéléré d'utilisation agricole des "Latosolos" (sols ferrallitiques), avec une succession de cultures comme le blé (*Triticum aestivum*) et le soja (*Glycine max*), a conduit depuis les années 70, à l'emploi très intensif des machines agricoles.

B) MISE EN EVIDENCE D'UNE DEGRADATION DES SOLS.

La mise en valeur des sols, surtout au Brésil, se fait fréquemment de façon intensive et en conditions d'humidité inadéquates. L'utilisation de la charrue à disque, par exemple, conduit à des matériaux très finement divisés. On observe par la suite la formation de croûtes superficielles à la suite d'orages tropicaux et la formation de couches sous-jacentes très compactées (tassement du sol).

L'encroûtement de surface et le tassement des horizons subsuperficiels diminuent la vitesse d'infiltration de l'eau, limitent de ce fait la reconstitution de la réserve en eau et, en conséquence, affectent le développement des plantes. Ils provoquent une augmentation de l'érosion hydrique de surface. Au total, à plus long terme, on observe une réduction de la productivité des sols. Ces phénomènes ont été observés et étudiés dans de nombreuses régions à la surface du globe, aussi bien en Amérique qu'en Europe. Citons principalement [TAYLOR *et* BURNETT (1963) ; GROHMANN *et* QUEIROZ NETO (1966) ; AMIR *et al* (1976) ; BELTRAME *et al.,* (1981) ; GAULTNEY *et al.*,(1982) ; PAPY (1986) ; CASTRO *et al.*, (1987) ; COULON (1988) ;

KILASARA (1989) ; CARVALHO (1990) ; HARTMANN (1991) ; CARVALHO *et al.* (1991) ; MAPANGUI (1992) ; RALISCH, (1993) ; PERRET (1992)].

D'après les données relatives au Paraná, le niveau de dégradation peut devenir tel, surtout dans la région de Palotina, que l'on n'obtient plus qu'une seule culture rentable par an, le blé d'hiver (Triticum aestivum), au lieu de deux comme autrefois. De plus, les agriculteurs sont poussés maintenant à utiliser des systèmes d'irrigation à pivot central. L'achat de cet équipement est surtout motivé par un déficit hydrique croissant des sols, qui a semblé s'accentuer rapidement ces derniers temps.

L'analyse des pratiques traditionnelles, nécessaires à deux cultures par an, exige deux façons de travail du sol. La mise en oeuvre d'engins agricoles de plus en plus puissants et lourds, avec l'apport important de fertilisants ont été invoqués pour expliquer ces changements rapides des propriétés physiques des sols [ROO (1960) ; PHILLIPS et KIRKHAM (1962) ; STANFOR *et al.*, (1973) ; VIEIRA (1978) ; AINA (1979) ; KEMPER (1979) ; MUZILLI (1981) ; SILVA *et al.*, (1981) ; LARSON *et* OSBONE (1982) ; OLIVEIRA (1985) ; DERPSCH *et al.*, (1986) ; PAPY (1987) ; KAY (1990) ; DERPSCH (1991) ; CARTER (1991)]. Au Paraná ce type de pratiques culturales est largement employé dans l'agriculture traditionnelle et peut conduire à une dégradation rapide des sols.

De nombreux travaux ont été réalisés sur les propriétés des sols en considérant par exemple la porosité ou la densité apparente, ou encore l'étude des propriétés mécaniques par l'utilisation du pénétromètre [MARCHAL et RANEY (1960) ; LAL (1979) ; DALLA ROSA (1981) ; SILVA *et al.*, (1981) ; CARTER (1990) ; OLIVEIRA *et al.*, (1990)(1) ; OLIVEIRA *et al.*, (1990)(2) ; OLIVEIRA et BALBINO (1991)]. Bien que nombreux, ces traveaux n'ont pas permis de répondre clairement aux questions posées sur *la cause des différents comportements et sur les modalités de la dégradation physique.*

Les Latosols dont il est question sont généralement considérés comme peu fragiles quant aux risques de dégradation physique. Leur étude [TAVARES FILHO *et al.*, (1991) ; GUIMARAES *et al.*, (1993) ; RALISH *et al.*, (1991, 1993) ; RALISCH et GUIMARAES (1994)] a d'ailleurs montré que leur constitution physique et minéralogique semble très proche. Ainsi les analyses physico-chimiques classiques n'ont pas mis en évidence des différences importantes entre les sols. Jusqu'à aujourd'hui, aucun lien véritable n'a pu être établi entre des caractéristiques physico-chimiques d'une part et la stabilité structurale d'autre part.

D'un autre côté, pour remédier aux dégradations des propriétés physiques, les agronomes ont cherché à modifier les pratiques culturales, en comparant différents systèmes de travail du sol [BERTONI *et al.*, (1975) ; MACHADO et BRUM (1978) ; CAMARGO, (1983) ; PAPY (1984) ; VIEIRA et MUZILLI, (1984) ; ELTZ *et al.*, (1989) ; CARTER *et al.*, (1990) ; OLIVEIRA *et al.*, (1987, 1988, 1989, 1990) ; BALBINO *et al.*,(1990) , OLIVEIRA et BALBINO, (1992) ; BALBINO et OLIVEIRA (1990 (1 et 2)]. On a par exemple comparé le travail du sol avec les disques, à celui de la charrue à soc classique et au semis direct avec un travail minimal du sol.

Il apparaît ainsi clairement que seule une recherche plus précise sur les propriétés de ces sols permettra de répondre aux questions posées comme celles de la gestion durable des sols et de l'amélioration de leurs caractéristiques, spécialement physiques. Le problème du travail du sol, en relation avec le tassement, est aussi un sujet important dans l'évolution à court terme des sols. Cet aspect sera donc pris en compte.

C) - ORIGINALITE DE L'APPROCHE ET DEMARCHE SUIVIE.

Dans le cadre de l'approche agronomique classique l'étude de la structure n'est justifiée que dans la mesure où elle fournit des moyens de prévision des conséquences agronomiques de l'état structural observé (STENGEL, 1990). L'aptitude à prévoir les conséquences d'un état dépend de la précision des relations établies entre la structure d'une part, les propriétés et les comportements physiques d'autre part. En fonction de ce niveau de précision, il peut apparaître plus efficace d'étudier la structure ou directement les propriétés qu'elle détermine. Ainsi, on peut tirer des indications sur les variations de conductivité hydraulique en estimant l'abondance des pores de grandes dimensions. Naturellement à un moment donné il faut confronter l'information obtenue à une étude directe de cette même conductivité afin d'en vérifier la validité.

En ce qui concerne les sols du Paraná les changements de structure n'ayant pu être constatés qu'à travers leurs conséquences, surtout par la baisse de rendement, il devient indispensable de les mettre en relation avec les différents facteurs du milieu. Ceci devrait permettre d'identifier les causes et les mécanismes d'évolution de la structure des sols argileux de l'ouest du Paraná.

Les travaux récents réalisés sur les argiles des sols [AZZAOUI (1984 et 1988) ; Ben RAHIEM *et al.,* (1986) ; BRUAND (1985) ; BRUAND et TESSIER (1987) ; BRUAND *et al.*, (1988) ; CAMARA (1982) ; TESSIER (1975, 1978, 1980, 1984 et 1990) ; TESSIER et PEDRO (1976, 1980 et 1981) ; TESSIER et QUIRK (1979) ; TESSIER *et al.*, (1980, 1992) ; TESSIER et GRIMALDI (1992) ; PROST (1975) ; CARVALHO (1990) ; ROBAIN *et al.,* (1990)], ont montré que l'on pouvait établir un lien entre les propriétés physiques et mécaniques macroscopiques des matériaux, et la minéralogie des argiles. Il a ainsi été montré que la nature de l'argile, en considérant son environnement ionique, sa texture et son organisation à différentes échelles, détermine en grande partie les propriétés des sols. Il est à noter que ces résultats font surtout référence aux propriétés des sols des régions tempérées.

Dans notre travail nous combinerons une étude de la structure du sol et des propriétés physiques et mécaniques qu'elle induit. En outre, nous ferons référence à la nature des constituants afin de donner des éléments d'interprétation des propriétés. De ce point de vue nos objectifs sont complémentaires de ceux des études classiques en pédologie et en physique du sol *qui ont respectivement une fonction de classification et de recherche d'indicateurs du fonctionnement du sol considéré* (régime hydrique et transferts d'eau, processus physico-chimique).

La démarche choisie consistera donc, après une étude de terrain reposant sur la méthodologie du profil cultural [HENIN *et al.*, (1960, 1969) ; MANICHON, (1982)], à caractériser les sols au plan physico-chimique et minéralogique, et à examiner leur organisation à différentes échelles. Une relation entre l'organisation et les propriétés physiques permettra de montrer l'importance des paramètres pris en compte sur les propriétés.

Le choix des sites et des échantillons pour notre étude a été basé sur la représentativité au sens des processus d'évolution des sols, plutôt qu'une représentativité statistique de l'échantillonnage.

Toutes les mesures physiques ont été effectuées avec un minimum de 5 répétitions. Les moyennes, écartypes, les intervalles de confiance à 95% et les coefficients de variation ont été déterminés et le test de la plus petite différence significative (comparaison des moyennes) a été utilisé, dans certains cas, pour la détermination des différences significatives des analyses effectuées.

II) LES SITES ETUDIES.

A) CARACTERISATION DU MILIEU PHYSIQUE DE L'OUEST DU PARANA.

L'ensemble des éléments physiques (climat, géologie, sol), biologiques et anthropiques qui *participent à la définition d'un paysage, modifié ou non par l'homme* constituent le milieu au sens large. Nous examinerons dans ce chapitre les processus et les facteurs qui concourent à son évolution et lui confèrent ses caractéristiques. La première échelle d'étude est celle de la région, en l'occurrence l'ouest de l'Etat du Paraná, dans laquelle sont situés nos deux sites d'études.

Nous commencerons par décrire le cadre géographique et géomorphologique, le climat, la végétation existante avant la mise en culture, la géologie, l'hydrologie. Pour décrire les sols, nous nous référerons à des concepts pédologiques au niveau de la classe de sol. Par la suite, nous présenterons les situations qui ont été choisies dans notre étude ainsi que la procédure d'échantillonnage.

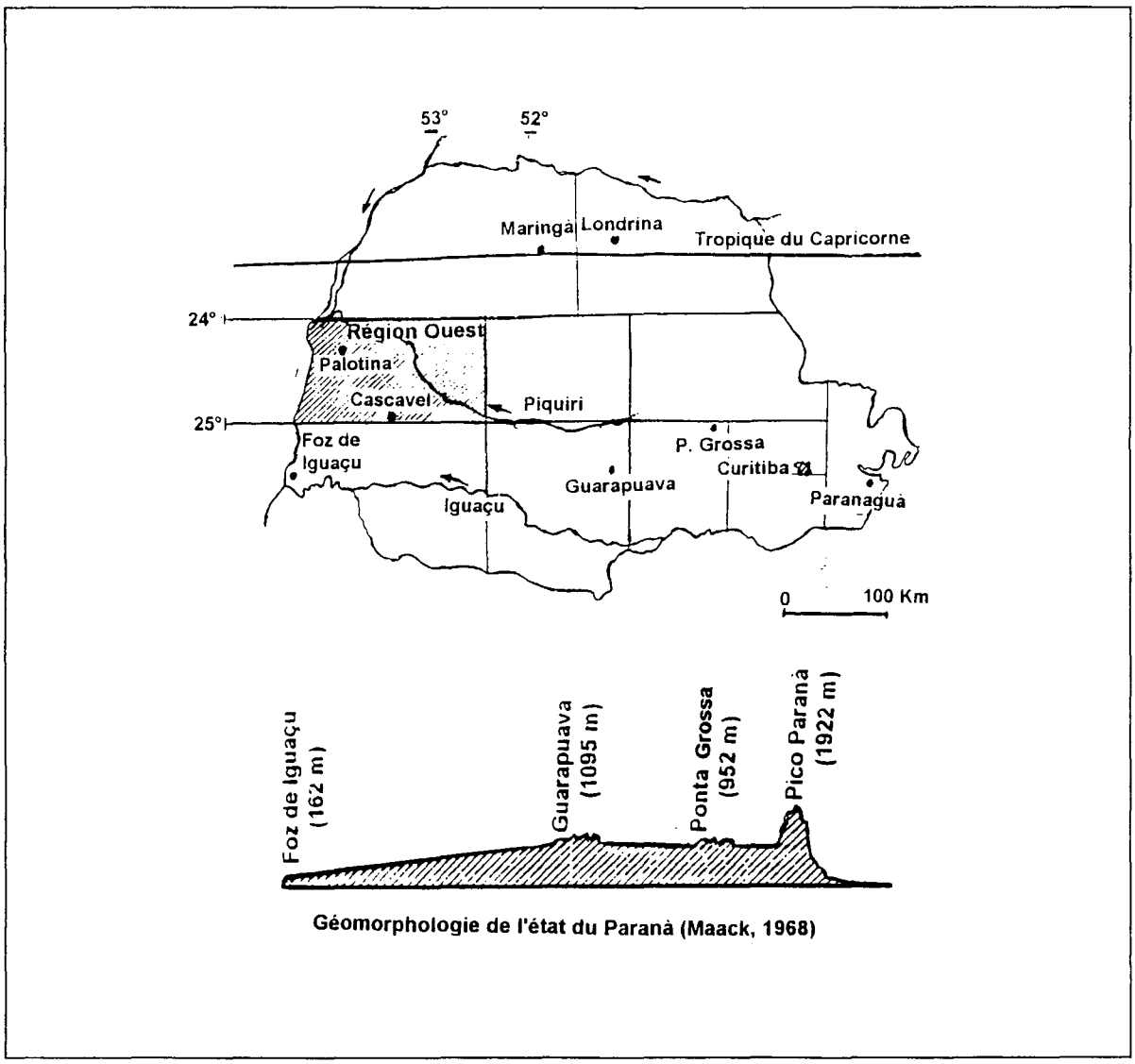
1) Le cadre géographique et géomorphologique [EMBRAPA (1972, 1984)].

La région d'étude est située à ***l'ouest de l'Etat du Paraná*** sur une surface de 20 612 Km² (Fig. I.2), limitée au nord par le 24ème parallèle et au sud par le 25ème parallèle.

Les sites choisis pour notre étude sont situés plus précisément dans la sous-zone appelée Plateau de Guarapuava, limitée par les rivières Piquiri et Iguaçu, (fig.2) :

- le **Site de Cascavel** est situé à 24°56' de latitude sud et 53°26' de longitude ouest,
- le **Site de Palotina** est situé à 24°18' de latitude sud et 53°55' de longitude ouest.

Les deux sites sont distants entre eux de moins de 120 km.



Géomorphologie de l'état du Paranà (Maack, 1968)

Fig.I.2 : Localisation de la région ouest et aperçu de la géomorphologie de l'état du Paraná (adapté de EMBRAPA, 1972)

La conformation de cette surface est assez uniforme et déterminée par des formes de "mesetas" découpées du niveau général des écoulements par des formes légèrement ondulées avec des versants doux. Le site Cascavel est situé sur une surface plane dont l'altitude moyenne est de 760 m. Le Site Palotina est situé sur une surface à ondulation plus douce que Cascavel et l'altitude moyenne est de 360 m.

2) Le Climat [EMBRAPA (1972 et 1984) ; NIMER (1979)].

Dans la région considérée, les caractéristiques générales du climat sont les suivantes :

- **les températures** moyennes annuelles varient de *17°C* pour la minimales *à 22°C* pour les maximales. La variation moyenne annuelle entre le mois le plus chaud et le mois le plus froid est de 7.5°C, mais les écarts annuelles peuvent atteindre 10°C.

- **les précipitations annuelles** sont comprises entre *1300 à 2000 mm* ce qui correspond à la plus grande pluviosité de tout l'état du Paraná. De façon générale, la distribution des pluies est assez régulière dans l'année. Il n'y a pas de mois sans pluie et il n'y a pas à proprement parler de saison sèche. Néanmoins, une petite baisse des précipitations est observée aux mois de Juillet-Août et une petite augmentation est observée aux mois de décembre -janvier.

- **l'évapotranspiration réelle** annuelle varie de *800 à 1000 mm*. Elle est plus importante dans les mois d'été en relation avec l'augmentation légère des températures et des précipitations.

D'après la **classification de Koeppen** (fig. I.3) :

- le **site Cascavel** est situé dans une zone de climat de type Cfb, c'est-à-dire, un climat subtropical, humide, mésothermique, ayant des mois d'été frais (température moyenne du mois le plus chaud **< 22°C**), du givre en hiver, sans saison sèche.

- le **site Palotina** est situé dans une zone de climat type Cfa, c'est-à-dire, climat subtropical, humide, mésothermique, ayant des mois d'été chauds (température moyenne du mois le plus chaud **> 22°C**), presque pas de givre en hiver et sans saison sèche (DERPSCH, 1991 ; MANUAL-IAPAR, 1978).

Les pluviométries sont différents entre les sites. Elles sont plus élevées à Cascavel (fig.I.4).

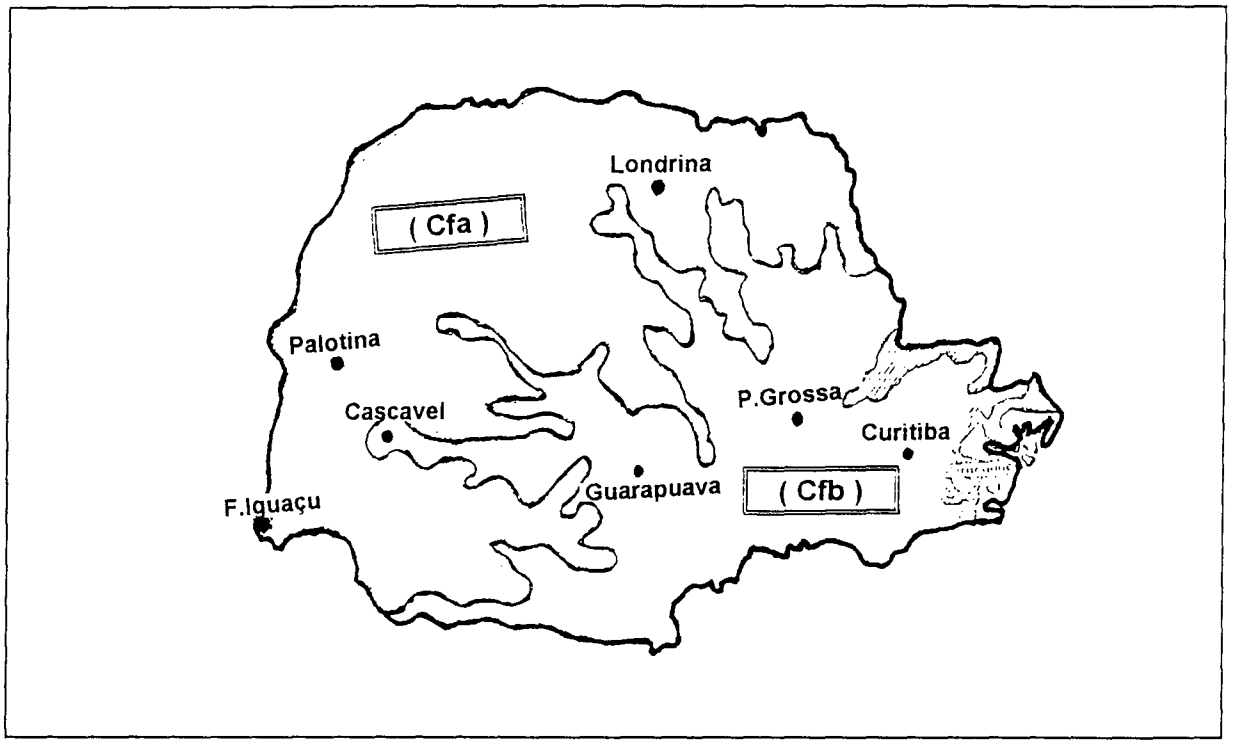


Fig.I.3 : Classification climatique des sites de Cascavel et Palotina selon Koeppen (Godoy et Correa, 1976, in : Depersch, 1991)

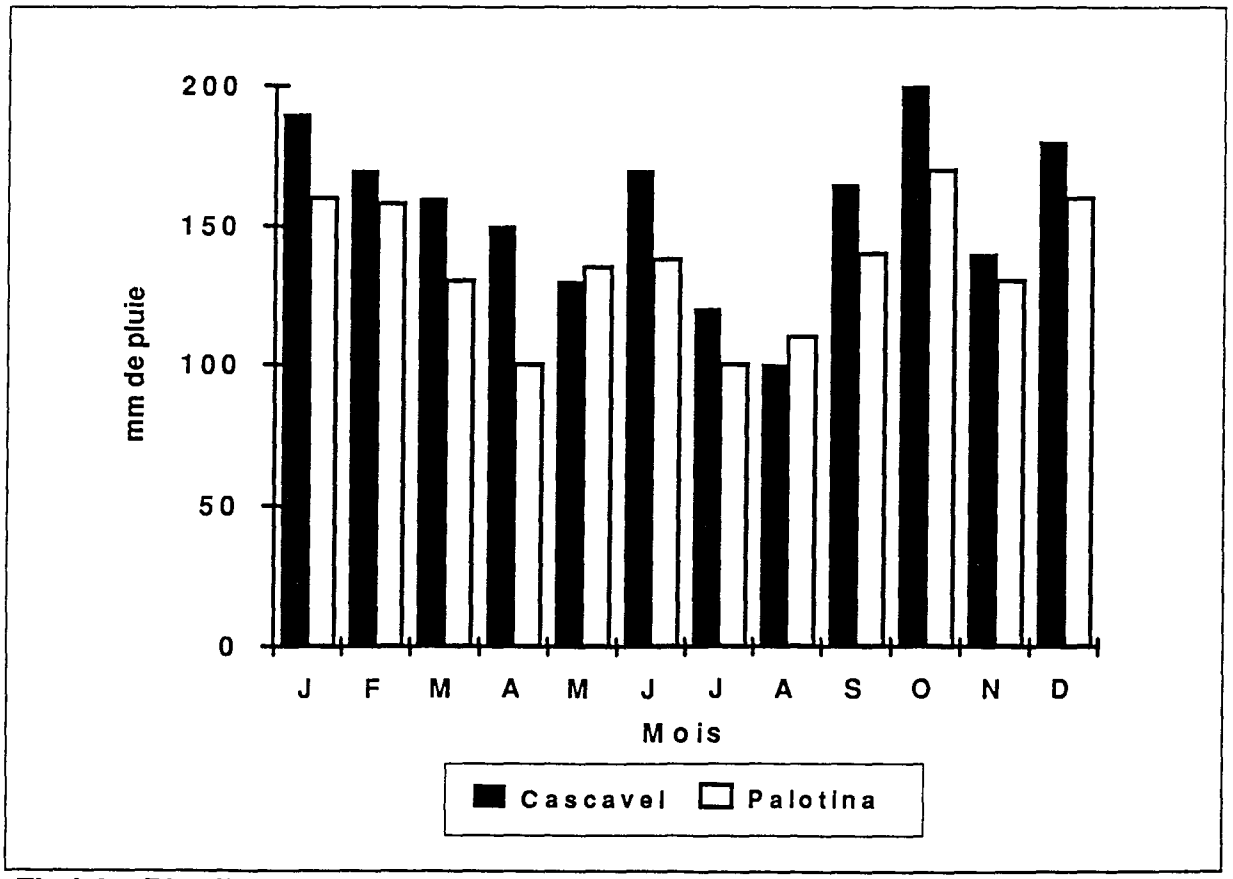


Fig.I.4 : Distribution moyenne des pluies des sites Cascavel et Palotina [IAPAR (1978) ; AZEVEDO (1972) ; NIMER (1979)].

3) La végétation [EMBRAPA (1972 et 1984)].

La distribution pluviométrique régulière dans l'année favorise le développement d'une forêt dans pratiquement tout l'ouest du Paraná.

D'après la littérature, les sites de Cascavel et Palotina sont situés dans une région qui était au départ recouverte par une forêt tropicale *pérenne* (Fig. I.5). C'est une végétation à forte densité, à cycle biologique continu, à une grande richesse floristique. On y trouve des espèces arbustives, une végétation basse qui couvre tout le sol ainsi que de grands arbres (30 à 40 m de hauteur).

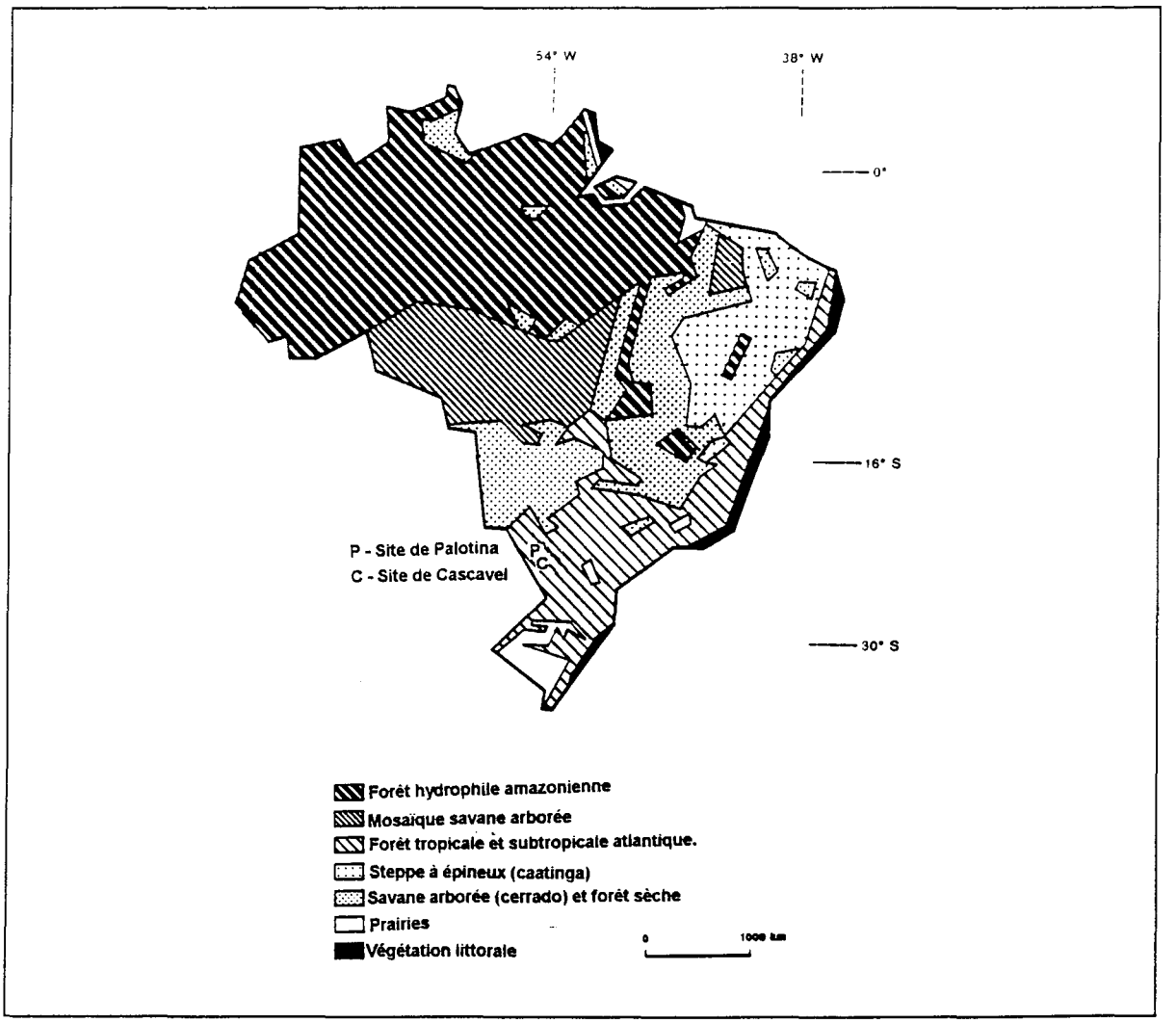


Fig. I. 5 : Distribution de la végétation brésilienne (Pabayle, 1992).

Cette forêt apparaît surtout dans les zones à "Latosolo Roxo" (Eutrorthox, Haplorthox de la Soil Taxonomy) et de Terra Roxa Estruturada (Argiudoll, Paleudalf de la Soil Taxonomy), où il n'y a pas des périodes prolongées de manque de pluie (15 jours maximum). Les caractéristiques physiques de ces sols ont permis le

développement d'une forêt compacte et exubérante, qui a aujourd'hui pratiquement disparu (MAACK, 1968).

4) La Géologie [EMBRAPA (1972 et 1984) ; RAUEN M. J. (1980) ; PEBAYLE R (1992) ; PICCIRILLO et MELFI (1988)].

Le continent brésilien est un ensemble de plaines et de plateaux, qui fait partie du continent de Gondwana, ancienne terre émergée qui unissait la majeure partie des terres australes au bouclier du Dekkan et à la plate-forme africaine. Le bouclier précambrien des Guyanes, du plateau central, du Brésil atlantique et du Rio Grande do Sul en sont les témoins actuels.

Presque totalement érodés au début de l'ère secondaire, ces massifs ont fourni une immense quantité de débris qui ont partiellement remblayé une série de *grands bassins d'âge primaire* dont les plus importants sont ceux de l'Amazonie, du Parnaiba et du **Paraná** (Fig. I.6). Après une période volcanique (jurassique-crétacé) caractérisée par d'immenses épanchements basaltiques dans le sud du pays, les grands ensembles régionaux de l'intérieur étaient en place.

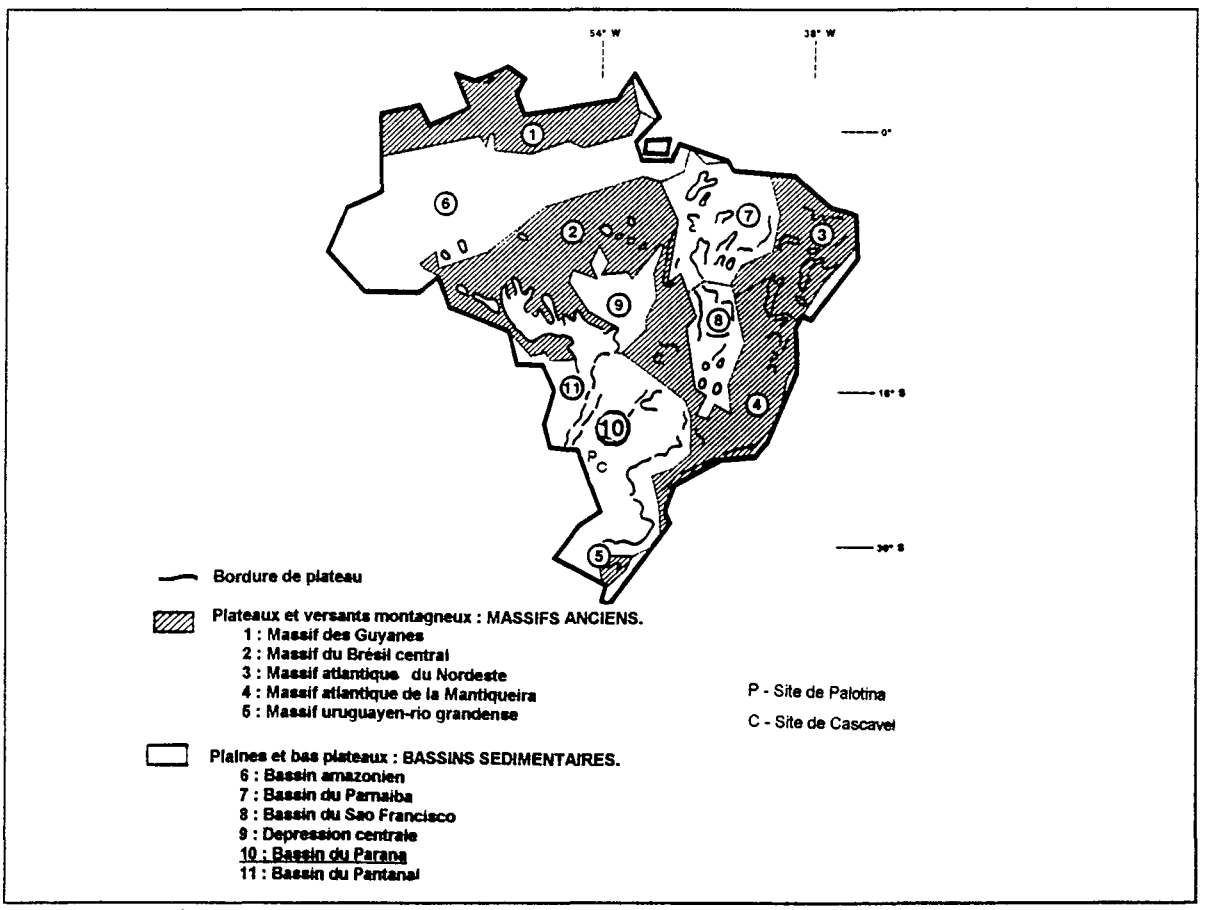


Fig. I. 6 : Structure géologique et reliefs du Brésil (Pabayle, 1992).

Nos sites d'étude sont situés dans le Bassin du Paraná sur le "Troisième plateau (*plus précisément, sur le* ***"Plateau de Guarapuava"*** (Fig. I.7)), qui est constitué, en majorité, par *l'écoulement basaltique du Trapp, qui appartient à la série São Bento de l'ère Mésozoïque* (jurassique-crétacé). Du fait de l'érosion, des sédiments fluviaux "paludais" du Quaternaire récent (Holocène) ont été trouvés, mais de façon très occasionnelle. C'est donc une région assez uniforme aussi bien au niveau de la conformation de sa surface qu'au niveau de sa constitution géologique et les ***principales roches*** sont des *Basaltes*, dont les *mélafiques* sont présents dans la partie supérieure de chaque écoulement et les *diabases* dans les dicks et sills.

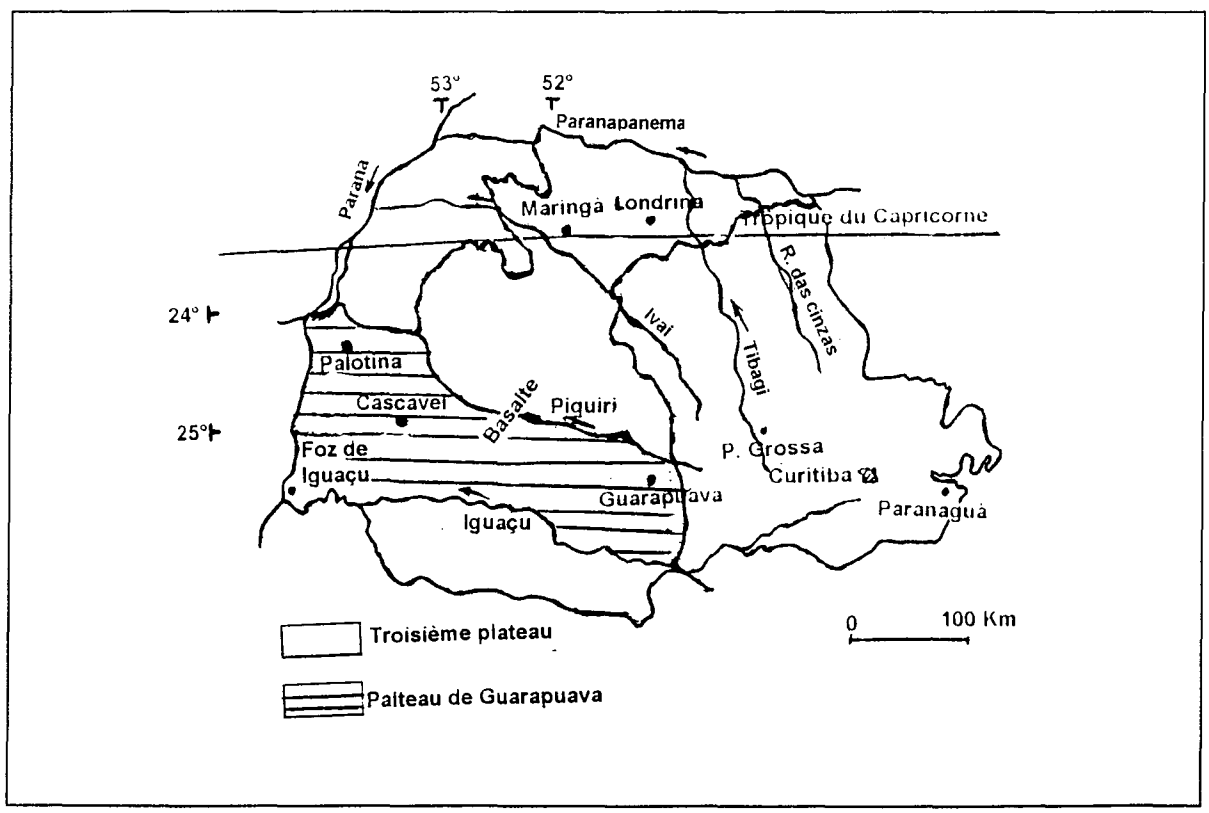


Fig.I.7 : Localisation du Troisième Plateau, du Plateau de Guarapuava et distribution de l'hydrographie de l'état du Paraná [(EMBRAPA (1972 et 1984) ; Rauen (1980)].

La ***composition minéralogique de ces basaltes*** est dominée d'après [SCHNAIDER (1964) ; LOUGHNAN (1969) ; CORDANI et VANDOROS (1967) ; MELFI et LEVI (1971) ; CURI (1975) ; RAUEN (1980)], par l'olivine, des pyroxènes et des plagioclases calciques, de l'ilménite, de la magnétite et de la titanomagnétite. L'apatite, le quartz et la biotite peuvent être présents comme minéraux accessoires.

5) Hydrographie [EMBRAPA (1972 et 1984)].

Les aires d'étude sont situées dans le système hydrographique de la Rivière Piquiri (Fig. I.7) et du Paraná, mais à des positions stationnelles différentes. A Cascavel le réseau hydrographique haut semble plus dense qu'à Palotina (Fig. I.8).

Le bassin hydrographique de la Rivière Piquiri a une extension approximative de 500 Km et couvre une surface de 23 431 Km². L'ensemble fait partie du grand Bassin de la Rivière Paranà (186 321 Km²).

6) Les sols de la région ouest du Paraná : données cartographiques et caractérisation pédologique des "latosolos roxo". [EMBRAPA (1972 et 1984) ; VOLKOFF (1985)].

De tous les types de sols que l'on peut trouver à l'ouest de la rivière Piquiri , ce sont les ***latosols*** (***oxisols*** *de la* SOIL TAXONOMY, 1975 *;* ***ferralsols*** *de la LEGENDE F.A.O.* et ***sols ferrallitiques*** *de la Classification française,* DUCHAUFOUR, 1977), qui dominent. Les sols ne présentent aucune trace d'hydromorphie et possédent un *horizon B latosolique caractéristique* (COMISSÃO DE SOLOS, 1960) qui équivaut "à l'*oxic horizon*" de la classification américaine. (SOIL TAXONOMY, 1975).

Dans les latosols du Paraná, à cause d'une grande homogénéité du sol sur toute la profondeur du profil, l'identification des horizons devient difficile. Dans ces conditions, la classe des ***"latosolos roxo"*** a donc été divisée en plusieurs unités cartographiques en tenant compte des caractéristiques physico-chimiques. Leur différenciation a été faite en tenant surtout compte *du taux de saturation en bases et de la présence ou non d'aluminium échangeable dans l'horizon B. On a aussi tenu compte de l'état de la végétation et du relief.*

D'une façon générale, la classe des "latosolo roxo" (LR), peut être caractérisée selon la COMISSÃO DE SOLOS (1960) et OLIVEIRA *et al.*, (1992), comme :

"une ***classe formée*** par des sols minéraux, non hydromorphes, avec un horizon B latosolique. Ce sont des sols très profonds (normalement plus de 3 m et pouvant atteindre 5 à 10 m), formés à partir des roches éruptives basiques, avec une ***séquence d'horizons*** A, B et C peu différenciés.

Les Latosols présentent une ***coloration*** violette à tendance rouge (2,5 YR et 10 R avec valeur constante 3 et chromas qui varient de 3 à 6 - selon le Code de Munsell, ces derniers étant plus élevés dans l'horizon B).

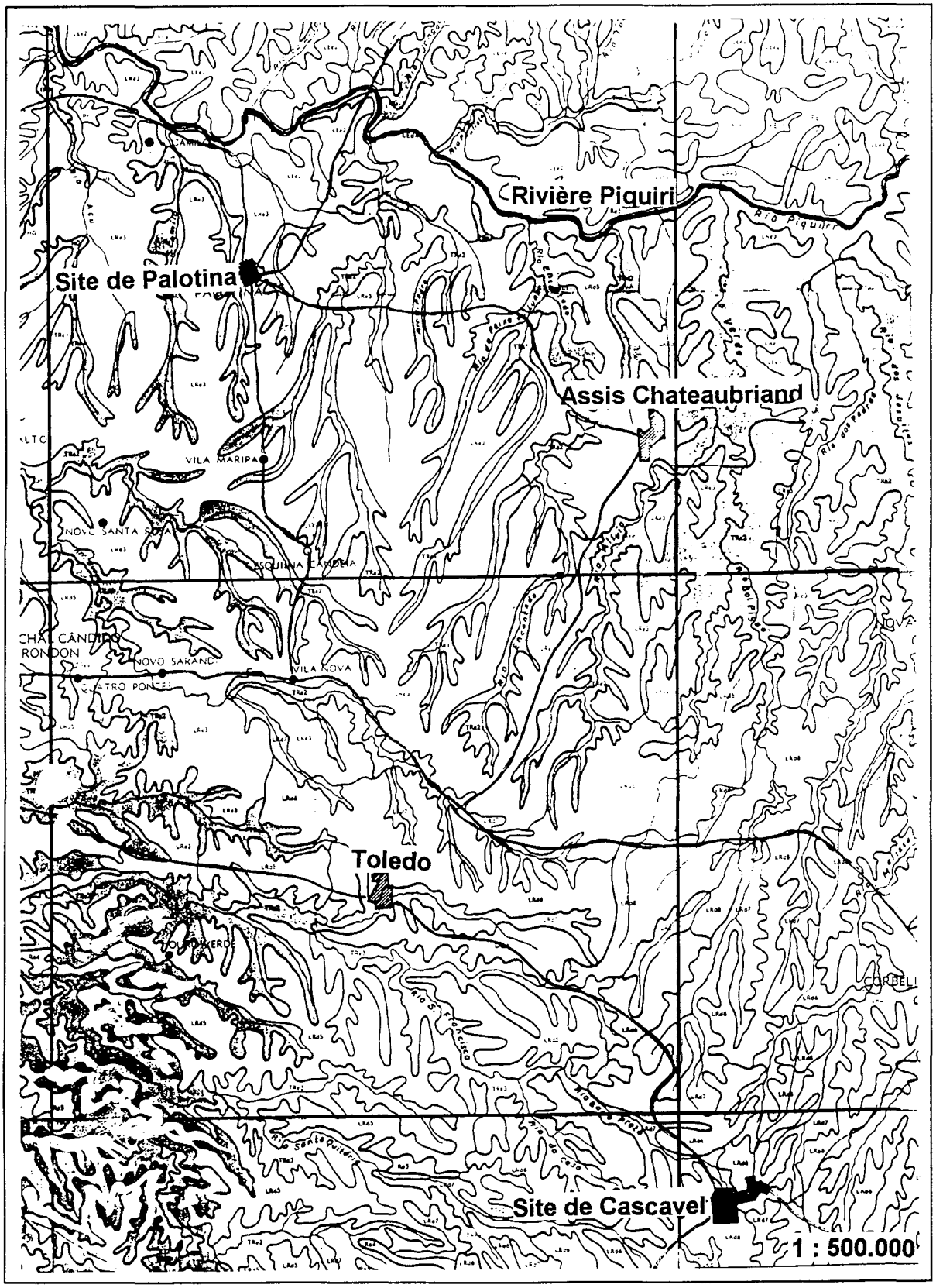


Fig. I.8 : Aperçu du réseau hydrographique du site de Cascavel et de Palotina.

Ils sont très ***poreux*** (porosité pouvant être supérieure à 60 %), très friables, extrêmement bien ***drainés***, avec une argile de ***basse capacité d'échange cationique*** (normalement < 6 méq/100g d'argile dans l'horizon B) ; les ***taux de sesquioxydes*** de Fer, d'Aluminium et les ***oxydes*** de Titane et Manganèse sont élevés. La ***rapport moléculaire*** SiO_2/Al_2O_3 pour l'horizon B oscille entre 0.6 et 1.8.

La ***texture*** est très uniforme dans tout le profil et la classe texturale, aussi bien dans l'horizon A que dans l'horizon B, et est très argileuse, ce qui donne un très bas coefficient textural, qui est le rapport entre la teneur en argile de l'horizon B et le teneur en argile de l'horizon A.

L'horizon A, qui a une épaisseur de 40 à 50 cm, présente une structure granulaire, modérément développée tandis que ***l'horizon B*** a une structure microgranulaire avec un aspect massif et poreux. CHAUVEL (1977), décrit ce matériau comme constitué de très petits granules soudés les uns aux autres et formant ainsi une structure microgrenue. D'après RESENDE (1988), la structure granulaire a tendance à être mieux développée là où les taux de gibbsite sont plus élevés. Les horizons de surface et les horizons de profondeur sont très poreux.

Le ***degré de consistance*** dans le profil est variable : meuble à l'état sec, très friable quand le sol est humide, il devient très plastique et collant quand le sol est mouillé.

Le ***degré de cohésion*** entre les agrégats dans les horizons inférieurs du profil est très faible, même à l'état sec. La transformation des mottes en matériaux finement divisés, à texture comparable à un matériau sableux, se fait sous simple pression des doigts. On dit que le sol a la structure caractéristique de "poudre de café" (PEDRO *et al.*, 1976). En présence d'eau et après agitation mécanique sans ajout de dispersant, le sol flocule. On constate que le rapport ***limon/argile*** dans horizon A est normalement < 0.15).

Les sols dont il est question occupent plus fréquemment des surfaces planes à ondulées à ***faible relief*** (déclivité de 2 - 6 %). On les trouve à des altitudes assez variées, allant de 200 m à 900 m. La présence des minéraux lourds est enregistrée. Il sont constitués de minéraux magnétiques (attirés avec un aimant).

D'après OLIVEIRA *et al.,* (1992), la ***masse volumique*** oscille généralement entre 0.7 et 1.0 g/cm^3 dans le profil et la ***masse volumique réelle*** varie de 2,6 à 3,0 g/cm^3.

La ***fraction sable*** est normalement composée de magnétite, avec des quantités faibles de concrétions ferrugineuses contenant de l'hématite, de l'ilménite et du quartz. Des traces de feldspaths, des concrétions argileuses, du débris de charbon et des concrétions ferro-manganèsiques sont aussi couramment observées.

FASOLO (1978) et VOLKOFF (1986), ont constaté que la *kaolinite* et la *gibbsite* sont les minéraux prédominants dans la ***composition minéralogique*** des argiles suivis par la *vermiculite alumineuse, l'hématite* et dans certains cas la *goethite.* Des taux variables de minéraux amorphes ont quelquefois aussi été identifiés à partir des ATD.

B) PRESENTATION DES SITES D'ETUDES.

1) Critères du choix.

Il a été fait en fonction de critères pédologiques et agronomiques. Les travaux antérieurs ont montré que les sols des sites de Palotina et Cascavel ont des comportements physique très différents, se trouvent en position de plateau et les agropédologues ont estimé que la couverture pédologique est suffisamment homogène pour mettre en place une expérimentation à long terme sur les pratiques culturales. Sur ces bases, il a donc été décidé de retenir les sites de Cascavel et Palotina.

2) Les sites.

a) Site de Cascavel (Planche I.1).

Le site d'étude a subi une déforestation à la fin des années 60 en vue de l'implantation des cultures de blé d'hiver et du soja en été. En 1980, on a commencé à utiliser une technique de "non travail du sol" avec "le semis direct". En 1982 un amendement de CaCO3 (~ 1 tonne / ha) pour la correction de l'acidité du sol a aussi été effectué. L'aire a été divisée en parcelles de 1 ha qui ont subi le même type de pratiques jusqu'à nos jours, c'est-à-dire :

Parcelle 1 : semis direct - la seule intervention sur le sol est effectuée au moment du semis (blé en hiver et soja en été) avec des semoirs à disques .

Parcelle 2 : charrue à soc - le labour est effectué 2 fois par an (pour le blé en hiver et pour le soja en été).



Planche I.1 : Situation des profils étudiés (Site Cascavel) dans le paysage.

Entre les deux parcelles, se trouve l'aire de forêt secondaire, reboisée surtout avec des *Pinus elliotis* et *Araucaria angustifolia*. Cette forêt y a été installée depuis environ 20 ans (auparavant elle a été cultivée pendant environ deux ans), et elle présente maintenant des arbres de 40 à 60 cm de diamètre et de 15 à 30 m de hauteur.

Pour chaque situation étudiée, trois fosses de 1,5X1X1,5 m ont été creusées (Planche I.1). Nous avons décrit les profils culturaux *(chapitre 3)* et des échantillons à structure conservée ont été prélevés.

b) Site de Palotina (Planche I.2).

Cette aire a subi une déforestation entre les années 60 - 70 pour l'implantation des cultures de blé d'hiver et de soja (culture d'été.) En 1980, on a commencé à utiliser la pratique du semis direct comme à Cascavel. En 1982 un amendement de carbonate de calcium (CaCO3), pour la "correction" de l'acidité du sol a été effectué. L'aire a été divisée en parcelles de 1 ha qui ont subi le même labour jusqu'à nos jours, c'est-à-dire :

Parcelle 1 : semis direct (Blé en hiver et soja en été).

Parcelle 2 : charrue à soc (Blé en hiver et soja en été).

Sur le même plateau, à environ 3 km de ces deux parcelles, nous avons l'aire sous forêt primaire. La forêt native a été conservée avec des arbres de 80 à 100 cm de diamètre et de 30 à 50 m de hauteur. Ces sols n'ont jamais été travaillés et ils constituent donc, dans ce travail, le meilleur exemple pour la comparaison des données avec la forêt primaire.

Pour chaque situation étudiée, trois fosses de 1,5X1X1,5 m ont été creusées (Planche I.2). Nous avons décrit les profils culturaux *(chapitre 3)*, et des échantillons à structure conservé ont été prélevés.

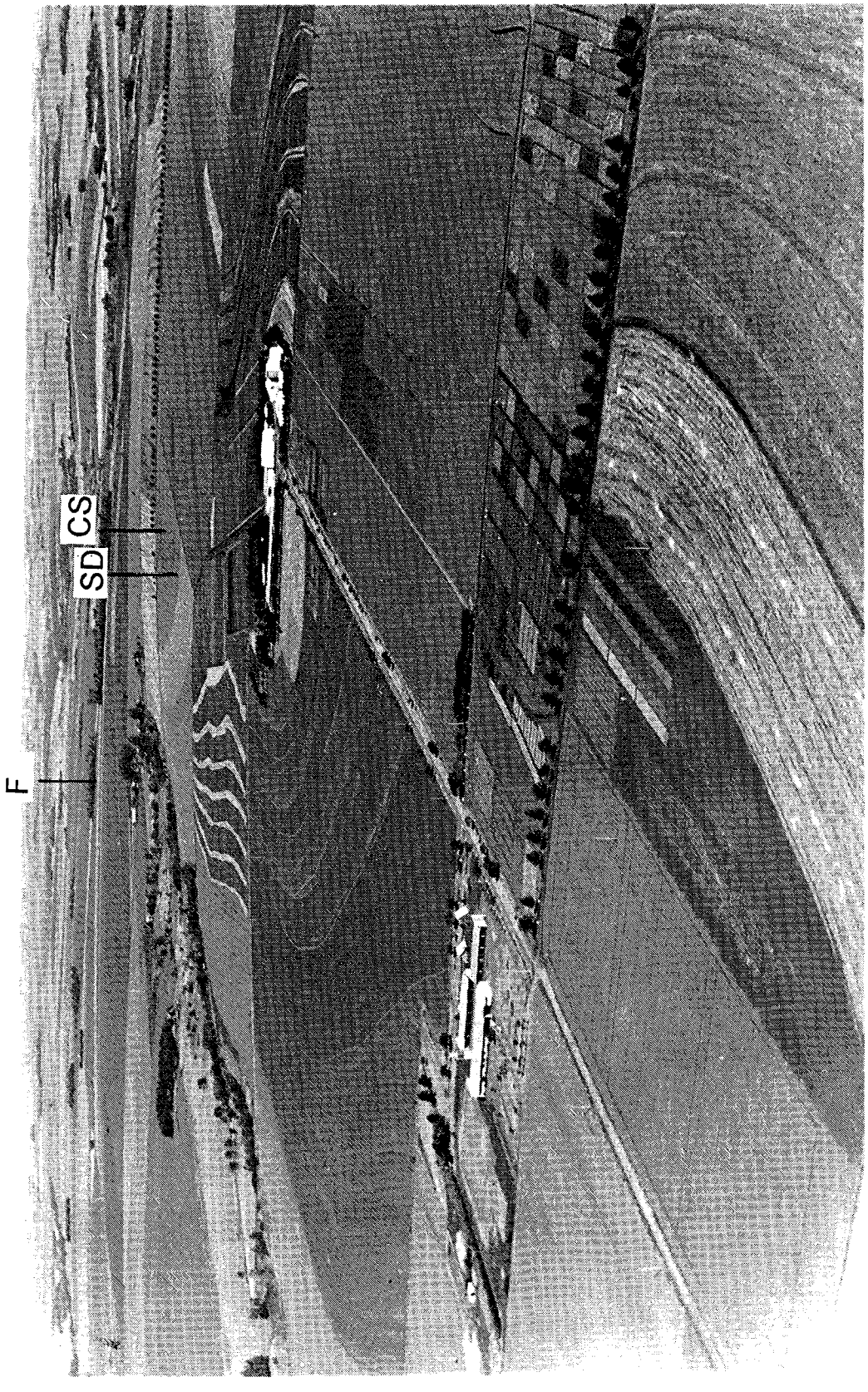


Planche I.2 : Situation des profils étudiés (Site Palotina) dans le paysage.

3) Les sols dans leur contexte pédologique (Classification des sols selon EMBRAPA (1972 et 1984)).

3.1) Sol du site de Cascavel :

C'est un ***"LATOSSOLO ROXO DISTROPHE (LRd), à texture argileuse prédominante sous forêt subtropicale pérenne à relief doux ondulé"*** (Haplic Acrorthox de la Soil Taxonomy ; Rhodic Ferralsols de la F.A.O.) **(photo (a)-planche I.3)**.

Ce type de sol, outre les caractéristiques communes à la classe, est acide, avec une faible fertilité naturelle notamment du fait de sa faible saturation en bases (caractère distrophe - taux de saturation en bases (V%) < 50 %) et de son taux élevé en aluminium échangeable.

3.2) Sol du site de Palotina :

C'est un ***"LATOSSOLO ROXO EUTROPHE (LRe), à texture argileuse modérée sous forêt tropicale pérenne à relief très doux voire pratiquement plat"*** (Haplic Eutrorthox de la Soil Taxonomy ; Rhodic Ferralsols de la F.A.O.) **(photo (b)-planche I.3)**.

Ce sol est moins acide que le précèdent et possède une meilleure fertilité naturelle qu'à Cascavel du fait de la saturation plus élevée en bases (caractère eutrophe - taux de saturation en bases (V%) ≥ 50 %), et d'un plus faible taux d'aluminium échangeable.

III) SYNTHESE .

Les éléments rassemblés dans ce chapitre illustrent les différences de d'environnement pédologique et climatique des sites étudiés.

Le ***site de Cascavel,*** est situé dans une zone d'écoulement basaltique, sur une surface stable ancienne, en position de haut plateau. Le climat est de type Cfb avec des mois d'été frais (température du mois le plus chaud <22°C) et du gelés en hiver.

Le ***site de Palotina,*** est situé dans une zone d'écoulement basaltique, sur une surface plus jeune que précédemment avec un relief plan. Le climat est de type Cfa avec des mois d'été chauds (température du mois le plus chaud température > 22°C) et presque pas de gelées en hiver.

En ce qui concerne les sols, à Cascavel le sol est un *"LATOSSOLO ROXO DISTROPHE (LRd), à texture argileuse prédominante sous forêt subtropicale pérenne, à relief doux ondulé"*, alors que à Palotina, le sol est un *"LATOSSOLO ROXO EUTROPHE (LRe), à texture argileuse modérée sous forêt tropicale pérenne à relief très doux voire pratiquement plat"*. Les sols sont donc différents au plain chimique, l'un est distrophe, l'autre est eutrophe).

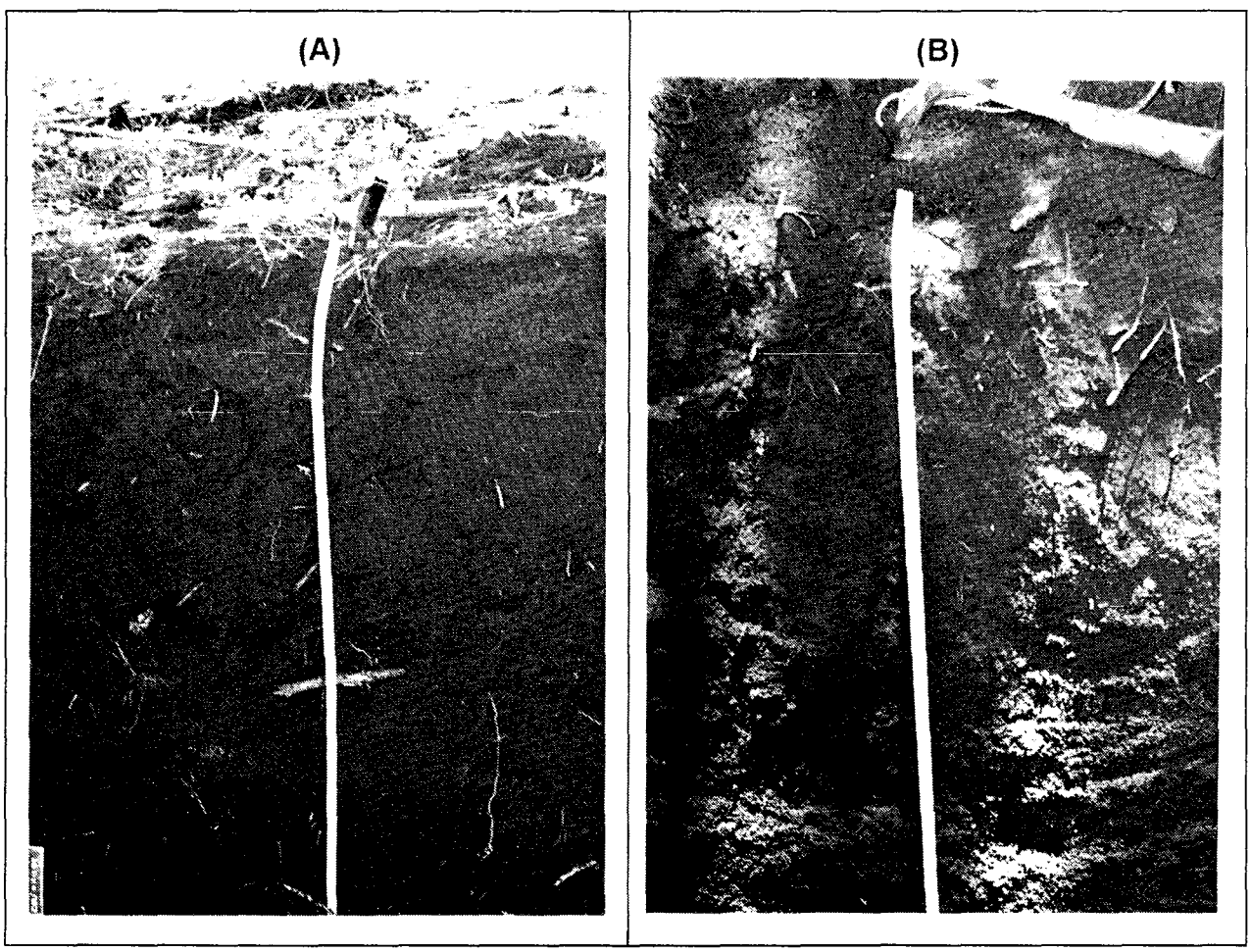


Planche I.3 : Vue des profils sous forêt des sols "Latosolos roxo" des sites de Cascavel (a) etde Palotina (b).

CHAPITRE 2 :

NATURE ET CONSTITUTION DES SOLS.

ASPECTS PEDOGENETIQUES

Nous avons vu précédemment que les sols de Palotina et de Cascavel sont probablement à des stades différents de leur évolution pédogénétique. Afin de poursuivre plus loin dans cette analyse, il est nécessaire de dégager quelques éléments généraux d'interprétation des propriétés physiques et chimiques des sols.

Il s'agit ici d'appréhender le contexte physico-chimique des sols, d'établir des relations entre divers caractères (minéralogiques, morphologiques...), et ainsi de montrer les différences entre les deux sites sous forêt. Ces données nous serviront à comprendre les modifications intervenues après mise en culture et à préciser la nature des dégradations.

I) DONNEES PHYSICO-CHIMIQUE DES SOLS ETUDIES.

Les propriétés des sols dépendent de la nature des constituants et de leur proportions relatives. De faibles différences de l'environnement physico-chimique peuvent entraîner d'importantes variations de comportement [BRADFIELD (1950) ; CHAUVEL *et al.*, (1976)]. Les études qui suivent tenteront de dégager quelques critères de différenciation des sols.

Les analyses ont été réalisées sur des échantillons issus des prélèvements effectués sur l'ensemble de l'épaisseur de chaque zone d'échantillonnage du profil sous forêt décrit auparavant. Nous étudierons les points suivants :

I. Analyse de la Matière Organique ;
II. Analyses granulométriques ;
III. Analyses chimiques :
    1. pH_{H2O} et pH_{KCl} ;
    2. CEC et cations échangeables ;
IV. Détermination de la masse volumique du solide (ρs).

Nous présenterons par la suite les résultats sous forme de tableaux et de graphiques. Pour les comparaisons entre données, on a utilisé le test de la plus petite différence significative (PPDF), DAGNELIE (1969).

A) ANALYSE DE LA MATIERE ORGANIQUE.

1) Protocole.

Cette analyse a été réalisée sur un échantillon de sol séché à l'air et tamisé à 2 mm. ***Le carbone total et l'azote*** ont été dosés respectivement selon la *méthode Anne* (oxydation au Bichromate de Potassium) et la *méthode Kjeldahl.*

2) Résultats et interprétation.

Les résultats pour les deux sites sont rassemblés sur le tableau II.1 et reportés sur la figure. II.1.

Tableau II.1 : Distribution du carbone organique, de l'azote et de la relation C/N pour les deux sols étudiés.

Prof.	Site de Cascavel			Site de Palotina		
(cm)	C (%)	N (%)	C/N	C (%)	N (%)	C/N
0-20	3,28	0,28	12	3,26	0,41	8
20-40	2,04	0,17	12	0,86	0,13	7
40-70	1,31	0,10	13	0,69	0,09	8
70-100	1,06	0,08	14	0,40	0,05	8
100-150	0,83	0,06	14	0,38	0,04	9

Pour le **site de Cascavel** la teneur en carbone, pour ce sol sous forêt, est de 3,28 % dans les premiers 20 cm et elle décroît très progressivement vers le bas, où elle atteint 0,83 % à 150 cm. Les rapports C/N (12 à 14) indiquent une meilleure humification des matières organiques.

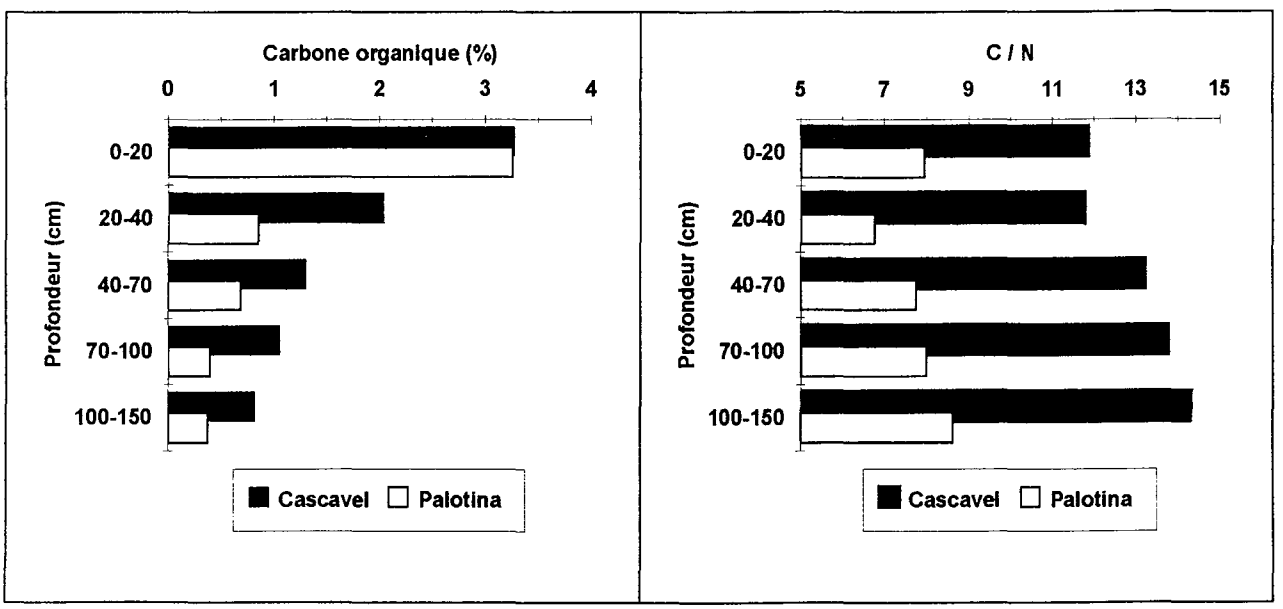


Fig.II.1 : Evolution des teneurs en carbone organique et des rapports C/N du profil sous forêt des sols étudiés.

Pour le site de **Palotina** la teneur en carbone organique en surface du sol sous forêt, est similaire à celle observée dans le sol de Cascavel (3,26 % pour les 20 premiers cm). Elle devient plus faible vers les horizons plus profonds où le taux

de carbone organique est de l'ordre de 0,38 % à 150 cm. Les rapports C/N sont moins élevés qu'à Cascavel et restent à peu près constants sur l'ensemble du profil (C/N de 8), indiquant une meilleure minéralisation des matières organiques.

Les valeurs de C/N suggèrent des valeurs moindres des coefficients d'humification et de minéralisation à Cascavel par rapport à Palotina, ceci peut-être dû à :

- la température plus faible à Cascavel en raison de l'altitude plus élevée dans ce site ;
- la composition différente de la matière organique et
- l'acidité à Cascavel.

B) ANALYSES GRANULOMETRIQUES.

1) Protocole.

Les analyses ont été réalisées à partir d'un prélèvement de plusieurs kilogrammes séchés à l'air et tamisés à < 2 mm. La dispersion de l'argile a été réalisée après ajout d'hexamétaphosphate de sodium et agitation mécanique dans l'eau (ROBERT et TESSIER, 1974). Les fractions limoneuse et argileuse ont été séparées après sédimentation dans l'eau et prélèvement à la pipette sur la base de la loi de Stockes. Les fractions sableuses ont été séparées par tamisage.

2) Résultats et interprétations.

Les résultats pour les deux sites sous forêt sont rassemblés dans le tableau II.2 et reportés sur la figure II.2.

La granulométrie des deux sols est caractérisée par une forte domination de la fraction argile (< 2 µm). D'après le triangle de texture utilisé en France [JAMAGNE (1967, in : BAIZE,1988)], les deux sols seraient classés en argile lourde avec en moyenne 79% d'argile pour le site de Cascavel et 80 % pour le site de Palotina.

On constate aussi que la teneur en argile augmente avec la profondeur pour les deux sites. Le site de Cascavel est moins argileux que le site de Palotina dans la couche 100 à 150 cm.

La *fraction limoneuse* totale dépasse 20% en surface et diminue avec la profondeur dans les deux profils, tout en étant un peu plus marquée dans le site de Cascavel qui présente un taux supérieur de limon total par rapport au site de Palotina (**18%** contre **15%,** en moyenne).

La *fraction sable totale* présente une distribution assez uniforme au sein des deux profils, mais elle est trois fois plus forte à Palotina qu'à Cascavel (6,4% contre 2,2%, en moyenne).

Tableau II.2 : Analyse granulométrique, en %, des profils sous forêt des sites de Cascavel et Palotina.

Prof. (cm)	Site de Cascavel				Site de Palotina			
	Argile	Limon total	Sable total	*IDTh	Argile	Limon total	Sable total	*IDTh
0-20	73,6	24,2	2,2	1,00	71,9	21,6	6,6	1,00
20-40	80,0	17,7	2,3	1,03	80,0	14,0	6,0	1,11
40-70	80,1	17,5	2,4	1,09	81,0	13,0	6,0	1,13
70-100	80,9	16,9	2,2	1,10	82,5	11,3	6,2	1,15
100-150	81,0	16,8	2,2	1,10	82,8	11,0	6,2	1,15

* IDTh = indice de différenciation texturale (% Argile de l'horizon considéré / % Argile de l'horizon plus pauvre en argile du même profil) - BAIZE, (1988).

Ces résultats de distribution granulométrique, sont assez proches de ceux présentés par l'EMBRAPA (1984), mais différents des résultats de texture trouvés par FERRERA (1988) et CARVALHO (1990).

**** Interprétation.***

Des résultats précédents, il ressort que les deux sols sont très argileux, avec une différence significative (au niveau de 5 % du test de la plus petite différence significative) de leur teneur en sable (Palotina est plus sableux, alors que le site Cascavel est plus limoneux surtout en surface). Cette concentration de limons en

surface du sol peut conduire à une certaine prédisposition à des phénomènes de dégradation superficielle.

En ce qui concerne la fraction sableuse, cette différence significative par rapport à la teneur de sable peut faire penser à une probable évolution pédologique différenciée entre les deux sites. La teneur en sable plus faible du site de Cascavel peut y traduire une altération plus poussée du quartz, ainsi qu'a pu le montrer CHAUVEL (1977) au Sénegal.

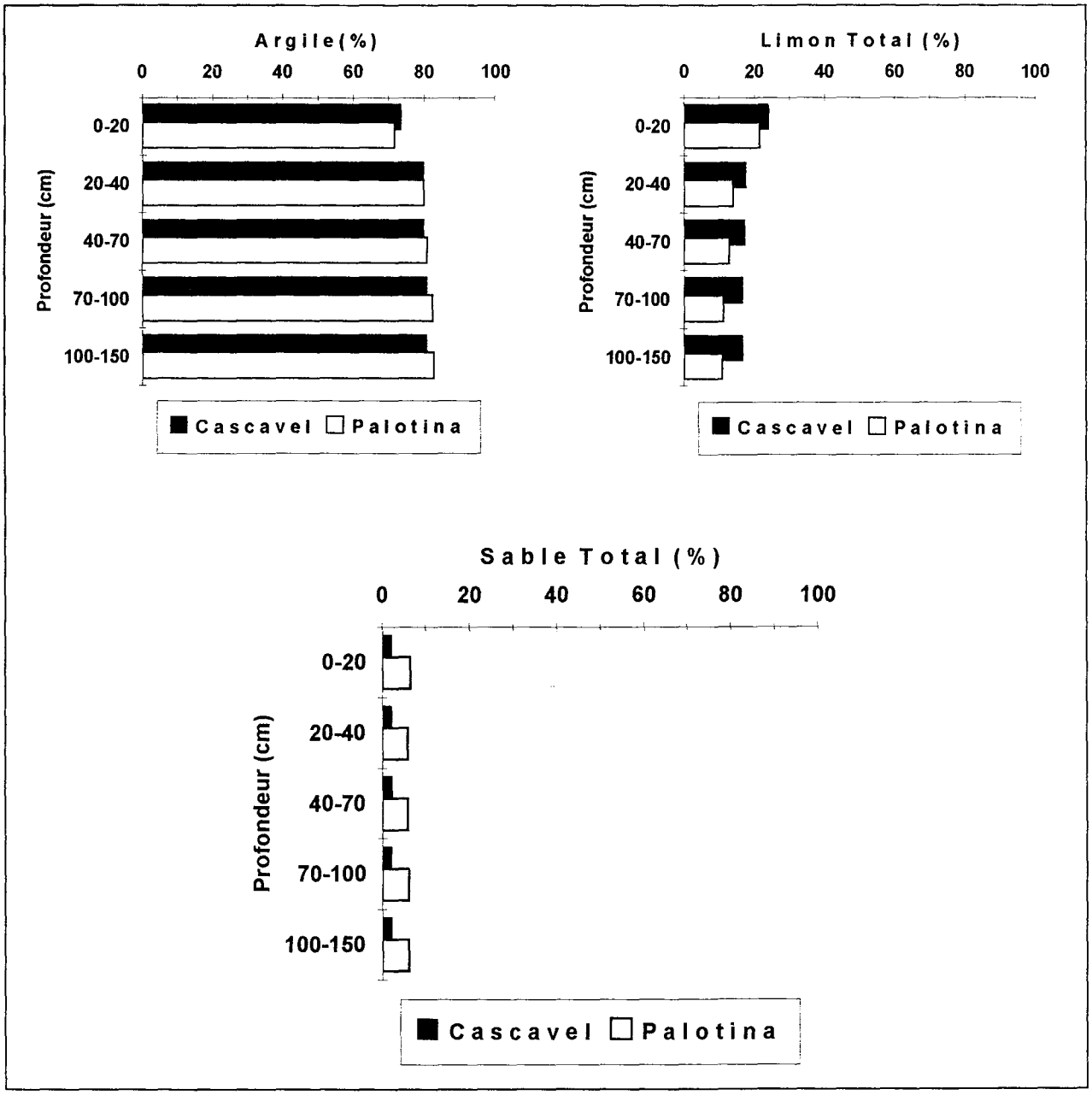


Fig. II.2 : Distribution de la granulométrie (Argile, Limon total et Sable total) du profil sous forêt des sites étudiés.

Remarquons aussi que le taux d'argile en valeur relative plus faible dans l'horizon A que dans les horizons profonds, suppose une perte de cette fraction à proximité de la surface. Plusieurs facteurs peuvent intervenir simultanément ou indépendamment les uns des autres :

- l'érosion peut entraîner la migration préférentielle des argiles se trouvant en surface,
- une migration de l'argile en profondeur peut se produire,
- la remontée en surface d'éléments grossiers par les animaux du sol depuis la profondeur peut provoquer un appauvrissement relatif du sol en argile (ESCHENBRENNER, 1987).

En considérant l'indice de différenciation texturale (IDTh - tableau II.2, Fig. II.3) pour les deux sols étudiés, nous remarquons que la différence entre les deux sites commence à partir de 30 cm, et l'IDTh augmente plus dans le profil de Palotina que dans celui de Cascavel.

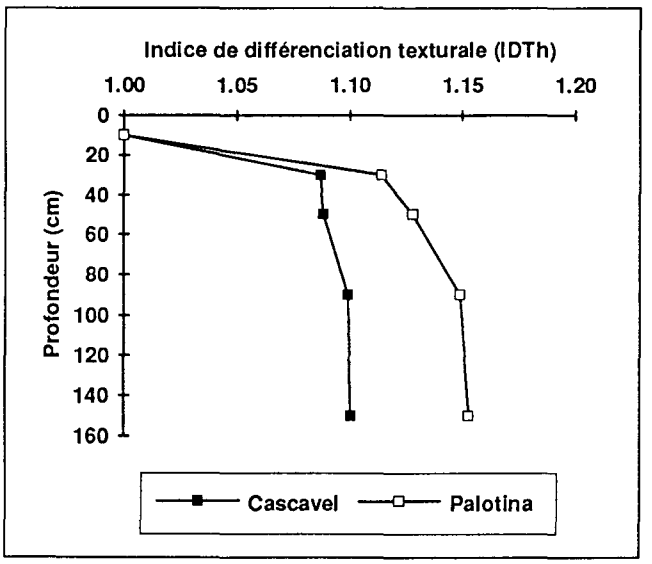


Fig. II.3 : Indice de différenciation texturale du profil sous forêt des sols étudiés.

La thèse d'une faible migration de l'argile en profondeur accompagné du processus biologique semble la plus plausible pour expliquer cette concentration d'argile en profondeur car l'érosion de surface semble de toute évidence faible. Nous verrons par la suite quels autres arguments peuvent être invoqués pour conforter cette hypothèse.

C) ANALYSE CHIMIQUE.

1) Protocole.

Les analyses ont été faites sur une aliquote d'un échantillon de plusieurs kilogrammes qui a été séché à l'air, broyé et tamisé à 2 mm en utilisant les méthodes suivantes :

- **pH_{H2O} et pH_{KCl} :** mesures effectuées en suspension, le rapport masse de solide/masse de liquide est de 1/2,5 ;
- **Capacité d'échange cationique (CEC) du sol et les cations échangeables :** au chlorure de cobaltihexamine, c'est-à-dire réalisée au pH du sol (AFNOR, 1985). Cette méthode a été choisie car nos sols sont acides ;
- **Capacité d'échange cationique (CEC) de l'argile :** au chlorure de cobaltihexamine, (AFNOR, 1985). Pour cette analyse nous avons utilisé la fraction <2 µm traitée à l'H_2O_2 et nous avons admis que l'extraction à été faite à un pH très proche de celui du sol.

2) Résultats et interprétation.

Les résultats pour les deux sites sont rassemblés sur le tableau II.3 et reportés sur les figures II.4,6 et 8.

Tableau II.3 : Analyses chimiques des sols sous forêt des sites de Cascavel et Palotina.

Sites	Prof. (cm)	pH		ΔpH	Complexe Adsorbant (méq/100g)				
		H2O (1:2,5)	KCl (1:2,5)		C.E.C du sol	Ca+Mg	K+Na	S/T	Al
Cascavel	0-20	5,1	4,1	1,0	9,6	7,3	0,2	78	1,1
	20-40	5,0	4,0	1,0	6,8	3,4	0,1	51	1,1
	40-70	5,1	4,2	0,9	5,2	1,4	0,1	29	1,7
	70-100	4,9	4,2	0,7	4,8	0,7	0,1	17	1,6
	100-150	4,9	4,1	0,8	4,6	0,4	0,1	11	1,4
Palotina	0-20	6,3	5,2	1,1	10,5	8,6	0,7	89	0,1
	20-40	6,5	5,5	1,0	8,2	6,7	0,5	88	0,2
	40-70	6,6	5,7	0,9	7,6	5,9	0,3	82	0,2
	70-100	6,5	5,8	0,7	6,9	4,9	0,2	74	0,2
	100-150	6,5	5,8	0,7	6,6	4,7	0,2	74	0,3

2.1) pH_{H2O}, pH_{KCl}.

- Dans le **sol à Cascavel**, le pH_{H2O} varie de 5.1 en surface à 4.9 en profondeur. La valeur ΔpH (pH_{H2O} - pH_{KCl}) varie de 1.0 unité en surface à 0.8 unité en profondeur.

- Dans le **sol à Palotina,** le pH_{H2O} varie de 6.5 en surface à 6.3 en profondeur. La valeur ΔpH (pH_{H2O} - pH_{KCl}) varie de 1.1 en surface à 0.7 unité en profondeur.

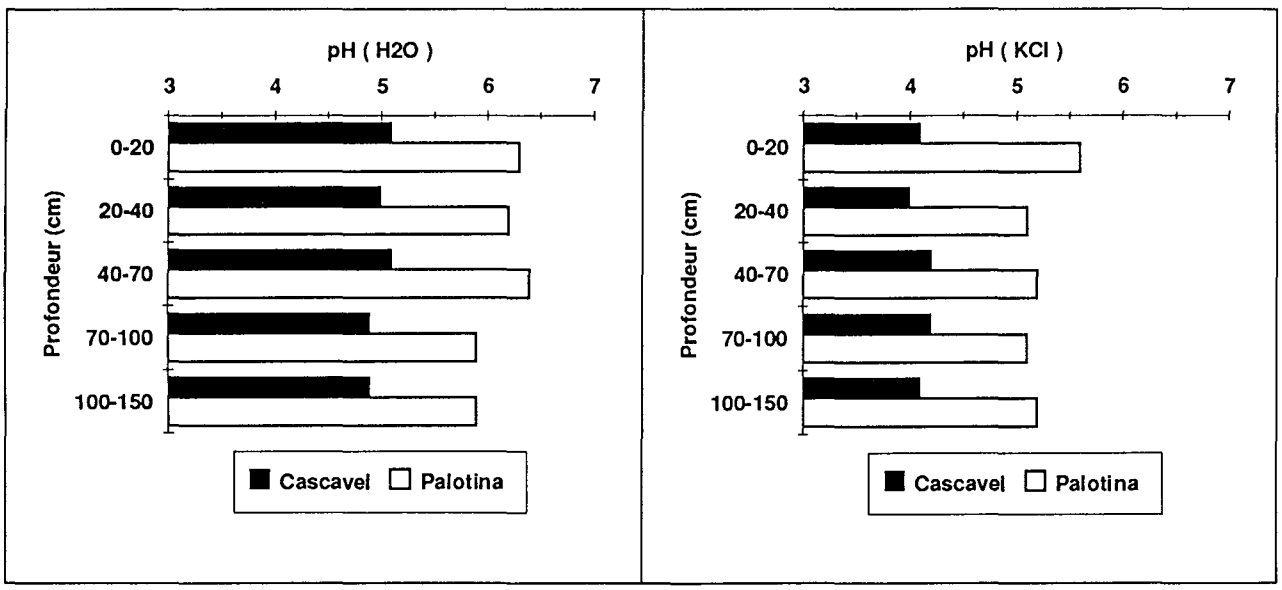


Fig.II.4 : Evolution des ph H_2O et KCl du profil sous forêt des sites étudiés.

**** Discussion.***

Du point de vue des propriétés chimiques, Cascavel se distingue notoirement de Palotina, par un caractère plus acide, une désaturation en base plus prononcée, particulièrement dans les horizons de profondeur (>40 cm).

Dans les horizons pauvres en carbone, les valeurs de CEC rapportées à la teneur en argile permettent d'estimer, dans les deux cas, de faibles charges (Cascavel : 5,9 - 5,6 méq/100g d'argile ; Palotina : 8,3 - 7,9 méq/100g d'argile) : il s'agit donc typiquement de Low Activity Clays (LAC), minéraux attendus dans l'ambiance ferrallitisante décrite précédémment. En conséquence, les teneurs en aluminium extractible rapportées à la quantité d'argile sont faibles, de 1,5 à 1,2 méq Al/100g argile pour Cascavel ; à Palotina, elles sont très faibles (0,14-

0,36 méq Al/100g d'argile). Compte tenu de ces éléments et des teneurs en cations échangeables, on peut qualifier le sol ferrallitique de dystrophe à Cascavel et d'eutrophe à Palotina. Ces observations sont en accord avec des résultats antérieurs [EMBRAPA (1972 et 1984) ; Oliveira (1992)].

Les deux sols ont un $\Delta pH > 0$, ce qui indique que la charge nette est négative [GILLMAN (1984), KENG et UEHARA (1974), MEKARU et UEHARA (1972), PARFITT (1980), UEHARA et KENG (1975), UEHARA et GILLMAN (1980)].

Nous savons que dans des sols ferrallitiques la kaolinite joue un rôle important parce qu'elle posséde une charge variable. Son "pzc" (point de charge nulle) s'étale entre 3.6 et 4.6, il est donc normal que les sols étudiés aient un excès de charges négatives, car leur pH est supérieur au pzc de cette argile. Il ne faut pas oublier que la contribution des oxydes de fer, présents eux aussi en proportions importantes dans les sols ferrallitiques typiques (9-16%, selon KILASARA (1989)), sur la charge globale des sols. Selon ATKSON *et al.*, (1967), PARKS et DE BRUYN (1962), les oxydes ont des valeurs de pzc > 7 et portent donc des charges positives dans le cas des sols ferrallitiques typiques (Fig. II.5).

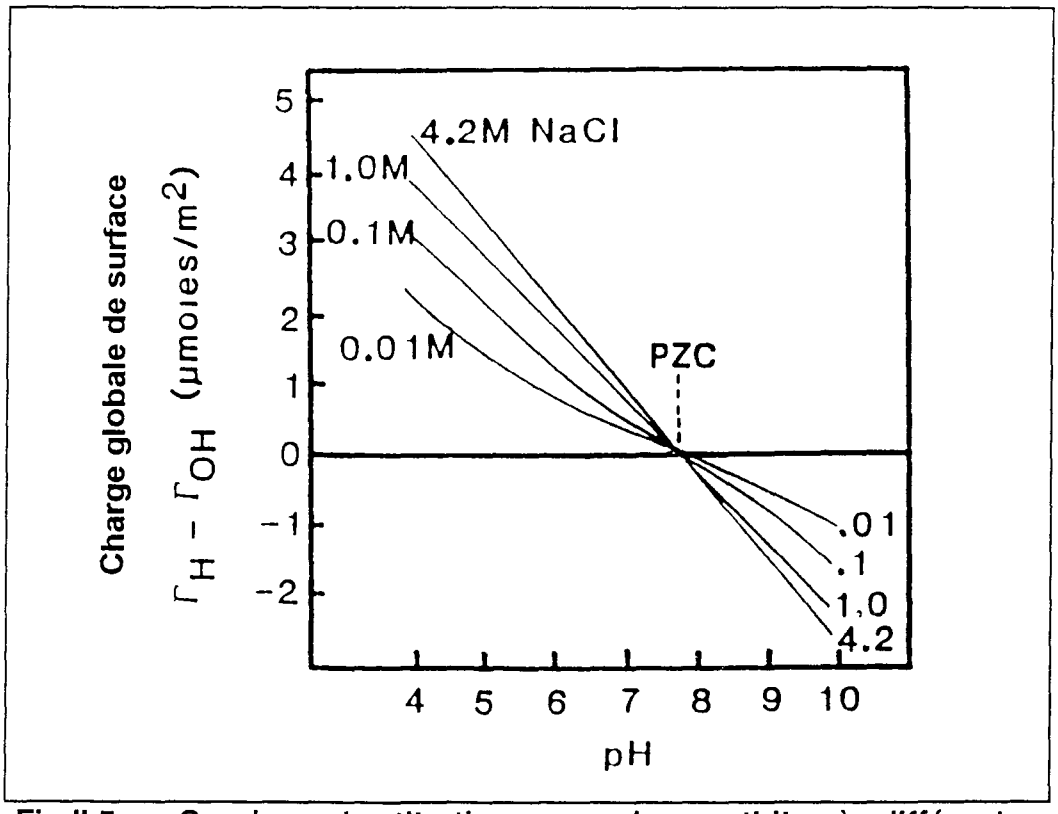


Fig.II.5 : Courbes de titration pour la goethite à différentes concentration en NaCl (Adapté de Hingston, 1970, in : Mc Bride, 1989).

L'interaction entre ces deux types de charges, couplée à l'effet "pzc" élevé des oxydes, provoque une co-floculation de ces deux constituants, et cette liaison électrostatique entre les argiles et les oxydes conduirait à l'agrégation et à la stabilité des sols fortement altérés, tels que les sols ferrallitiques typiques (El SWAIFY (1976) ; KILASARA (1989).

2.2). Complexe adsorbant.

a) Capacité d'échange cationique (C.E.C) du sol.

Sur le tableau II.3 et la figure II.6, on voit que la C.E.C du sol est faible pour les deux sols et diminue avec la profondeur. Pour le site de Cascavel elle est de l'ordre de 6,2 méq/100g en moyenne et, de l'ordre de 8,0 méq/100g en moyenne pour le site de Palotina.

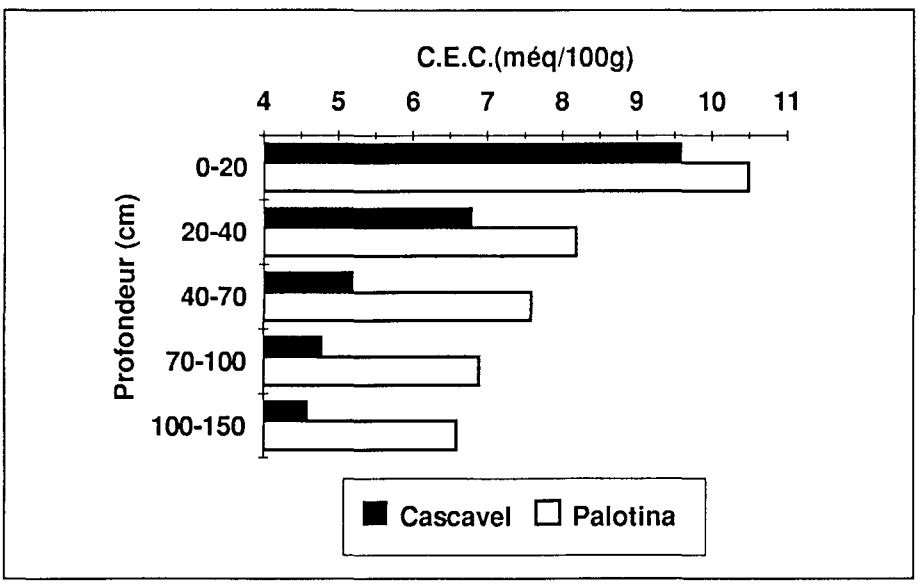


Fig. II.6 : Evolution de la C.E.C. (méq / 100g) du profil sous forêt des sites étudiés.

**** Discussion.***

Il est connu que dans les sols ferrallitiques, une partie assez importante de la C.E.C est due aux argiles, aux oxydes et à la matière organique [EMBRAPA (1984) ; LEVEQUE (1967)]. Pour distinguer la part revenant à la matière

organique et celle due à la fraction minérale nous avons reporté la C.E.C. en fonction de la teneur en carbone (Fig. II.7).

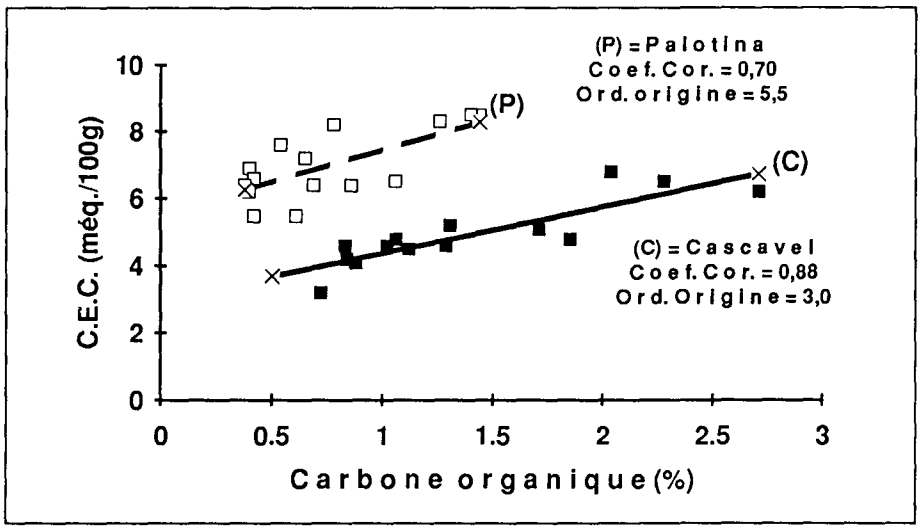


Fig. II.7 : Corrélation entre le carbone organique et la C.E.C. du profil sous forêt des sites étudiés.

Pour un taux de carbone organique nul, la C.E.C du sol est de 3,0 méq/100g pour le sol du site de Cascavel et de 5,5 méq/100g pour le sol du site de Palotina. Ces valeurs sont très proches des résultats de la détermination de la C.E.C de l'argile en laboratoire (3,1 et 5,6 méq/100g respectivement). La comparaison de ces valeurs mesurées aux valeurs estimées précédemment suggère une sous-estimation des teneurs en argile par la méthodologie suivie pour l'analyse granulométrique. Ceci n'est pas surprenant, les sols ferrallitiques dérivés de basalte étant fortement micro-agrégés.

Nous en concluons que, pour le sol du site de Cascavel la C.E.C. due à l'argile est de 3 méq/100g. La C.E.C. attribuée à la matière organique est comprise entre 0 et 3 méq/100g suivant les cas. Pour Palotina le même raisonnement conduit à 5,6 méq/100g pour la phase argileuse et entre 0 et 3 méq/100g pour la matière organique.

Nous noterons qu'à Cascavel, où le coefficient de corrélation est de 88%, le rôle joué par la matière organique dans les propriétés d'échange est plus important en valeur relative qu'à Palotina, puisque la C.E.C. de la matière organique peut représenter 50% de la C.E.C. totale.

Ce résultats indiquent aussi que la C.E.C. du sol de Palotina, moins acide, est beaucoup plus élevée qu'à Cascavel.

b) Cations échangeables.

Les résultats sont reportés sur le tableau II.3 et la figure II.8.

Dans les deux sols la somme des cations échangeables Ca^{++} et Mg^{++} est prédominante dans l'ensemble des horizons. Elle approche de la saturation de la capacité d'échange à Palotina. Elle diminue cependant du haut vers le bas du profil.

Les teneurs en potassium (K^+) et sodium (Na^+) échangeables sont faibles dans les deux sols, tout en étant supérieures dans le sol à Palotina.

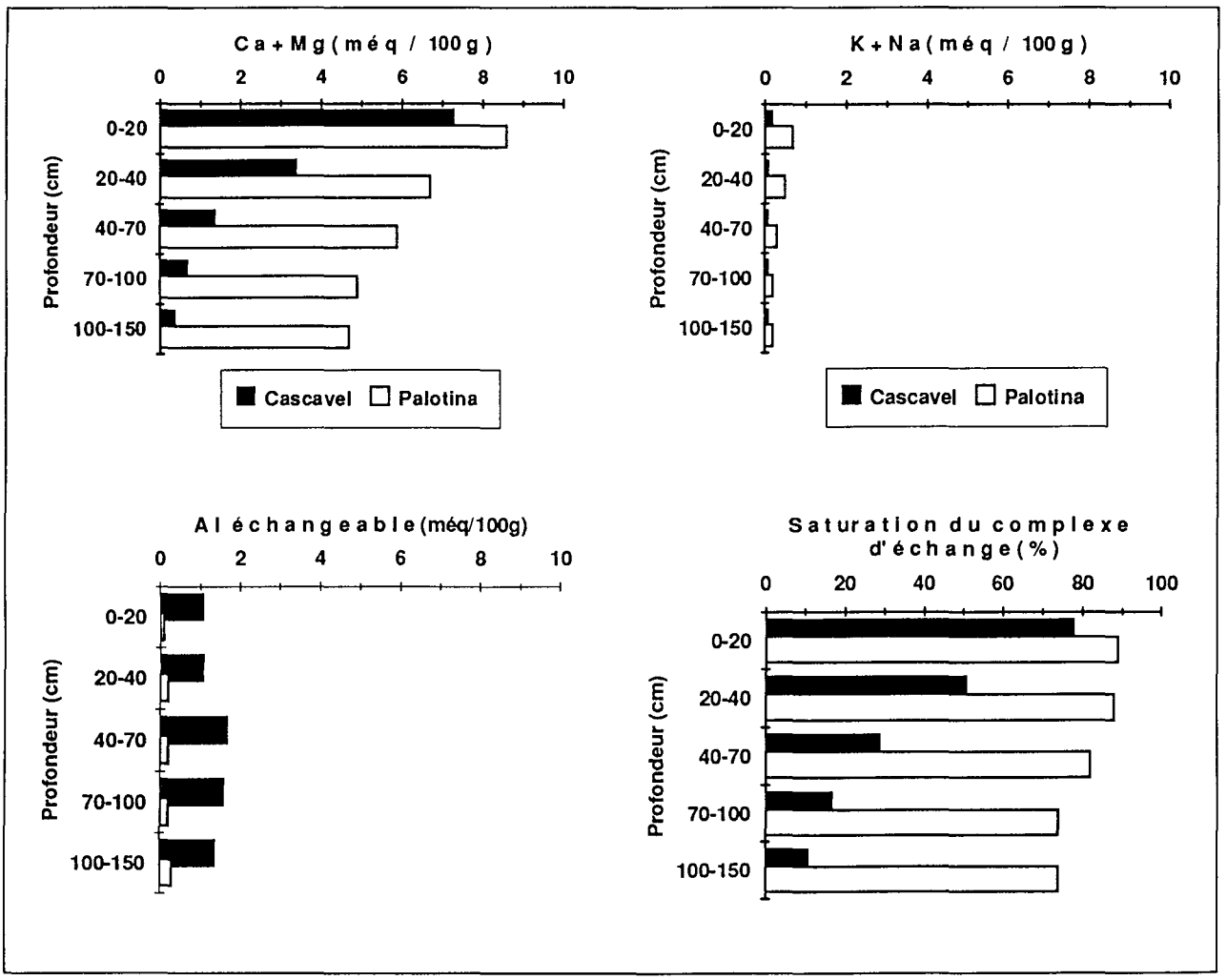


Fig. II.8 : Distribution selon la profondeur des cations échangeables (Ca+Mg, K+Na et Al) et de la saturation du complexe d'échange des profils sous forêt des sites étudiés.

**** Discussion.***

Sous forêt l'accumulation des cations à la surface du sol (0 - 30 cm) - tableau II.3, est probablement due au recyclage des éléments par l'intermédiaire des feuilles des arbres qui retombent sur le sol comme ont pu déjà le montrer CHAUVEL *et al.*, (1987), LUCAS *et al.*, (1986 et 1993) en travaillant sur des sols de la forêt Amazonienne.

Il y a lieu de s'interroger sur le rôle des cations sur les propriétés des sols car nous avons à Palotina plus de 70 % des sites d'échange occupés par Ca^{++} + Mg^{++}, contre moins de 40% à Cascavel.

On sait que le rôle des cations Ca^{++} et Mg^{++} (surtout Ca^{++}), joue un rôle important pour les propriétés physiques des sols lorsqu'il s'agit d'argiles 2:1. Pour DUFEY et BANIN (1979), les propriétés des sols et des argiles restent stables aussi longtemps que 60 à 70 % des sites d'échange sont saturés par les ions Ca^{++} HALITIM *et al.*, (1984), ont bien montré l'influence positive des cations Ca^{++} et Mg^{++} sur la micro-organisation de l'argile.

Nous verrons par la suite ce qu'il en est pour des sols à dominante kaolinitique.

c) Taux de saturation du complexe d'échange.

On voit, sur le tableau II.3 et la figure II.8 que le taux de saturation du complexe d'échange est assez variable pour le sol de Cascavel (75% en surface (0-20 cm), à moins de 10 % en profondeur (100-150 cm)), et peu variable pour le sol à Palotina (90 % en surface à 80% en profondeur).

La ***teneur en aluminium échangeable*** et son évolution en profondeur (Fig. II.8), permet de distinguer de façon assez remarquable les deux sols :

à Palotina, les teneurs en Al^{3+} sont assez faibles, de l'ordre de 0,1 à 0,3 méq/100g dans l'ensemble du profil ;

à Cascavel, on note des teneurs nettement supérieures à celles trouvées à Palotina, c'est-à-dire de l'ordre de 1,1 à 1,7 méq/100g sur l'ensemble du profil.

Ces valeurs en aluminium échangeable expliquent en partie les différences de pH, surtout du pH_{KCl}, entre les deux sites.

Remarquons enfin que les données chimiques, sont assez proches de celles trouvées par l'EMBRAPA (1984) et FERREIRA (1988), sur d'autres sols ferrallitiques du Brésil, et KILASARA (1989), ce dernier sur des sols ferrallitiques d'Afrique (Tanzanie).

D) MASSE VOLUMIQUE DE SOLIDE (ρS).

La masse volumique du solide (g/cm^3), a été déterminée par la méthode du pycnomètre décrite par BLAKE (1965), sur sol sec tamisé à 2 mm et broyé à 200 µm. Nous donnons les résultats relatifs aux échantillons des profils sous forêt.

1) Résultats et Interprétations.

Les résultats sont rassemblés sur le tableau II.4. On voit que :

- la masse volumique de solide croît vers la profondeur. Les valeurs minimales ont été trouvées en surface tant à Cascavel qu'à Palotina.
- à Cascavel, la masse volumique de solide varie de 2,73 g/cm^3 à 2,88 g/cm^3 et, à Palotina, de 2,81g/cm^3 à 2,94g/cm^3.

Tableau II.4 : Mesures de la masse volumique (g/cm^3) des sols des deux sites étudiés.

Prof.	Site de Cascavel		Site de Palotina	
(cm)	Mesures	Moyenne	Mesures	Moyenne
10	2,672		2,653	
	2,660	2,67	2,649	2,65
30/50	2,799		2,961	
	2,780	2,79	2,969	2,97
90/150	2,886		2,938	
	2,884	2,88	2,944	2,94

**** Interprétation.***

D'après KILASARA (1989), il existe une forte corrélation entre la densité de solide d'une part, et les teneurs en fer et en carbone d'autre part (la relation donnée par KILASARA est de la forme : **$1 / ds = A + B\ Fe_2O_3 + C$ M.O.**).

Nos résultats montrent que les valeurs de densité de solide augmentent en profondeur, en même temps que diminue le taux de matière organique et qu'augmente la teneur en fer (EMBRAPA, 1984 et 1972), pour les deux sols.

Comme les teneurs en matière organique. sont similaires en surface, ceci nous permet de *conclure* que les différences de densités entre les deux sites seraient dues à la teneur en fer. Il semble donc qu'à Palotina le sol soit plus riche en oxydes de fer. Nous conclouons aussi que la calcul de la porosité ne peut se faire en utilisant la valeur de densité de solide habituelle de 2,65 car les sols sont développés sur un substratum basaltique riche en fer.

E) SYNTHESE ET CONCLUSION.

Les sols de Cascavel et Palotina sont des sols très argileux (en moyenne 80% d'argile), avec une faible teneur en sable et en limons.

Le sol de Cascavel est acide, avec un taux de saturation en bases assez réduit (< de 10% en profondeur), tandis que le sol de Palotina a un pH proche à neutralité et un taux de saturation supérieur à 80%. Dans ces conditions, le sol de Cascavel concentre relativement plus les matières organiques : le rapport C/N plus élevé qu'à Palotina indique des conditions moins favorables à la minéralisation.

Les deux sols ont un $\Delta pH>0$, ce qui caractérise une capacité d'échange cationique (prédominance de charges négatives sur les argiles) et une ambiance physico-chimique qui serait assez favorable à l'agrégation des sols ferrallitiques.

Les différences observées entre les profils pourraient être rattachées à la composition des écoulements basaltiques plus riches en bases, surtout en calcium, dans la région de Palotina comme nous l'avons déjà signalé (*chapitre 1*). En outre, l'âge des sols peut aussi intervenir, sans que l'on puisse établir à ce niveau de la discussion, la part réelle de chacun des deux phénomènes.

Tous ces éléments confirment que nous avons à Cascavel un sol *ferrallitique typique*, alors qu'à Palotina il s'agit d'un sol *ferrallitique faiblement désaturé* en accord avec la classification (LRd et LRe) donnée par l'EMBRAPA (1972 et 1984).

II) MINERALOGIE DES SOLS ETUDIES. ETUDE DES CONSTITUANTS.

INTRODUCTION.

Dans le chapitre précédent, nous avons mis en évidence des caractéristiques physico-chimiques différentes des deux sols étudiés.

Pour expliquer le comportement des deux sols, l'une des hypothèses retenues est que la composition minéralogique déterminerait une partie du comportement physique [MC NEAL et COLEMAN (1966) ; MC NEAL *et al.*, (1966)]. Cependant, outre la présence de tel ou tel constituant minéralogique, la proportion de chaque minéral [ACTON *et al.*, (1963) ; FRANZMEIER *et al.*, (1968) ; BAVER *et al.*, (1972)], et son environnement ionique [PION (1979) ; BLOT (1980) ; TESSIER (1981 et 1984) ; TESSIER et PEDRO (1980) ; HALITIM *et al.*, (1984) ; PEDRO (1984)], influent également sur le comportement d'un matériau considéré, tout en sachant que les propriétés des kaolinites et des oxydes sont différentes de celles des minéraux 2:1.

Cela nous amène donc, à envisager les aspects qualitatifs et quantitatifs de la constitution minéralogique des sols étudiés. A cet effet, nous présenterons successivement :

- des analyses chimiques totales.
- la minéralogie (rayon X et analyses thermiques) des constituants minéraux cristallisés ;
- des données de microscopie electronique à transmission (morphologie, arrangement, composition chimique),
- des mesures de surface spécifique totale des échantillons de sol dans le but d'obtenir des informations sur le degré de division de la phase solide et donc, d'avoir des informations sur la taille des constituants.

A) ANALYSES CHIMIQUES TOTALES.

Les analyses ont été réalisées sur des échantillons de la roche prélevés à proximité du site d'étude et dans les sols sous forêt. Pour ces derniers, les analyses ont été réalisées sur les échantillons prélevés à 150 cm. Dans tous les cas Al et Si

ont été dosés par fluorescence X ; Fe a été mis en solution avec l'acide fluorhydrique et dosé par absorption atomique.

Les résultats ont été exprimés en pourcentages pondéraux d'oxydes par rapport à la fraction < 2mm séchée à 105°C.

1) Analyse chimique de la roche.

Elle permet d'obtenir des informations sur la nature du matériau à partir duquel le sol s'est développé au cours du temps.

Les résultats sont rassemblés dans le tableau II.5.

Tableau II.5 : Analyse totale des éléments majeurs et mineurs des roches des sites étudiés (Cascavel et Palotina).

	Analyse totale (%)							
	Eléments majeurs			Eléments mineurs				
SITES	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	TiO_2
Cascavel	49,0	12,0	18,0	7,8	4,5	1,3	3,0	3,0
Palotina	51,0	13,0	16,0	9,0	5,0	1,3	2,1	3,0

Le site Cascavel est caractérisé par une teneur en SiO_2 de 49%, avec 12 % d'Al_2O_3 et 18 % de Fe_2O_3. En ce qui concerne les éléments mineurs, c'est CaO qui est plus abondant (7,8 %) suivi du MgO (4,5%), Na_2O (3,0%), TiO_2 (3,0%) et le K_2O (1,3%).

Le site Palotina contient un peu plus de SiO_2 que le site de Cascavel (51%) avec 13 % d'Al_2O_3 et 16 % de Fe_2O_3. Pour les éléments mineurs, c'est le CaO qui est plus abondant (9,0%) suivi du MgO (5,0%), Na_2O (2,1%), TiO_2 (3,0%) et le K_2O (1,3%).

2) - Analyse chimique du sol.

Les résultats obtenus pour les deux sols sont rassemblés dans le tableau II.6.

Tableau II.6 : Analyse totale des éléments majeurs et mineurs de l'horizon entre 120 - 150 cm, des sols sous forêt (Cascavel et Palotina).

	Analyse totale (%)							
	Eléments majeurs			Eléments mineurs				(SiO_2 /
SITES	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	Al_2O_3)
Cascavel	28,0	30,0	19,5	0,1	0,3	0,16	0,03	1,58
Palotina	32,5	26,0	21,5	0,2	0,21	0,11	0,03	2,16

Le site de **Cascavel** est caractérisé par des teneurs plus importantes en Al_2O_3 (30 %) avec 28 % de SiO_2 et 19,5 % de Fe_2O_3. Le rapport moléculaire SiO_2 / Al_2O_3 est de 1,58. En ce qui concerne les éléments mineurs, les teneurs sont assez faibles dans l'ensemble. Parmi ces éléments, c'est le potassium le plus abondant (0,16 % de K_2O).

Le site **Palotina** présente des teneurs importantes en SiO_2 (32,5 %) avec 26 % d'Al_2O_3 et 21,5 % de Fe_2O_3 (21,5 %). Le rapport moléculaire SiO_2 / Al_2O_3 est de 2,16. Les teneurs en éléments mineurs sont égalemant assez faibles dans l'ensemble. Parmi ces éléments, ce sont le calcium et le magnésium les plus abondants (0,21 % en moyenne de CaO et le MgO).

Discussion :

Pour comparer les deux sols en terme de dégré d'évolution du sol, nous n'utilisons que les résultats du rapport molaire SiO_2/Al_2O_3, PEDRO (1964 et 1966).

Plus la valeur du rapport SiO_2/Al_2O_3 est petite, plus l'état d'altération des constituants minéraux est important. Ce rapport est théoriquement de 0 pour la gibbsite et de 2 pour la kaolinite.

Les valeurs du rapport SiO_2/Al_2O_3 sont de 1,58 pour le site de Cascavel et de 2,16 pour le site Palotina. Ceci suggère une déstabilisation de la kaolinite et la

présence importante de gibbsite à Cascavel. A Palotina le sol est encore fortement altéré mais moins qu'à Cascavel.

B) ETUDE DE LA NATURE MINERALOGIQUE DES CONSTITUANTS.

1) Méthodologie.

1.1) Principe d'identification.

La diffraction des rayons X permet de déterminer la structure cristalline élémentaire des minéraux des sols [BRINDLEY et BROWN, (1980) ; CAILLERE *et al.*, (1982)]. Nous avons utilisé un diffractomètre muni d'une anticathode de cuivre. Les spectres de diffraction ont été interprétés selon la Loi de Bragg :

$$2 d \sin \theta = n \lambda$$

où : d = distance réticulaire (entre feuillets),
n = ordre de la diffraction,
λ = longueur d'onde de la raie (pour le cuivre, λ = 1 5406 A°),
θ = angle d'incidence du faisceau.

Connaissant les angles θ de réflexion du rayonnement incident, on peut déterminer les distances réticulaires d du réseau cristallin. On utilise généralement les raies principales, caractéristiques des différents minéraux, pour leur identification.

Pour la quantificattion des minéraux nous avons utilisé les analyses thermiques.

1.2) Préparation des échantillons.

Pour ce type d'investigation les échantillons ont été prélevés à 150 cm dans les profils sous forêt et ont été préparés comme indiqué par la suite :

b.1) Afin de déterminer tous les minéraux présents, la méthode des poudres a été utilisée sur des échantillons séchés à l'air, tamisés à 1 mm et broyés très finement.

b.2) Pour mieux caractériser les minéraux argileux on a extrait la fraction < 2 µm. Des dépôts orientés sur lame de verre ont été préparés à partir d'une suspension à 10 g / l. La dispersion des matériaux a été obtenue après traitement aux ultrasons et lavages successifs à l'eau.

b.3) Préparation des basaltes : nous avons prélevé des morceaux de roche basaltique saine à proximité des sites d'étude. Afin de déterminer les minéraux présents, la méthode des poudres a été utilisée sur des échantillons de la roche broyée très finement. La fraction fine a aussi été extraite afin de mettre en évidence la présence d'argiles.

Afin d'interpréter les spectres de diffraction, différents traitements chimiques ont été employés, suivis des divers tests de comportement [ROBERT et TESSIER (1974)]. Les échantillons ont été déferrifiés en utilisant la méthode CDB (MEHRA ET JACKSON, 1960). L'élimination de l'aluminium interfoliaire a été faite par traitement au Citrate à pH 7. Ensuite, les argiles ont été saturées Mg^{2+} et traitées à l'éthylène glycol sous vide (Mg + EG), saturées K^{+} et chauffées à différentes températures (K + 200°C ; K + 400°C et k + 550°C) afin d'identifier les minéraux 2 : 1 présents.

2) Résultats.

2.1) Minéralogie de la roche basaltique.

L'objectif de cette étude est de montrer les relations possibles entre la composition minéralogique et chimique de la roche et celle du sol.

a) Composition minéralogique globale du basalte. Diagrammes de poudre.

Les résultats sont reportés dans la figure II.9.

Les diagrammes de poudre indiquent la présence de quartz avec les raies caractéristiques à 4.24 Å et 3.34 Å. Les autres raies sont essentiellement dues aux feldspaths soit à 3.45 Å, 4.03 Å, 3.89 Å, 3.75 Å, 3.20 Å, 3.01 Å, 2.94 Å, 2.50 Å.

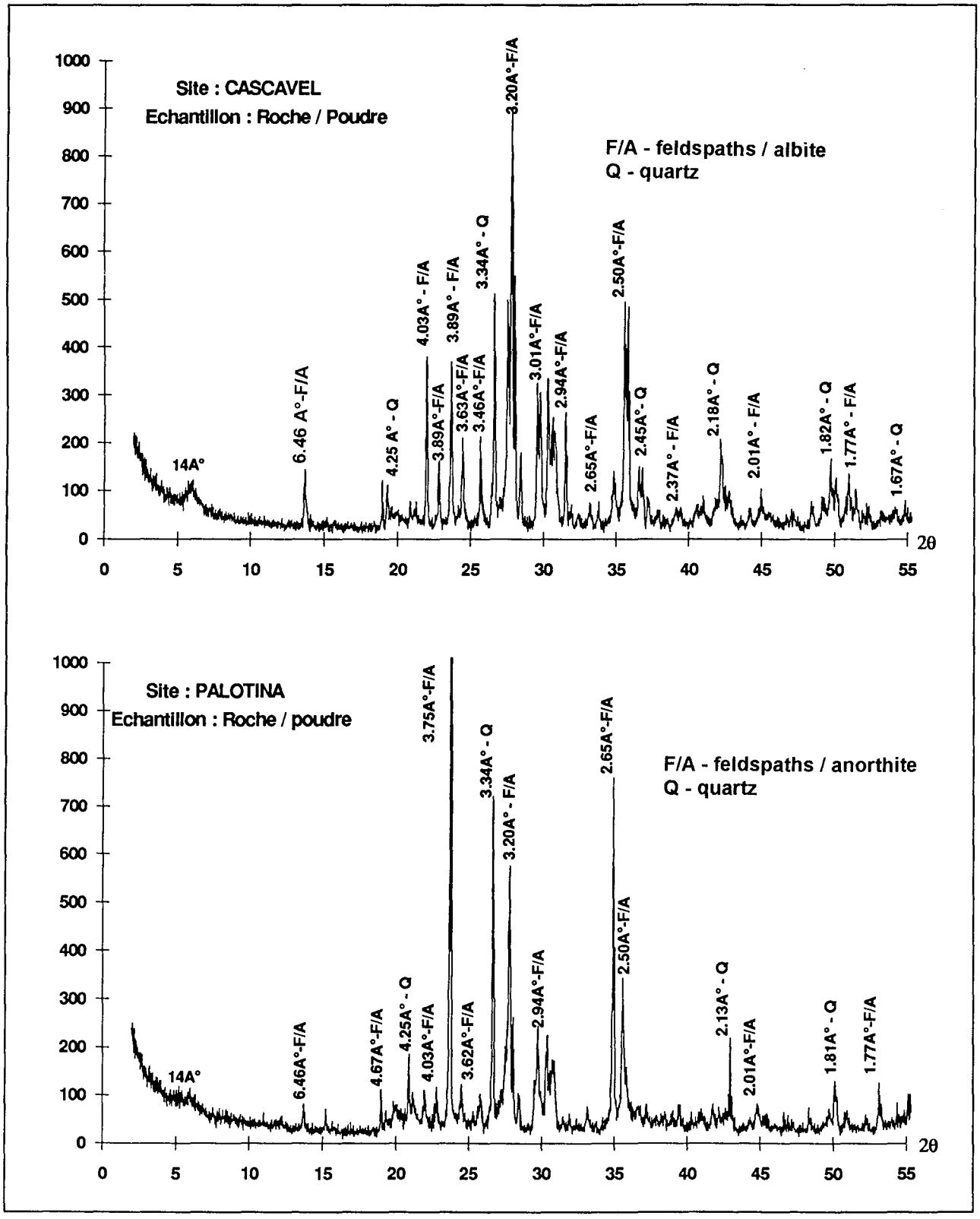


Fig. II.9 : Diagramme de poudre des roches basaltiques des deux sites étudiés (Cascavel et Palotina).

L'identification des raies et leur étude avec le logiciel "diffract AT" permettent de conclure que dans les deux sites nous avons affaire à une roche constituée principalement de feldspaths plus au moins ordonnés, avec une formule du type [(Ca, Na) $(Si_3\ Al)_4O_8$)]. Cependant, dans le site de Cascavel les raies décelées par les rayons X sont plus proches de *l'albite*, et à Palotina elles sont plus caractéristiques de *l'anorthite*, ce qui est en accord avec les rapports Na_2O/CaO respectivement de 0,4 et 0,2 à Cascavel et à Palotina.

Ces résultats de composition minéralogique du basalte sont en accord avec la littérature [CORDANI et VANDOROS (1967) ; CURI (1975) ; LOUGHNAN (1969) ; MELFI et LEVI (1976) ; RESENDE (1976) ; RAUEN (1980) ; SCHNAIDER (1964) ; PICCIRILLO et MELFI (1988)] (*chapitre 1*).

Dans la roche mère on note en outre la présence d'une raie à 14 Å, caractéristique d'un minéral argileux 2:1, sans que la présence de kaolinite puisse être identifiée.

b) Etude de la fraction fine du basalte.

Sur la fraction fine extraite de la roche (Fig. II.10), on note essentiellement la présence d'une raie à 14 Å. La raie passe à 17 Å après traitement à l'ethylène glycol et disparaît après chauffage. Le minéral identifié est donc une smectite. Les diagrammes sont identiques à Palotina et à Cascavel. A Palotina un pic de kaolinite est détecté mais il est très faible.

*** <u>Discussion</u> :**

Il apparaît d'abord que les sols de Cascavel et de Palotina sont développés sur des matériaux basaltiques. Dans le matériau de Cascavel les feldspaths seraient moins riches en calcium. Au départ la roche serait donc un peu plus acide que celle de Palotina.

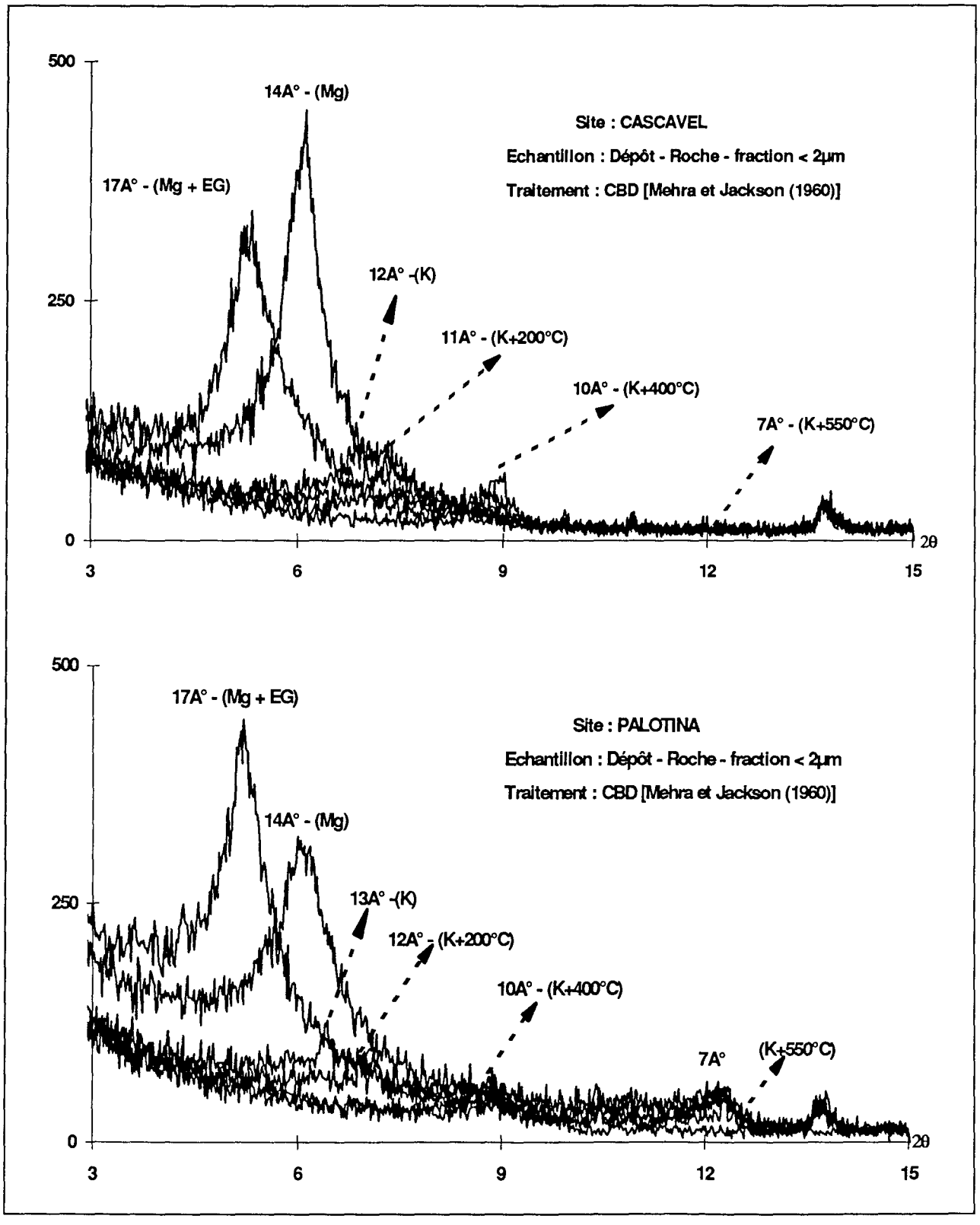


Fig. II.10 : Diagramme de dépôt orienté de la fraction fine des roches basaltiques des deux sites étudiés (Cascavel et Palotina).

Si l'on examine les rapports moléculaires Si / Al et les teneurs en Ca et Na (tableau II.5 - analyse chimique des roches), on vérifie que le rapport Si / Al est de 4 et que la teneur en Ca et Na est différente. Les données obtenues confirment aussi que la roche basaltique que nous avons prélevée est déjà altérée puisqu'on trouve de la smectite en quantité importante dans les deux roches. Les surfaces spécifiques mesurées à l'EGME, qui sont de 30 m^2/g pour la roche totale, vont dans le même sens. Sur la base d'une surface de 750 m^2/g (caractéristique d'une smectite) cela conduit à environ 5% de smectite.

On notera aussi l'absence dans la roche de minéraux caractéristiques des basaltes comme l'olivine et les pyroxènes. La provenance de la smectite est probablement due à l'altération de ces minéraux, les plus altérables.

2.2) Etude des constituants des sols.

a) Composition minéralogique globale du sol.

Les diagrammes de rayons X sur poudre sont donnés dans la figure II.11. Ils indiquent pour les deux profils la présence des minéraux suivants :

- kaolinite (raies 7Å, 4.44Å, 3.56Å, 2.37Å),
- quartz (raies 4.26Å, 3.34Å, 2.45Å),
- maghémite (raies 2.93Å, 2.51Å),
- hématite (raies 3.67Å, 2.69Å, 2.20Å, 1.84Å).
- anathase (raie 3,51Å)

A Cascavel la présence de gibbsite est très importante alors qu'à Palotina elle est non détectable. Les courbes d'ATD (fig. II.12) évaluent à 15 % la teneur en gibbsite à Cascavel contre moins de 1 % à Palotina. Elles indiquent aussi que la teneur en quartz estimée est de 1 % dans les deux sites.

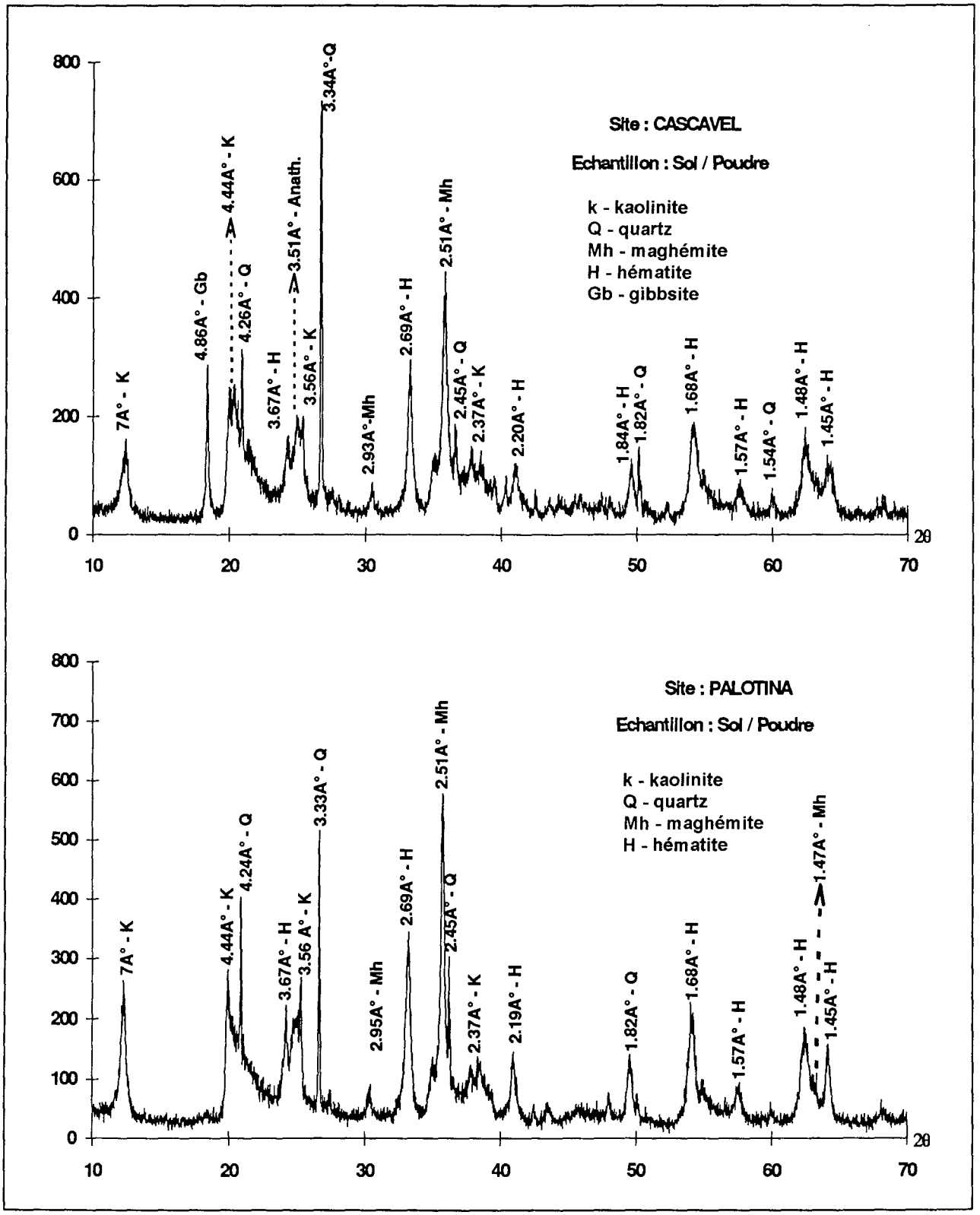


Fig. II.11 : Diagramme de poudre des sols des deux sites étudiés (Cascavel et Palotina).

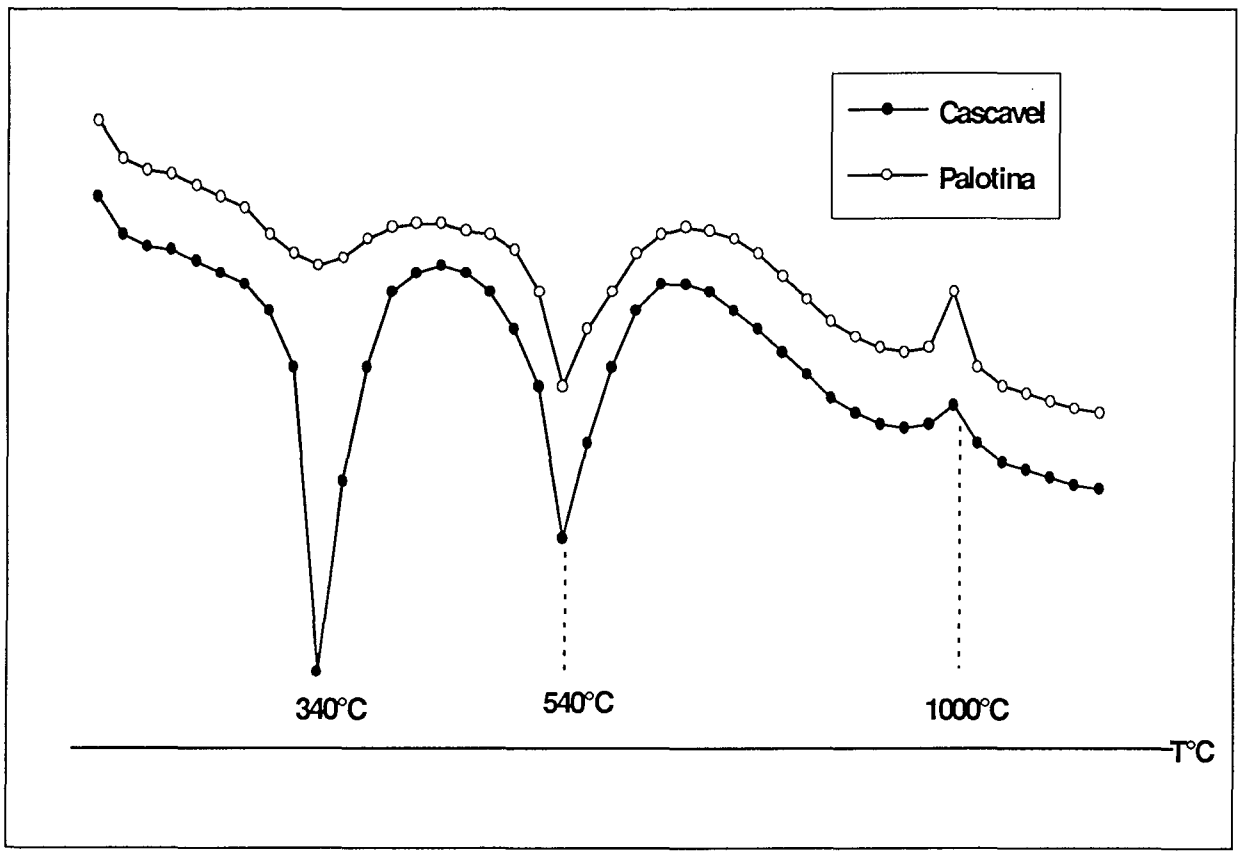


Fig. II.12 : Courbes d'ATD de la fraction < 2µm des sols des deux sites étudiés.

b) Etude de la fraction argile

Elle a été faite sur échantillons orientés sur une plaque de verre (Fig. II.13).

Les diagrammes indiquent que l'argile est composée de kaolinite (7Å) et d'un minéral 2:1 (pic à 14 Å). Les tests de gonflement montrent que le gonflement à l'EG ne se produit pas. L'échange au potassium et le chauffage provoquent un déplacement du pic qui disparaît à 550°C, sauf à Cascavel.

3) Synthèse et discussion.

3.1) Degré d'altération et composition globale des sols.

Pour caractériser le degrée d'altération des sols on peut se référer aux traveaux de DELVAUX *et al.*, (1989). Ainsi on peut déterminer le rapport moleculaire SiO_2/R_2O_3 ($R_2O_3 = Al_2O_3 + Fe_2O_3$)), et le réserve totale en bases (Ca + Mg + Na + K) en méq/100g de sol. On obtient SiO_2/R_2O_3 = 1,12 et 1,38 à Palotina. Ce rapport confirme, mais dans une mesure moindre que SiO_2/Al_2O_3 que Cascavel est plus désilifié que Palotina, et donc plus riche en oxydes.

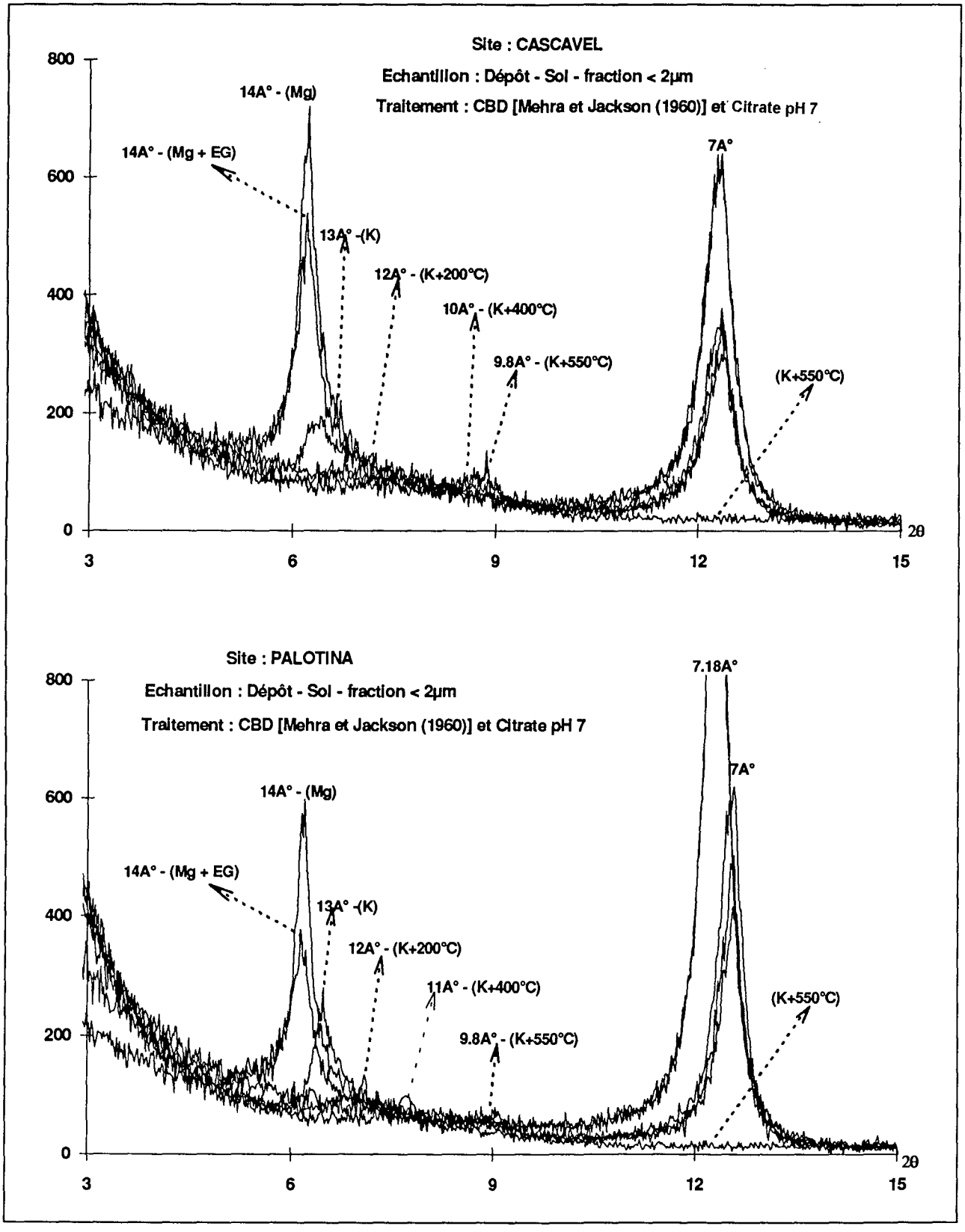


Fig. II.13 : Diagramme de dépôt orienté de la fraction fine des sols des deux sites étudiés (Cascavel et Palotina).

Les valeurs de TRB s'élèvent à 624 et 663 méq/100g roche respectivement pour Cascavel et Palotina (Roche de compositions très similaires, compte tenu des proportions en cations basiques totaux). Pour les sols les valeurs de TRB s'élèvent à 23 et 20 méq/100g sol respectivement pour Cascavel et Palotina. Ces deux sols présentent un degré d'altération identique, caractéristique du domaine de l'altération ferrallitique (généralment TRB < 40 méq/100g sol) HERBILLON, (1989). Le contenu en minéraux altérables est très faible dans les deux cas mais la proportions de minéraux secondaires de types oxydes est plus importante à Cascavel qu'à Palotina (voir SIO_2/Al_2O et SIO_2/R_2O_3). Ceci peut être lié à deux causes possibles :

(1) désilification plus poussée à Cascavel au cours de la pédogenèse en raison d'une géomorphologie plus drainante, ce que suggère une érosion chimique plus intense ;

(2) une dégradation de kaolinites en conditions acides.

Ainsi le dégré d'altération sur la base des valeurs de TRB, % argile et rapport limon/argile serait identique dans les deux sols et la proportion en oxydes est plus importante à Cascavel.

3.2) Evolution des constituants au cours de la pédogenèse

Comme cela a été montré précédemment, depuis la roche initiale basaltique la première transformation minéralogique qui se produit dans le substratum est de toute évidence la genèse de smectites. Cette néogenèse concerne d'abord les minéraux les plus altérables (olivine et pyroxènes) mais ne concerne pas les feldspaths. Nous avons noté que les oxydes de fer ne sont pas identifiés dans la roche initiale. Cela signifie qu'ils ne sont pas présents sous une forme individuelisée.

Dans les sols de Cascavel et de Palotina les feldspaths ont complètement disparu. La pédogenèse affecte donc principalement les felspaths.

Du point de vue minéralogique, la pédogenèse se traduit essentiellement par :

- la présence d'un nouveau minéral abondant, la kaolinite et de vermiculite alumineuse ;
- l'individualisation d'oxydes.

Ceci est en accord avec FASOLO (1978) ; VOLKOFF (1985) et RESENDE (1988), qui ont travaillé sur les sols ferrallitiques du Brésil et ont parlé de la présence de vermiculite alumineuse dans ces sols. Van OORT (1988), en travaillant avec un sol ferrallitique de la Guadeloupe, a aussi trouvé des minéraux 2:1 dans les conditions similaires.

Il est important de souligner que pour les deux sols, malgré les conditions poussés d'altération, des minéraux 2:1 sont toujours présents. Il est donc probable qu'une bonne partie des minéraux 2:1 est héritée d'une première phase d'altération de la roche basaltique. Ensuite, dans les conditions de la pédogenèse, le minéral 2:1 subsiste dans les sols même si par ailleurs il n'a plus les propriétés de la smectite du basalte puisqu'il s'agit plutôt d'une vermiculite.

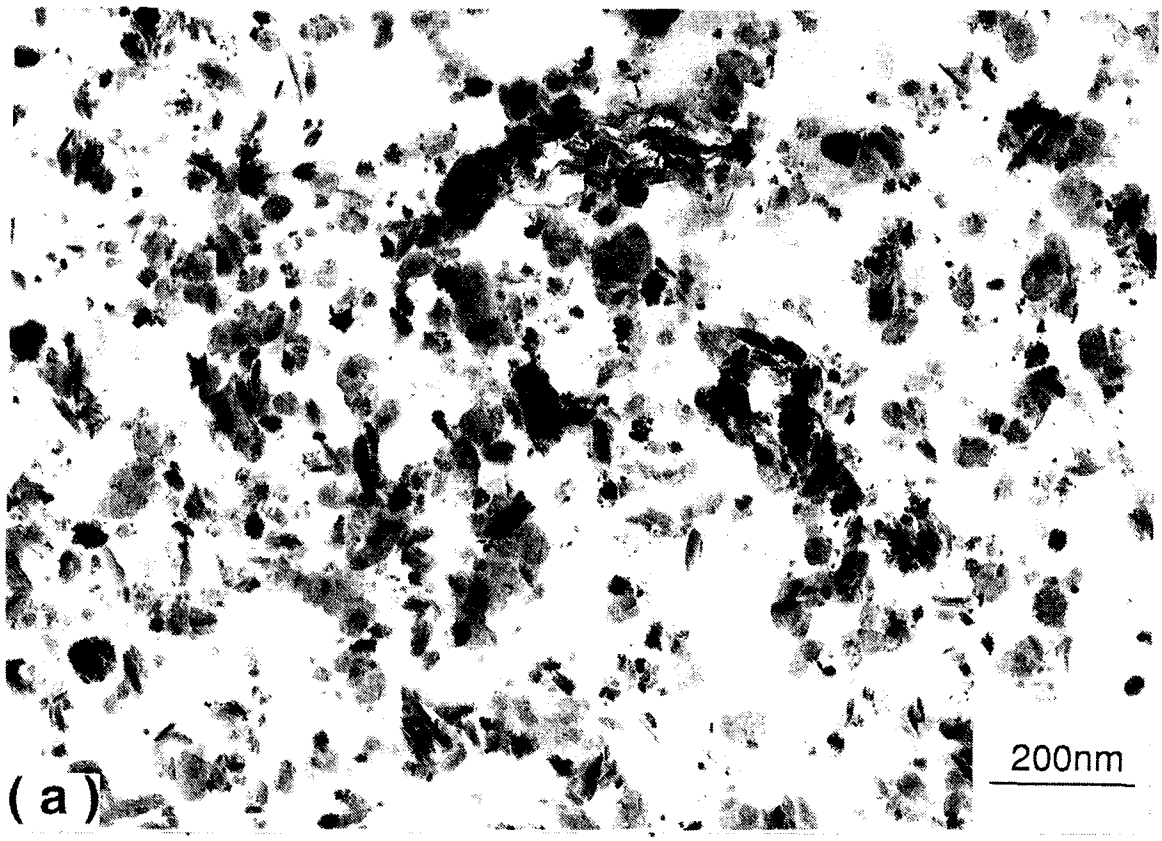
En ce qui concerne la teneur en kaolinite, les données d'ATG montrent que la perte en eau due à la perte des OH du réseau cristallin des feuillets n'excède pas 8,5 % à Palotina et 6,9 % à Cascavel. En admettant que cette perte est principalement due à la kaolinite (13,8%), on ne dépasse pas 60 % de kaolinite dans la fraction < 2µm à Palotina et 50 % à Cascavel. On peut donc conclure que dans les sols étudiés les teneurs en kaolinite représentent environ 50 à 60 % du sol total.

3.3) Taille et nature des constituants

Outre la nature des constituants, leur taille est importante dans le déterminisme de leurs propriétés.

Nous avons effectué les mesures de surface spécifique et des observations au MET (planche II.1) de façon à évaluer la taille des constituants. Nous voyons que les particules argileuses sont beaucoup plus fines à Cascavel qu'à Palotina.

Sur l'argile, après destruction de la matière organique, la surface spécifique (CARTER *et al.*, 1965) est plus faible à Palotina qu'à Cascavel (86 contre 103 m^2/g). Après extraction des amorphes par traitement CDB/citrate, la surface reste quasi constante à Palotina (90 m^2/g) et augmente considérablement à Cascavel (176 m^2/g). Le traitement CDB/citrate permettrait l'accessibilité de certains sites à la molécule d'EGME, qui ne l'étaient pas auparavant.



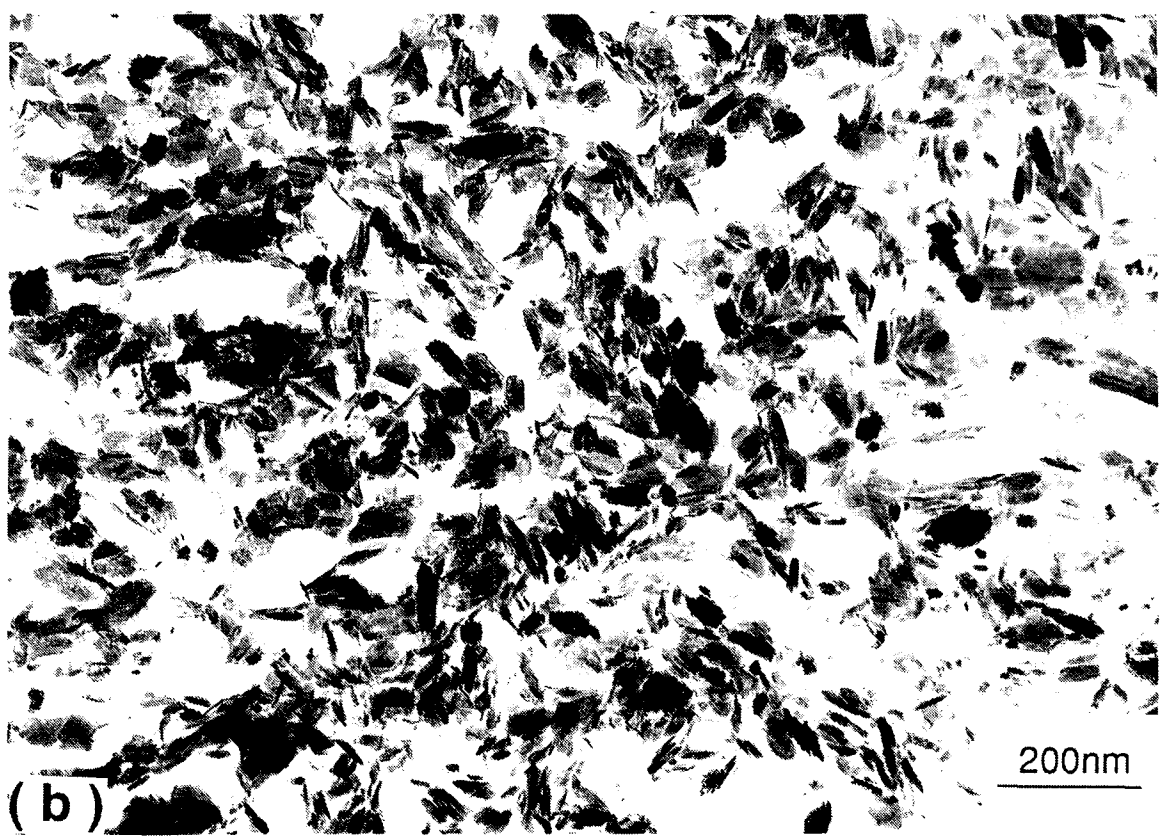


Planche II.1 : Observation au MET de la fraction < 2 µm du sol de Cascavel (a) et de Palotina (b).

Ce dernier résultat est à mettre en parallèle avec les quantités d'aluminium échangeable qui sont très différentes dans les deux cas : élevée à Cascavel et faible à Palotina (tableau II.3). Nous en concluons qu'une bonne partie de la surface accessible après le traitement au CDB / citrate est due à l'accessibilité des espaces interfoliaires des minéraux 2:1 ainsi libérés.

Une partie de l'explication peut être que l'aluminium bloque les espaces interfoliaires. Nous notons cependant qu'après traitement au CDB/citrate le comportement au gonflement n'est pas changé. L'argile 2:1 du sol semble donc avoir un comportement d'intergrade, interprété comme celui des vermiculites hydroxyalumineuses, ce qui est en accord avec la littérature [ROBERT (1968) ; VINCENTE *et al.*, (1977) ; BARNISHEL (1977) ; LASSAUSSE (1991)].

C) SYNTHESE ET CONCLUSIONS.

Nous nous sommes limités dans cette partie à quelques éléments permettant de differencier les sites de Cascavel et de Palotina. Il serait possible de réaliser un travail de caractérisation des constituants beaucoup plus élaboré, par exemple en précisant la nature de l'altération.

Nos données indiquent que les sols contiennent des minéraux 2:1 en proportion non négligeable. Il est difficile d'évaluer avec une grande précision la part des minéraux 2:1 et 1:1 dans les sols, mais la teneur en kaolinite est de l'ordre de 50 à 60%. Les oxydes de fer sont eux de l'ordre de 20 % à Palotina et 14 % à Cascavel. La principale différence entre les profils réside dans la présence de gibbsite à Cascavel (15%). En faisant la somme des oxydes, de la kaolinite et de la gibbsite on arrive à 80 % des constituants dans les deux cas. Ceci laisse supposer une quantité de minéraux 2:1 de l'ordre de 20%, en accord avec les travaux de MOURA FILHO (1970).

D'après les résultats précédents, il semble que c'est avant tout la présence de gibbsite qui traduit le degré d'évolution du sol entre Cascavel et Palotina. Nous en concluons que les deux sols ont du point de vue de leur développement pédologique, des types d'évolution différents.

CHAPITRE 3 :

INFLUENCE DES PRATIQUES CULTURALES SUR L'ORGANISATION DU SOL. EVOLUTION DE LA POROSITE

L'un des objectifs de ce travail étant de relier l'organisation du sol à différentes échelles aux propriétés de rétention d'eau et de retrait, ainsi qu'à la constitution minéralogique des sols, nous allons, dans ce chapitre, étudier leur organisation.

Nous comparerons les situations sous forêt aux sols cultivés en analysant les différentes composantes de l'organisation de la phase solide et des pores.

I) APPROCHE DE L'ORGANISATION DU SOL PAR LA METHODE DU PROFIL CULTURAL.

La méthode du profil cultural [HENIN (1960 et 1969) ; MANICHON (1982)], est fondée sur l'étude de la morphologie du sol. Elle consiste à délimiter des volumes homogénes à partir des critères suivants : forme et taille des éléments structuraux, présence ou absence de pores visibles, continuité des pores, dureté des agrégats et mottes, aptitude à la fracturation.

Elle a été adaptée aux conditions tropicales du Brésil par DERSIGNY *et al.*, (1990) et s'est montrée depuis une méthode de diagnostic particulièrement adaptée à l'étude de l'évolution de la structure des sols sous culture en milieu tropical [GUIMARAES *et al.*, (1993)].

1) Types d'information obtenues à partir de l'approche du profil cultural.

Nous pouvons en particulier :

- mettre en relation des états structuraux observés avec des itinéraires techniques, et ouvrir la voie à la prévision des comportements du sol sous l'action des outils [MANICHON (1982 et 1987) MANICHON *et al.*, (1988) ; COULOMB (1991)] ;

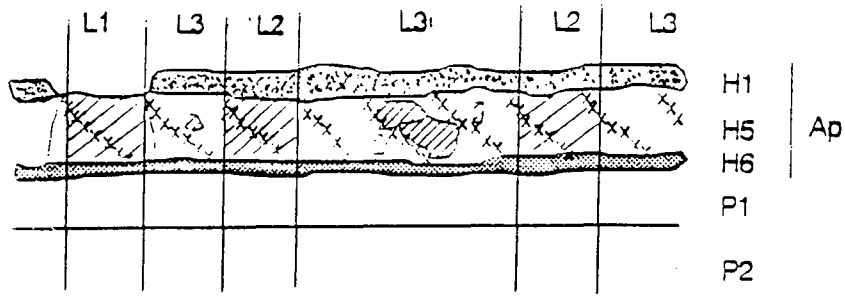
- recommander ou *a contrario* proscrire, certaines pratiques par exemple les outils à disques dans les conditions des sols tropicaux [RALISCH *et al.*, (1991) ; RALISCH *et al.*, (1993) et RALISCH ET GUIMARAES (1994)] ;

- dans certains cas, mettre en relation les propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols et suivre leur évolution dans le temps [MANICHON (1982 et 1987) ; MANICHON et ROGER-ESTRADE (1990) ; COULOMB *et al.*, (1990)].

2) Description de la méthode.

La partition du sol en volumes distincts résulte de la profondeur de travail des outils, mais aussi, latéralement, de la chronologie des passages, de roues sur la parcelle (fig. III.1). La description de chaque compartiment est faite en se référant à

l'état interne des éléments structuraux ou mottes qui est apprécié suivant des critères visuels et tactiles [MANICHON (1982) ; MANICHON et GAUTRONNEAU (1987) ; DERSIGNY *et al.*, (1990) ; COULOMB (1991)],



Nomenclature des différents horizons :

	H0	Surface du sol
Horizon labouré Ap	H1-H4	Horizons de reprise du labour
	H5	Horizon labouré non repris
	H6-H7	Bases d'horizons labourés anciens
	H8	Horizons partiellement ameublis par des outils profonds (sous soleuse)
	P1-P2	Horizons pédologiques

Partition latérale :

L1	Passages de roues après reprise superficielle
L2	Passages de roues avant reprise superficielle
L3	Sans passage de roues durant les travaux préalables à l'implantation de la dernière culture

Fig. III.1 : Partition verticale et horizontale du profil cultural (Manichon, 1982).

Dans notre travail, cette façon de décrire le sol est à la base de nos prélévements d'échantillons afin de tenir compte de la variabilité spatiale locale du sol.

Pour la caractérisation des états internes et des modes d'assemblage nous nous sommes basés sur une nomenclature décrite dans les tableaux III.1 et III.2 [MANICHON (1982) ; MANICHON et GAUTRONNEAU (1987) ; DERSIGNY et *al.* ,(1990) ; COULOMB, (1991) et RALISCH et GUIMARAES (1994)]. Le schéma proposé a été adapté à la morphologie particulière des sols tropicaux de cette région du Brésil.

Tableau III.1 : Classification de l'organisation générale du profil cultural [MANICHON (1982) ; MANICHON et GAUTRONNEAU (1987) ; DERSIGNY et *al.* ,(1990) ; COULOMB, (1991) et RALISCH et GUIMARAES (1994)].

Définition	Symbole	Caractéristiques
Non compacté	O	Présence de petites mottes, ou d'agrégats, sans aucune cohésion. Terre fine et porosité structurale importante due à l'anthropisation et/ou à la faune du sol.
Compacté	C	Pas de porosité structurale ou porosité très peu développée. On ne peut pas individualiser des mottes.
Compacté - Uni	U	Mottes de gros calibre (>10 cm), séparées par des cavités importantes, notamment entre bandes de labours.
Horizon Pedologique	μ	Etat microagrégé ("Poudre de café"). Etat naturel non anthropisé, ou trouvé dans des zones d'activité biologique- Porosité visible très forte - faible cohésion à l'état sec.

Tableau III.2 : Caractéristiques des états internes des mottes au sein des horizons anthropisés [MANICHON (1982) ; MANICHON et GAUTRONNEAU (1987) ; DERSIGNY et *al.* ,(1990) ; COULOMB, (1991) et RALISCH et GUIMARAES (1994)].

Définition	Symbole	Principales Caractéristiques
Etat Très Compact	Δ	Aspect continu - Faces de fragmentation peu rugueuses de forme conchoïdale, Porosité visible à l'oeil absente. Cohésion à sec très élevée.
Etat plus ou moins Compact	Δμ ou Δbis	Aspect "proche de Δ", mais cassure légèrement différente et porosité visible qui varie de légère à faible. Cohésion à l'état sec élevée.
Etat compact fissuré.	Φ ou Δfissuré	Issu de Δ et Δμ avec amorces de fissures sous l'action d'une fragmentation. Porosité fissurale visible. Normalement trouvé en "surface" où les variations de température et d'humidité favorisent les phénomènes de retrait et gonflement. Cohésion à l'état sec moyenne.

3) Echantillonnage.

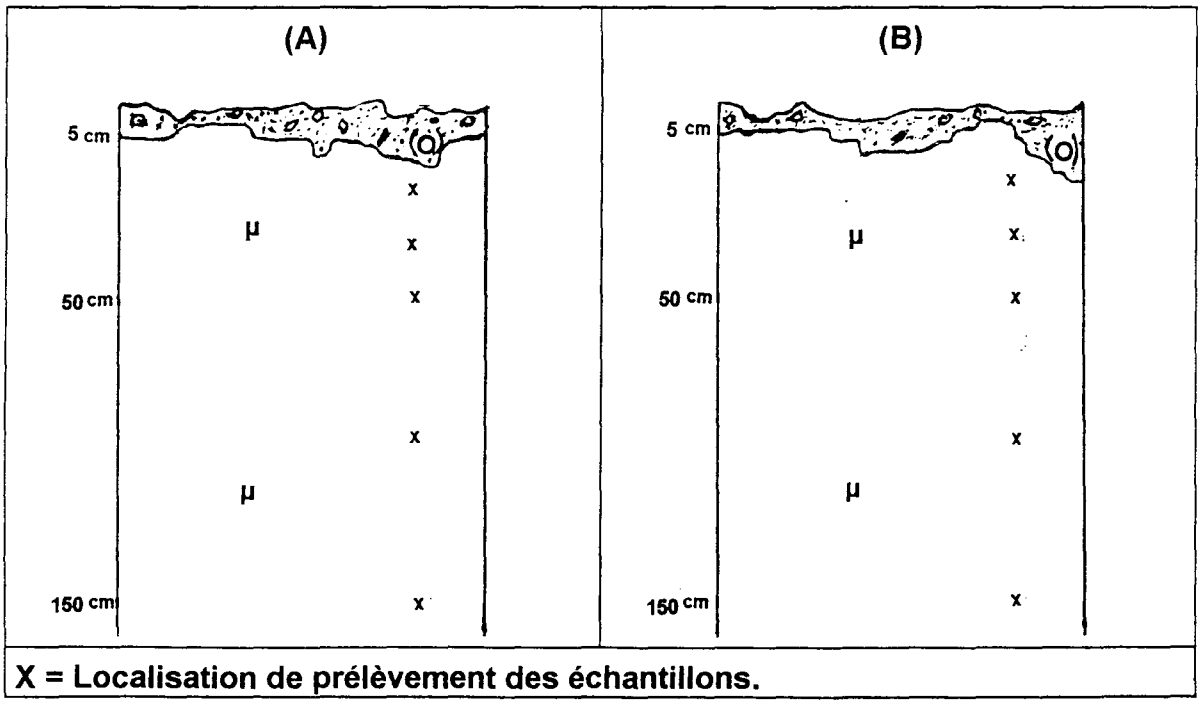
3.1) Etude des profils culturaux.

A l'échelle du profil cultural différentes organisations peuvent être mises en évidence. A partir des définitions données aux tableau III.1 et III.2, les profils culturaux ont été décrits comme suit.

a) Profil sous forêt - (Fig III.2) :

Sous forêt en surface, on observe l'état naturel non compacté (O) dans les deux sols. La structure microagrégée (μ) est présente jusqu'à 1,50 m. Parfois des organisations analogues à celles de la surface (O) sont présents en profondeur. Elles sont attribuées à l'activité biologique.

Nous avons prélevé des échantillons (blocs de sol faisaient environ 5 kg) à structure conservée jusqu'à 1,50 m comme indiqué sur la figure III.2. Leur humidité de départ a été maintenue pour l'étude de l'évolution des propriétés physiques.



X = Localisation de prélèvement des échantillons.

Fig. III.2 : Représentation schématique des profil culturaux des sols sous forêt des sites de Cascavel (A) et Palotina (B).

b) Profil du sol travaille à la charrue à soc - (Fig. III.3) :

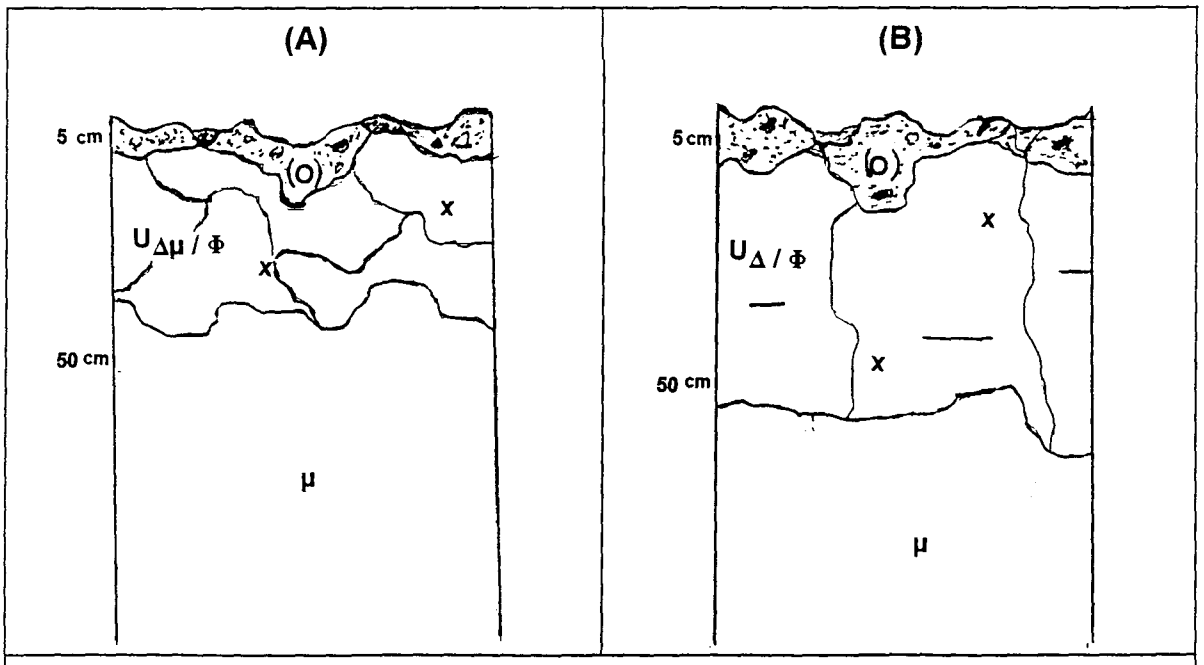
La surface du sol est irrégulière du fait du travail du sol avec la charrue à soc. On observe, comme pour le sol sous forêt une couche en surface (O) de 0 à 8 cm, non compactée, constituée surtout de mottes de tailles très différentes et de terre fine.

En dessous suivant les situations, les sols sont très différents :

à Cascavel des mottes de tailles très étalée et avec un tassement moindre (mottes $\Delta\mu/\Phi$) sont visibles. Le système de fissures est largement isotrope.

à Palotina les mottes sont beaucoup plus tassées qu'à Cascavel (mottes Δ/Φ), elles sont très dures. Le système de fissures est vertical.

Nous avons prélevé des échantillons (blocs de sol faisaient environ 5 kg) à structure conservé entre 5 et 45 cm, comme indiqué sur la figure III.3. Leur humidité de départ a été maintenue pour l'étude de l'évolution des propriétés physiques.



X = Localisation de prélèvement des échantillons.

Fig. III.3 : Représentation schématique des profil culturaux des sols sous charrue à soc des sites de Cascavel (A) et Palotina (B).

c) Profil de sol soumis au semis direct - (Fig. III.4) :

La surface du sol est régulière et on observe, comme pour le sol sous forêt, une couche en surface (O) de 0 à 4 cm, non compactée constituée surtout de mottes de tailles très différentes et de terre fine.

En dessous, suivant les situations les sols sont très différents :

à Cascavel l'horizon (5 - 40 cm) est compact ($C_{\Delta\mu}$), sans discontinuité macroscopique jusqu'à 40 cm. Des microagrégats sont encore visibles ;

à Palotina le sol est compacté (C_{Δ}) jusqu'à 50 cm de profondeur. Aucune discontinuité macroscopique n'est visible et on ne peut plus distinguer les agrégats. Cependant l'activité biologique (galeries d'animaux) est présente.

Nous avons prélevé des échantillons (blocs de sol faisaient environ 5 kg) à structure conservé entre 5 et 45 cm, comme indiqué sur la figure III.4. Leur humidité de départ a été maintenue pour l'étude de l'évolution des propriétés physiques.

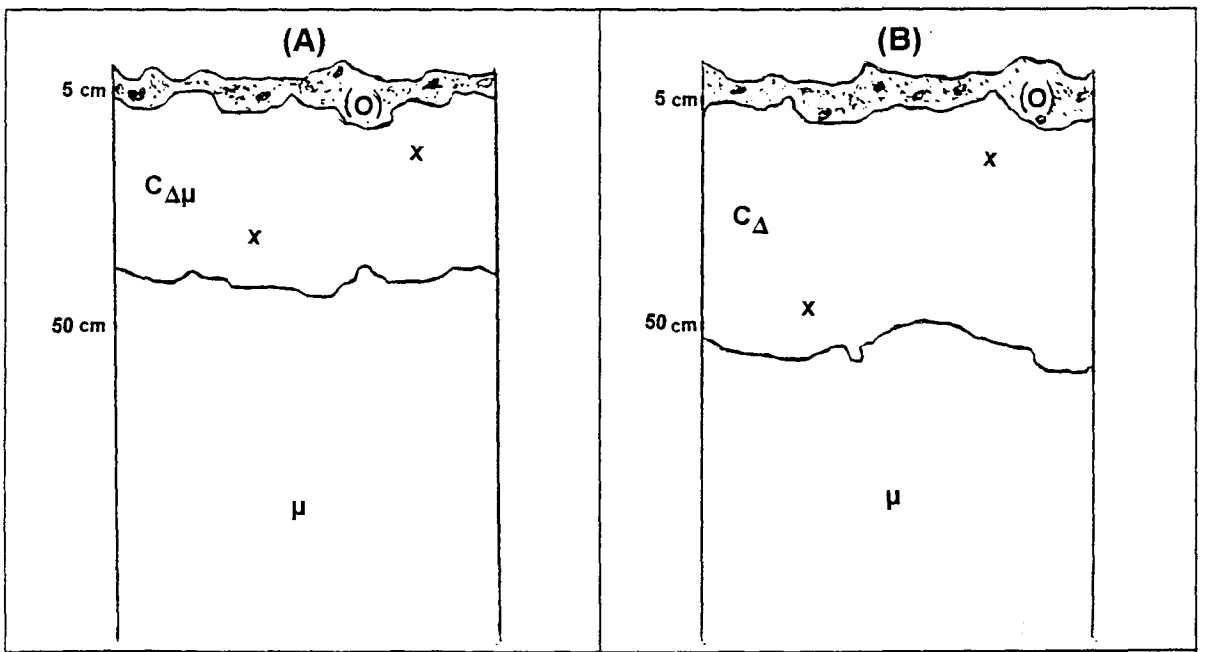


Fig.III.4 : Représentation schématique des profils culturaux des sols sous semis direct des sites de Cascavel (A) et Palotina (B).

3.2) Discussion .

a) Comparaison des sols sous forêt.

Il apparaît d'abord que les profils sous forêt sont assez uniformes quant à leur structure (μ), et ce, sur toute leur épaisseur, mais il nous semble que la structure dans les horizons profonds (> 60 cm) est typique des "Latosolos" à Cascavel, ce n'est pas tout à fait le cas du sol de Palotina qui semble plus compact.

Ceci va de pair, à Palotina avec l'apparition entre 90 et 150 cm d'une certaine "sérosité" des faces structural (§ I.6). Il a été montré que la sérosité, c'est-à-dire aspect luisant, est un bon indicateur de la présence de "Terra Roxa estruturada (TRe)" (Paleudalf de la Soil Taxonomy ou Eutric Phaeozems de la Légende FAO). Dans ce cas, certains auteurs ont été amenés à exclure la présence d'un "Latosolo Roxo" dans leur identification de ce type de sol (OLIVEIRA *et al.*, 1992). Si on voulait le faire, il faudrait dans notre cas, pouvoir différencier les sols sur la base d'un certain lessivage des argiles en profondeur. A Palotina on aurait dans ce cas la présence d'un horizon B textural *avec un gradient textural B/A > 1.5.* Dans ce cas de figure, les structures en bloc devraient présenter un caractère prismatique avec une forte sérosité, or ce n'est pas le cas ici. On ne peut donc parler ici de veritable "Terra Roxa estruturada" car, même avec une certaine sérosité, on retrouve une structure très proche de celle caractéristique des *horizons B latosoliques*, c'est-à-dire la structure en "poudre de café" (PEDRO *et al.*, (1976).

b) Comparaison des sols cultivés.

D'une façon générale les zones compactées sont toujours plus profondes et plus étendues à Palotina qu'à Cascavel, et l'organisation générale des profils culturaux étudiés semble être en relation avec le type de pratique culturale dans les deux sites, c'est-à-dire une organisation U pour la charrue à soc et une organisation C pour le semis direct.

Pour ce qui est de l'état interne des mottes :

- ***à Palotina***, l'examen du profil cultural après mise en culture pendant 20 ans environ, met en évidence une évolution considérable de la compacité de sol avec prédominance de mottes très compactes de type delta (Δ), et ce, pour les deux pratiques culturales prises en compte ici. De toute évidence, c'est sous le profil

soumis au semis direct que le sol est le plus tassé. On note la disparition d'une bonne partie de la porosité visible à l'oeil et une augmentation de la dureté du sol détectable au couteau ;

- ***à Cascavel*** cependant, les mottes ($\Delta\mu$) sont moins denses qu'à Palotina et des fissures sont encore présentes dans le sol cultivé. Sous semis direct aussi bien qu'après labour, l'activité biologique est moindre à Cascavel qu'à Palotina.

4.3) Conclusion.

Au total, les profils sous forêt des deux sites apparaissent morphologiquement assez proches l'un de l'autre, et présentent des structures micro agrégées (μ), sans variation importante au sein du profil.

Après leur mise en valeur, la morphologie des sols, au niveau macroscopique est assez différente. Le tassement du sol est en effet plus évident à Palotina. C'est avec le semis direct que l'ensemble du profil cultural devient fortement compacté et homogène, indiquant une forte dégradation physique en particulier à Palotina .

II) ANALYSE DE LA POROSITE DES HORIZONS TRAVAILLES.

La porosité étant une conséquence directe de l'organisation des matériaux pédologiques, elle reste un des meilleurs paramètres quantitatifs pour révéler et évaluer des phénomènes de dégradation structurale. Comme elle dépend des propriétés intrinsèques et extrinsèques du sol et de son environnement, elle est susceptible d'évoluer dans l'espace et dans le temps (KILASARA, 1989).

1) Principe des mesures

De nombreux travaux ont montré que le travail du sol affecte préférentiellement la porosité structurale, c'est à dire la porosité assurant pour l'essentiel la circulation rapide de l'eau et de l'air, ainsi que la pénétration des racines [BOONE *et al.*, (1976) ; STENGEL (1976) ; GANTZER et BLAKE (1978)]. Il s'agit ici d'analyser l'évolution des propriétés des sols à partir d'une analyse quantitative de la porosité. A cet effet, nous étudierons la porosité des horizons à partir de blocs (~300 cm^3) et de mottes (5 à 10 cm^3 environ).

Ainsi, en comparant la porosité de fragments de sol de taille variable, on peut mettre en évidence des évolutions de la porosité associées à des organisations d'échelle supérieure à celle de la motte. En outre, l'étude des mottes soumises au différents potentiel d'eau permet de distinguer différents types de pores (taille maximale des pores ramplis d'eau).

2) Modalités pratiques

Les échantillons ont été prélevés dans l'horizon le plus sujet au tassement, c'est-à-dire entre 5 et 40 cm, des profils sous forêt, sous charrue à soc et après semis direct.

Sur les ***échantillons de 300 cm^3***, la détermination des indices de vides a été faite en utilisant la méthode développée par MONNIER *et al.*, (1973). A cet effet, les échantillons ont été immergés dans du kérosène pendant 24 heures. On a ensuite mesuré la poussée d'Archimède provoquée par l'échantillon dans le kérosène. De ces mesures on a pu déduire le volume apparent des blocs et après passage à l'étuve à 105°C, pendant 24 heures, la masse de terre sèche.

Des ***mottes de 5 à 10 cm³*** ont été portées à un potentiel de l'eau de -10 kPa *(pF=2 - taille maximale des pores remplis d'eau est de* ***~ 15 µm****)*, en utilisant le dispositif de filtration mis au point par TESSIER et BERRIER (1979).

Cette valeur du potentiel de l'eau est souvent considérée comme étant un bon indicateur de l'eau occupant la microporosité, et permet donc de distinguer la macroporosité de la microporosité [GROHMANN (1960) ; OLIVEIRA *et al.*, (1968)]. D'après FERREIRA et MARCOS (1983), la teneur en eau à -10 kPa se rapproche de la capacité au champ. Cet ordre de grandeur du potentiel de l'eau à la capacité au champ est aussi en accord avec d'autres résultats de la littérature obtenus sur des échantillons non remaniés [HALL *et al.*, (1977) ; BRUAND *et al.*, (1988)]

Dans ce qui suit les résultats relatifs à la porosité seront exprimés par rapport à une référence qui est le volume de la phase solide. Ceci permet de comparer des matériaux dont la masse volumique de la phase solide est différente, notamment du fait de leurs teneurs en fer et en matières organiques. Ainsi, pour exprimer le volume de pores du sol, on utilise ***l'indice de vides, soit :***

$$(e = Vv / Vs),$$

Pour le volume de pores occupé par l'eau on utilise ***l'indice d'eau, soit :***

$$(\theta = Vw / Vs) \text{ et,}$$

pour l'air ***l'indice d'air, soit :***

$$(a = Va / Vs).$$

Par la suite chaque résultat est au moins la moyenne de 5 répétitions. A chaque fois les coefficients de variation ont été calculés. Pour comparer les résultats nous utiliserons le test de la plus petite différence significative entre les moyennes (DAGNELIE, 1969).

3) Résultats.

3.1) Porosité des blocs (300 - 500 cm³).

Les résultats des indices de vides, moyenne de 5 répétitions, sont rassemblés dans le tableau III.3 et sur le figure III.5.

Sous forêt on passe de 1,72 à Cascavel à 1.58 à Palotina. On constate que l'indice de vides est toujours supérieur à Cascavel qu'à Palotina.

La comparaison des sols sous forêt, charrue à soc et semis direct indique qu'on passe de 1.72 à 1.48 à 1.43 d'une part, et de 1.58 à 1.19 à 0.99 respectivement pour Cascavel et pour Palotina.

Tableau III.3 : Indice de vides des volumes de sol de 300 - 500 cm^3 des deux sites étudiés (horizons 5 - 40 cm).

Indice de vides (volume de 300 - 500 cm^3).				
Profils.	Site Cascavel.		Site Palotina.	
	Moyenne.	C.V.(%)	Moyenne.	C.V.(%)
Forêt	1,72	9	1,58	5
C. à soc	1,48	9	1,19	9
S. direct	1,43	12	0,99	7

Le test statistique (PPDS), montre que :

- les deux sols sous forêt ne sont pas significativement différents au seuil de 5% ;

- à Cascavel comme à Palotina, les indices de vides entre d'une part les sols mis en culture (charrue à soc et semis direct), et d'autre part les sols sous forêt sont toujours significativement différents au seuil de 5% ;

- pour le site de Cascavel, il n'y a pas de différence significative, au seuil de 5 %, pour les indices de vides entre le semis direct et la charrue à soc, alors que pour Palotina les indices de vides sont significativement différents.

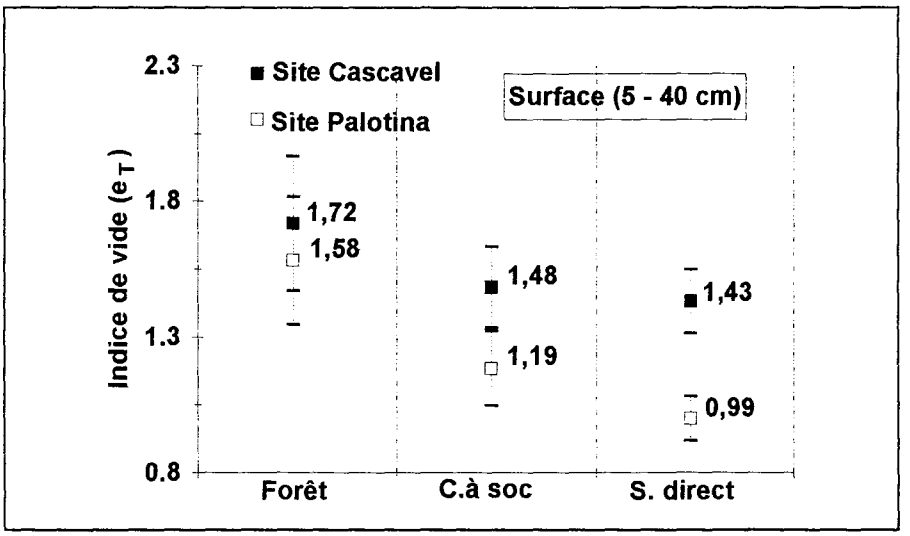


Fig. III.5 : Variation de l'indice des vides total (e_T) pour un volume de sol donné (300 - 500 cm3) pour les deux sites étudiés.

3.2) Porosité des mottes (e), (5 - 10 cm^3).

Les résultats sont rassemblés dans tableau III.4 et sur la figure III.6.

Tableau III.4 : Indice de vides déterminé sur motte de 5 - 10 cm^3 des deux sites étudiés (horizon 5 - 40 cm).

Indice de vides (sur mottes de 5 - 10 cm^3).				
Profils.	Site Cascavel.		Site Palotina.	
	Moyenne.	C.V.(%)	Moyenne.	C.V.(%)
Forêt	1,40	8	1,33	3
C. à soc	1,33	8	1,06	8
S. direct	1,30	5	0,89	8

Sous forêt l'indice de vides est toujours supérieur à Cascavel par rapport à Palotina (respectivement 1,40 et 1,33). Ceci vient confirmer les données obtenues sur des échantillons de 300 cm^3.

En revanche, on constate que le tassement est beaucoup plus grand à Palotina qu'à Cascavel, puisque les écarts d'indice de vides, par rapport à la forêt, sont de 0,27 avec la charrue à soc et de 0,41 sous semis direct. Ils sont respectivement 0,07 et 0,10 pour le site de Cascavel. Ces différences sont significatives au seuil de 5 %.

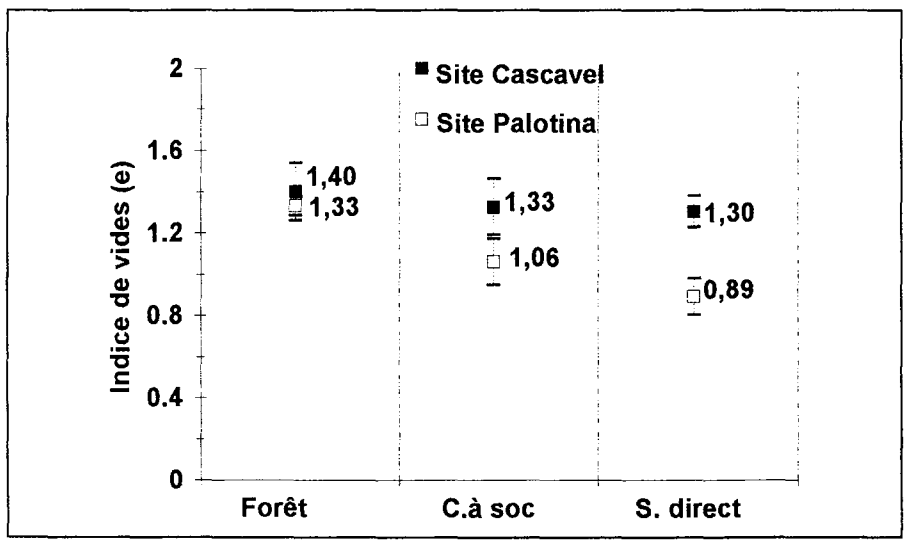


Fig. III.6 : Variation de l'indice des vides à pF = 2 pour un volume de sol donné (5 - 10 cm^3) pour les deux sites.

3.3) Rétention de l'eau à -10 kPa (pF=2) (volume des pores < 15µm).

Les résultats sont rassemblés dans le tableau III.5 et sur la figure III.7.

Tableau III.5 : Indice d'eau des volumes de sol entre 5 - 10 cm^3 des deux sites étudiés (horizon de 5 - 40 cm).

Indice d'eau - (mottes de 5 - 10 cm^3).				
Profils.	Site Cascavel.		Site Palotina.	
	Moyenne.	C.V.(%)	Moyenne.	C.V.(%)
Forêt	0,95	7	0,87	9
C. à soc	0,92	10	0,76	21
S. direct	0,99	8	0,80	10

L'indice d'eau à pF=2 est toujours supérieur à Cascavel, quelle que soit la situation (forêt ou parcelle cultivée).

Nous avons en outre vérifié qu'à Palotina les indices d'eau (volume poral < 15 µm) entre les sols mis en culture (charrue à soc et semis direct) et le sol sous forêt sont toujours significativement différents au seuil de 5%, ce qui n'est pas le cas pour le site de Cascavel. Pour les deux sites étudiés en revanche, les différences d'indice d'eau (volume poral < 15 µm) entre le semis direct et la charrue à soc ne sont pas significatives au seuil de 5%.

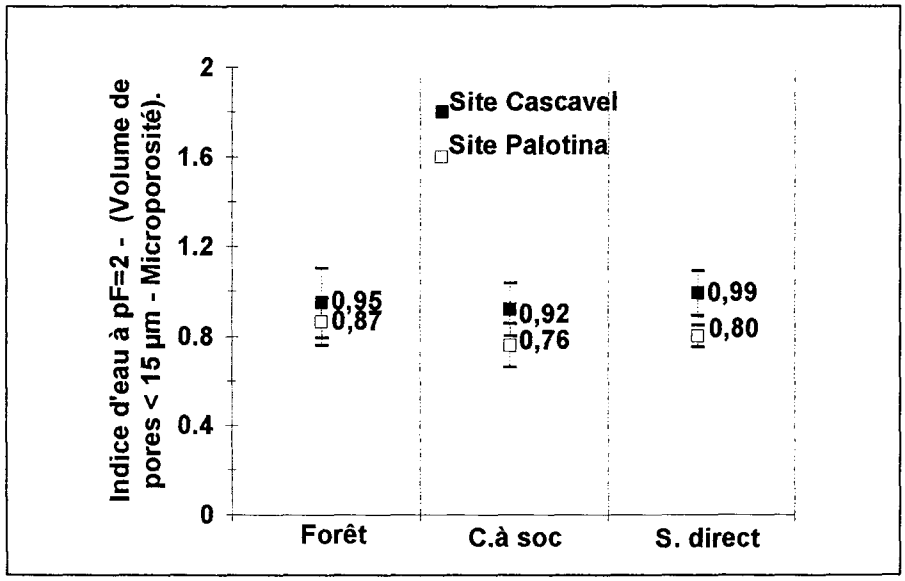


Fig. III.7 : Indice d'eau à pF=2 pour un volume de sol donné (5 - 10 cm3) pour les deux sites. Caractérisation du volume des pores < 15 µm.

4) Discussion.

A partir des résultats précédents relatifs aux mesures d'indice de vide sur des échantillons de différentes tailles et de l'occupation par l'eau à pF=2, il est possible de discuter de la répartition de la porosité des sols.

4.1) Evolution de l'indice de vide inter-mottes (e_T-e).

Nous savons que la porosité inter-mottes c'est-à-dire la différence entre l'indice de vides des fragments de 300 - 500 cm^3 et des mottes (~10 cm^3) est la première à être affectée par la compaction des sols. Le tableau III.6 et la Figure III.8, montrent l'évolution de cette porosité dans les deux sites étudiés.

Tableau III.6 : Evolution de l'indice de vide inter-mottes des deux sites étudies.

Indice de vide inter-mottes (e_T-e)		
----------	Site de Cascavel	Site de Palotina
Forêt :	0,32	0,25
Charrue à soc :	0,15	0,13
Semis direct :	0,13	0,10

La porosité inter-mottes (*"macropores* = chenaux / cavités") est toujours plus importante dans le site de Cascavel, quels que soient les traitements considérés. Elle représente en moyenne 10% du volume total du sol dans le site de Cascavel contre 7 % dans le site de Palotina. Nous retrouvons ici les résultats de FERREIRA, (1988), qui a montré que, plus les sols sont riches en gibbsite, plus la porosité devient importante avec des *"grands pores"*.

Dans les deux sites, une fois les sols travaillés, une réduction de la porosité inter-mottes se vérifie. On constate aussi que c'est pour les profils sous semis direct que les valeurs de la porosité inter-mottes sont les plus basses.

Ceci confirme nos observations sur l'effet plus marqué du semis direct sur la porosité du sol. Rappelons que l'analyse des profils culturaux sur place, nous a montré que c'est le site de Palotina qui est le moins poreux, donc le plus tassé, avec une prédominance des horizons CΔ. Nous sommes aussi en accord avec [PIDGEON et SOANE (1977) ; PAGLIAI *et al.,* (1983) ; OLIVEIRA *et al.,* (1990a et 1990c], lesquels

ont montré que le semis direct (*pratique culturale de conservation*), réduit la porosité des sols (surtout la macroporosité).

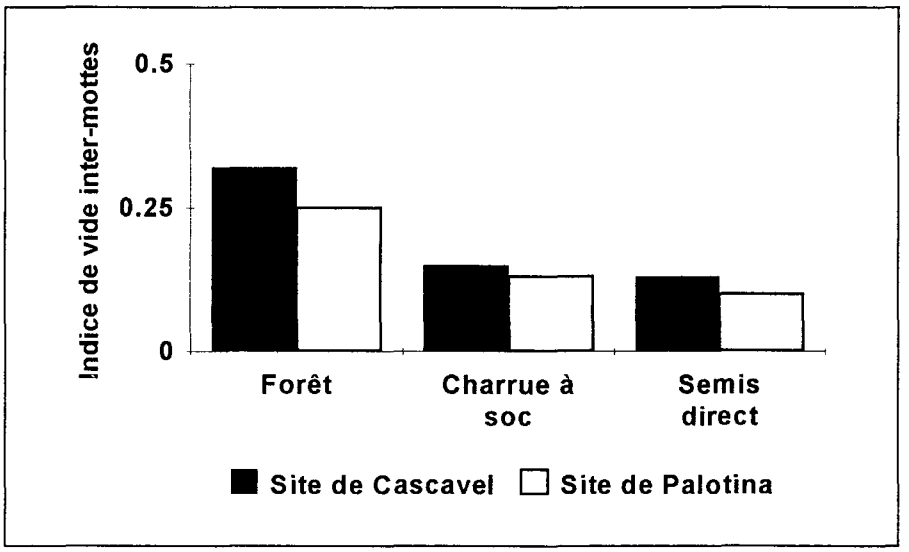


Fig. III.8 : Evolution de l'indice de vide inter-mottes des sites de Cascavel et Palotina.

4.2) Evolution de l'indice d'air à pF=2 (porosité > 15 µm).

Les résultats sont présentés au tableau III. 7 et sur la figure III.9.

Tableau III.7 : Indice d'air des volumes de sol entre 5 - 10 cm^3 des deux sites étudiés.

Indice d'air - (mottes de 5 - 10 cm^3).				
Profils.	Site Cascavel.		Site Palotina.	
	Moyenne.	C.V.(%)	Moyenne.	C.V.(%)
Forêt	0,45	26	0,47	12
C. à soc	0,41	20	0,30	20
S. direct	0,31	22	0,09	22

Les valeurs de l'indice d'air (pores > 15 µm) ont été établies à partir des mesures sur mottes à pF=2. Les valeurs de (a) sont toujours supérieurs à Cascavel quelle que soit la situation considérée par rapport à Palotina.

Les résultats précédents sont confirmés : la mise en culture conduit à une compaction (réduction des pores > 15 µm), mais l'effet de cette compaction est bien moindre à Cascavel qu'à Palotina. Ainsi c'est toujours le semis direct qui provoque la

réduction la plus importante de la macroporosité quelle que soit l'échelle considérée. Nous retrouvons ici les résultats de BOONE *et al.*, (1976) et DERDOUR *et al.*, (1993), lesquels ont montré que le semis direct a un effet plus marqué sur la réduction de la porosité totale du sol que le labour.

Par contre, en ce qui concerne le labour à la charrue à soc nos résultats sont en accord avec ceux de CARTER (1988) , MACKIE-DAWSON *et al.*, (1989), qui ont montré que l'effet de ce labour sur la porosité est un peu plus positif.

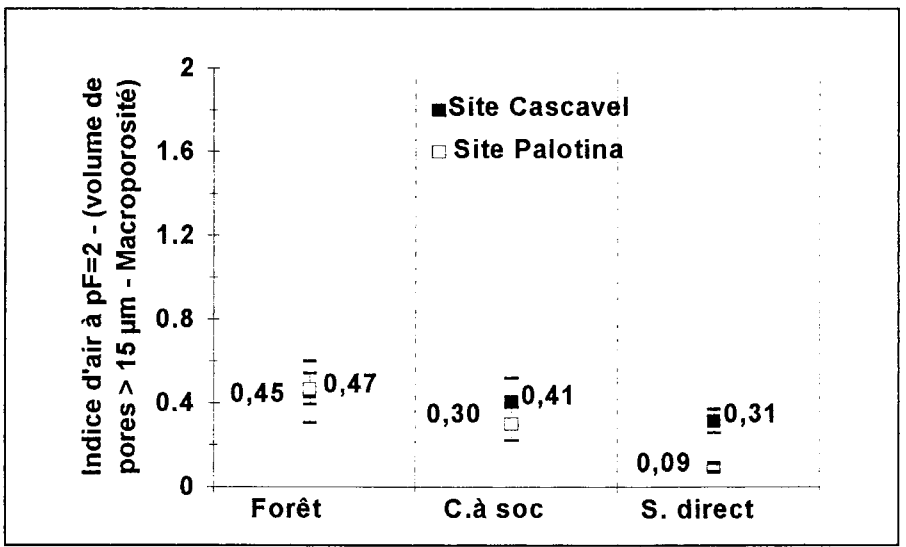


Fig. III.9 : Indice d'air à pF=2 sur mottes de 5 à 10 cm³ pour les sites de Cascavel et Palotina.

Que l'on considère l'indice de vide total (e_T) ou l'indice de vide de mottes à pF=2 (e), c'est toujours le site avec des caractéristiques physico-chimique et minéralogique des sols les plus évolués (plus altérés, donc beaucoup plus riche en gibbsite) qui se compacte le moins, quelle que soit l'échelle considérée.

Nous sommes ici en accord avec FERREIRA (1988) qui a travaillé sur des sols ferrallitiques du Brésil, plus ou moins riches oxydes de fer et d'aluminium, et a montré une corrélation assez importante entre la structure granulaire, l'augmentation de la porosité et de la perméabilité de ces sols et la présence de gibbsite. Selon l'auteur, l'aluminium a plus d'influence sur les propriétés physiques des sols que le fer.

Des deux sites étudiés, c'est le plus acide, le plus riche en aluminium échangeable et le plus riche en gibbsite qui se compacte le moins, donc reste le plus poreux.

4.3) Evolution de la micro-porosité.

Dans les paragraphes précédents, nous avons pu montrer l'effet de la mise en culture des sols sur la porosité, surtout la macro-porosité (pores > 15 µm).

La question que nous sommes posée, est de savoir si les pores < 15 µm, que nous appellerons ici de micro-pores, sont aussi affectés par la mise en valeur des sols.

Nous avons comparé les indices d'eau des mottes **(Θ)** des différents traitements **(F=forêt, CS=charrue à soc et SD= semis direct)** de chaque site, en utilisant le test statistique de la plus petite différence significative (PPDS) au niveau de 5%. Les résultats sont présentés de manière synthétique dans le tableau ci-dessous :

Pour le site de Cascavel :	Pour le site de Palotina
ΘF = ΘCS =ΘSD	ΘF > [ΘCS = ΘSD]

Il apparaît qu'au niveau du site de Cascavel il n'y a pas de différence significative au seuil de 5 % entre les indices d'eau (Θ) des différentes situations, car ils sont statistiquement égaux. Ce n'est pas le cas pour le site de Palotina où, une fois mise en valeur, le sol présente une diminution des pores de volume < 15 µm. Ces résultats sont en désaccord avec ceux d'OLIVEIRA *et al.*, (1990a et 1990c) qui observent une augmentation de la "micro-porosité" après la mise en valeur du sol.

5) <u>Conclusion</u>.

• Les mesures confirment et précisent les données du profil cultural. Elles permettent de mettre en évidence différents types de porosité qui peuvent être associés à la classification adoptée pour la description du profil cultural.

• La mise en culture, quelle que que soit la pratique, conduit à une compaction. Mais l'effet de la compaction est bien moindre à Cascavel qu'à Palotina puisque les sols cultivés de Cascavel sont pratiquement aussi poreux que le sol sous forêt de Palotina (Fig. III.10).

• La mise en culture provoque toujours un tassement et l'intensité du tassement dépend de la pratique culturale et du type de sol. Le choix d'une pratique doit donc se faire avec une connaissance du sol.

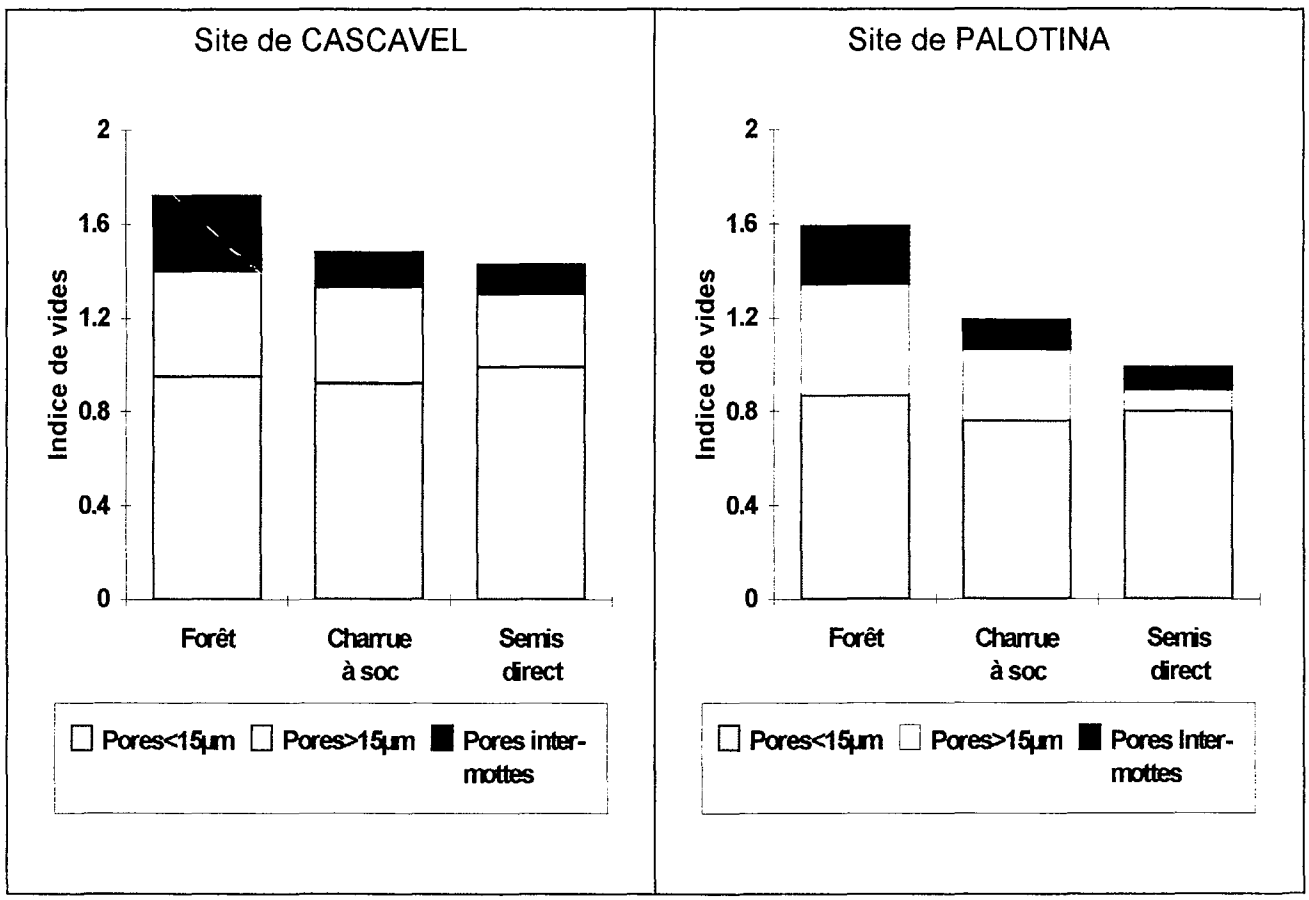


Fig. III.10 : Evolution de la porosité (inter-mottes, macropores (> 15 µm) et micropores (< 15 µm)) des sols des deux sites étudiés.

• L'effet de la pratique culturale sur la porosité est mis en évidence surtout pour le semis direct, dans les deux sites étudiés. Pour le site de Cascavel seuls les pores > 15 µm (macroporosité) ont été affectés par la mise en culture des sols. Pour le site de Palotina aussi bien les pores > 15 µm (macroporosité) que les pores < 15 µm (micro-porosité) sont affectés par la mise en culture des sols (Fig. III.10).

• Il apparaît une relation entre la minéralogie et la sensibilité au tassement.

CHAPITRE 4 :

ORGANISATION DE LA PHASE SOLIDE ET CARACTERISATION DE L'ESPACE PORAL DES SOLS

Dans les chapitres précédents nous avons mis en évidence des différences entre les deux sols étudiés en ce qui concerne leur constitution minéralogique et le milieu physico-chimique.

La question posée est maintenant de savoir si les différences évoquées précédemment quant aux profils culturaux et à la porosité des sols se traduisent aux autres échelles, submacroscopiques et microscopiques, par des organisations de la phase solide et des pores différents.

A cet effet, nous allons décrire l'arrangement des constituants et l'espace poral qui en résulte à partir de l'observation de lames minces en microscopie optique [FITZPATRICK (1984) ; BULLOCK *et al.,* (1985)]. Ces observations en microscopie optique seront complétées par des études au microscope électronique à balayage.

Nous analyserons ensuite les images obtenues à partir des lames minces de façon à suivre l'évolution de la porosité en fonction des pratiques. L'ensemble sera complété par une étude de la distribution de la taille des pores en porosimétrie au mercure.

I) ORGANISATION DE LA PHASE SOLIDE.

A) MATERIELS ET METHODES

1) Matériel.

Les prélèvements des échantillons nécessaires à la fabrication des lames minces ont été effectués sur un plan vertical, entre 5 et 40 cm dans les profils présentés au chapitre 3. De grandes lames minces (16 x 9 cm) issues de blocs imprégnés ont été confectionnées pour les observations à la loupe binoculaire et au microscope optique. Dans ce cas de figure, les grossissements vont de 1 à 10.

Pour la fabrication des lames minces on a évité toute dessiccation afin de préserver au mieux organisation de l'état humide. Un échange eau-acétone en phase liquide a été réalisé. Ensuite le échantillons ont été imprégnés dans une résine polyester (Crystic) contenant un pigment fluorescent (Uvitex) [MURPHY et al., (1977)]. Ce type de préparation permet d'observer les pores des échantillons sous lumière ultraviolette, ce qui facilite l'analyse de l'espace poral et des structures. On peut en particulier bien distinguer les vides des constituants solides incolores. Une fois imprégnés les échantillons ont été sectionnés et les surfaces polies puis observées en lumière transmise ou en réflexion sous éclairage ultraviolet (HARTMANN *et al.*, (1992).

La terminologie employée pour la description des lames minces est celle proposée par BULLOCK *et al.*, (1985) et traduite en partie par STOOPS (1986).

Pour le microscope électronique à balayage, des échantillons de taille centimétrique (mottes de $1cm^3$) ont été déshydratés par séchage à l'air et à l'étuve à 105°C, et enfin dégazés sous vide avant d'être métallisés. Ils ont été observés tels quels à sec. Sur des lames minces de petite taille, on a aussi utilisé le MEB en mode électrons rétrodiffusés afin d'étudier la porosité des sols. (D'ACQUI *et al.* 1994).

B) ORGANISATION DES SOLS SOUS FORET.

1) Organisation submacroscopique (lames minces).

A ***Cascavel***, sous forêt, le sol présente une structure dominante microagrégée en assemblage très lâche, et les agrégats sont rouges foncés de 100 µm à 5 mm de diamètre et de forme plutôt arrondie (planche IV.1(a)). Il n'y a pas de traits pédologiques hormis les figures d'origine biologique (planche IV.2) de type *"pellets"* (pores de forme arrondie) et des e*xcréments de vers de terre* (sol malaxé présentant un aspect particulier).

A ***Palotina,*** sous forêt, le sol présente une structure dominante microagrégée en assemblage lâche. Contrairement à Cascavel où les agrégats sont de taille très petite (< 5 mm) ici les agrégats sont généralement de taille beaucoup plus grande puisqu'ils atteignent 20 à 30 mm pour les plus gros. A côté de ces agrégats, on en observe d'autres de taille plus petite, c'est-à-dire du même ordre de grandeur qu'à Cascavel, indiquant que la taille des agrégats est donc très étalée (planche IV.1(b)).

Quant aux traits pédologiques, nous avons pu observer des figures d'origine biologique (planche IV.2) de type *"pellets"* , des *excréments de vers de terre* et des pores racinaires. Des fissures sont aussi visibles sur les agrégats de grande taille (Planche IV.1(b).

Au bord de quelques agrégats on a observé *"une argile de revêtement"*, de couleur jaunâte à L.N qui a été analysée au MEB. Il ne s'agit pas d'une argile de néoformation car on n'a pas vu de cristallisation sur les parois des pores (cristallisation de kaolinite, par ex.). Sa composition est à base de Si, Al avec un peu de Fe, comme pour l'argile des agrégats

Nous avons conclu qu'une redistribution très locale se produit car l'argile posséde la même morphologie que celle observée pour les autres échantillons du profil.

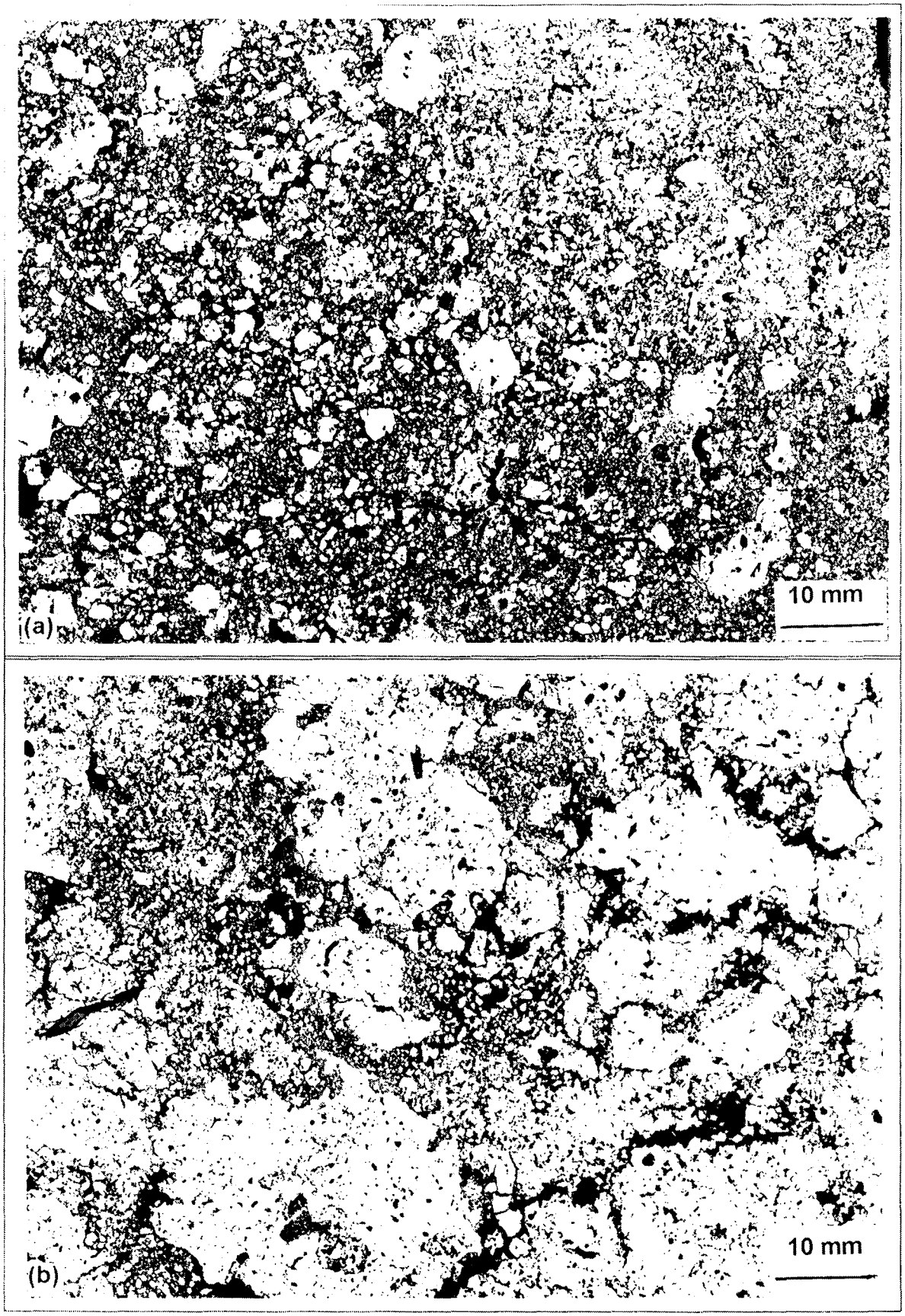


Planche IV.1 : Observation à la loupe binoculaire de l'organisation submacroscopique des sols sous forêt du site Cascavel (a) et Palotina (b) .

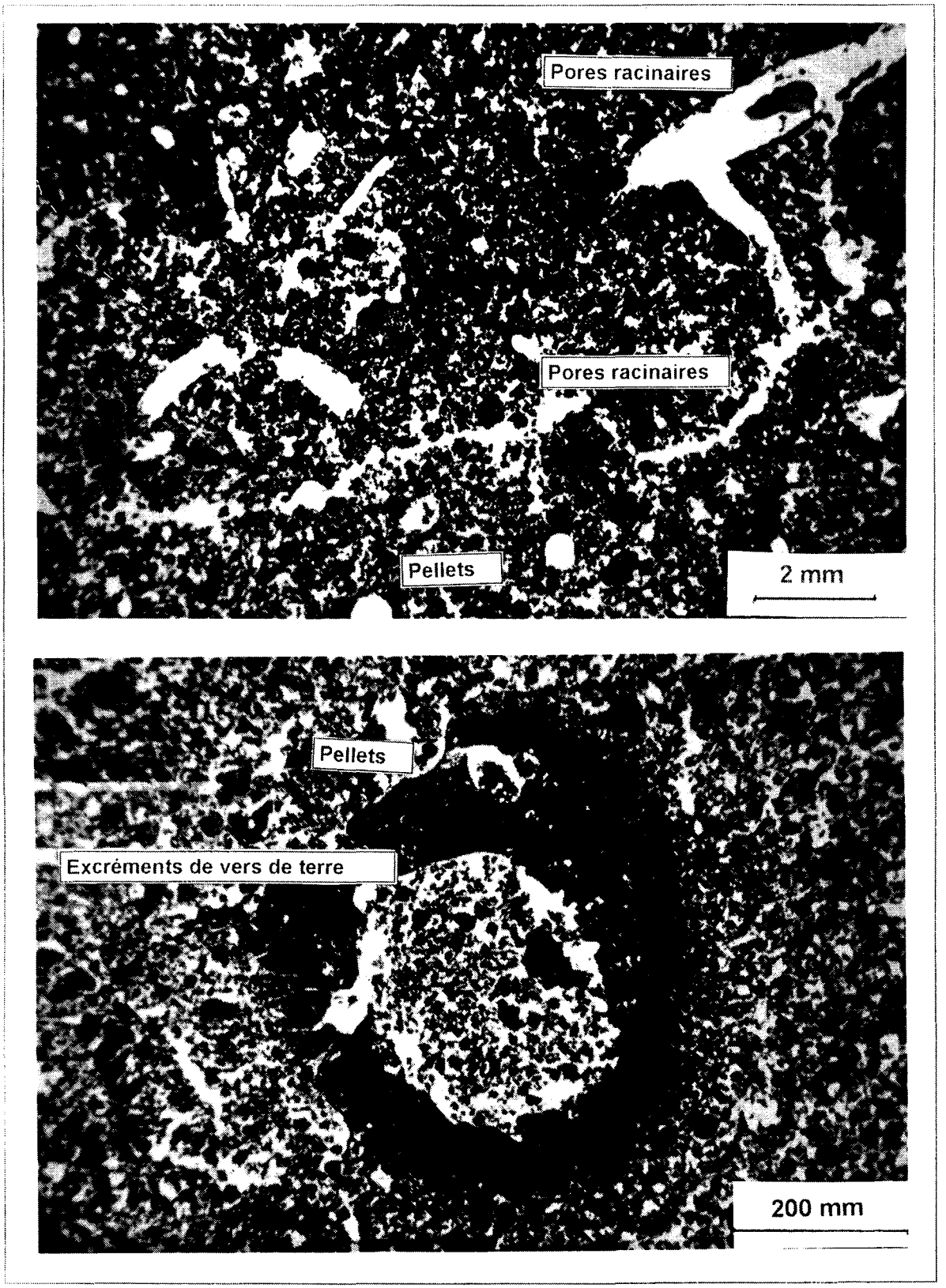


Planche IV.2 : Observation à la loupe binoculaire des figures d'origine biologiques trouvés dans les sols sous forêt des sites étudiés.

2) Organisation à l'échelle micrométrique (MEB).

Les observations au M.E.B. (planche IV.3) mettent en évidence des assemblages très fins de l'ordre de 200 nm à Cascavel alors qu'à Palotina à cette échelle on peut voir des agrégats de taille beaucoup plus grossière à l'intérieur desquels des particules beaucoup plus petites sont identifiées.

3) Discussion et conclusion.

Les principales caractéristiques de l'organisation des deux sites, sont rassemblées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1 : Récapitulation des organisations des sols sous forêt .

Site CASCAVEL.	Site PALOTINA.
Structure microagrégée en assemblage ***très lâche***. (Poudre de café).	***Structure*** agrégée en assemblage ***lâche***.
Agrégats : arrondis, constitués de particules ***très petites***, en assemblage ***très lâche***, matériau ***très poreux***.	***Agrégats de forme plutôt*** polyédrique, constitués de particules de taille très étalée, pouvant atteindre 20 à 30 mm, en assemblage assez ***lâche*** et assez ***poreux***.
Porosité totale très forte (**60 %**), résultant de l'assemblage de micro agrégats **(~50%)** et de pores d'origine biologique.	***Porosité totale*** forte (**40 - 50 %**), résultant de l'assemblage d'agrégats avec des fissures et des pores d'origine biologique (**40%**).
Phase minérale fine rouge foncée **sans** argile en revêtement.	**Phase minérale fine** : rouge foncée, **avec** argile de revêtement, jaunâtre.

Des données qui précèdent il ressort que les horizons B se distinguent à toutes les échelles par des organisations de taille différente. A Palotina, quelle que soit l'échelle d'observation, les agrégats identifiés sont toujours plus grands qu'ils ne le sont dans le site Cascavel. En outre, l'augmentation de la taille des agrégats à Palotina va de pair avec une forme plutôt polyédrique. Il existe alors une certaine continuité entre eux.

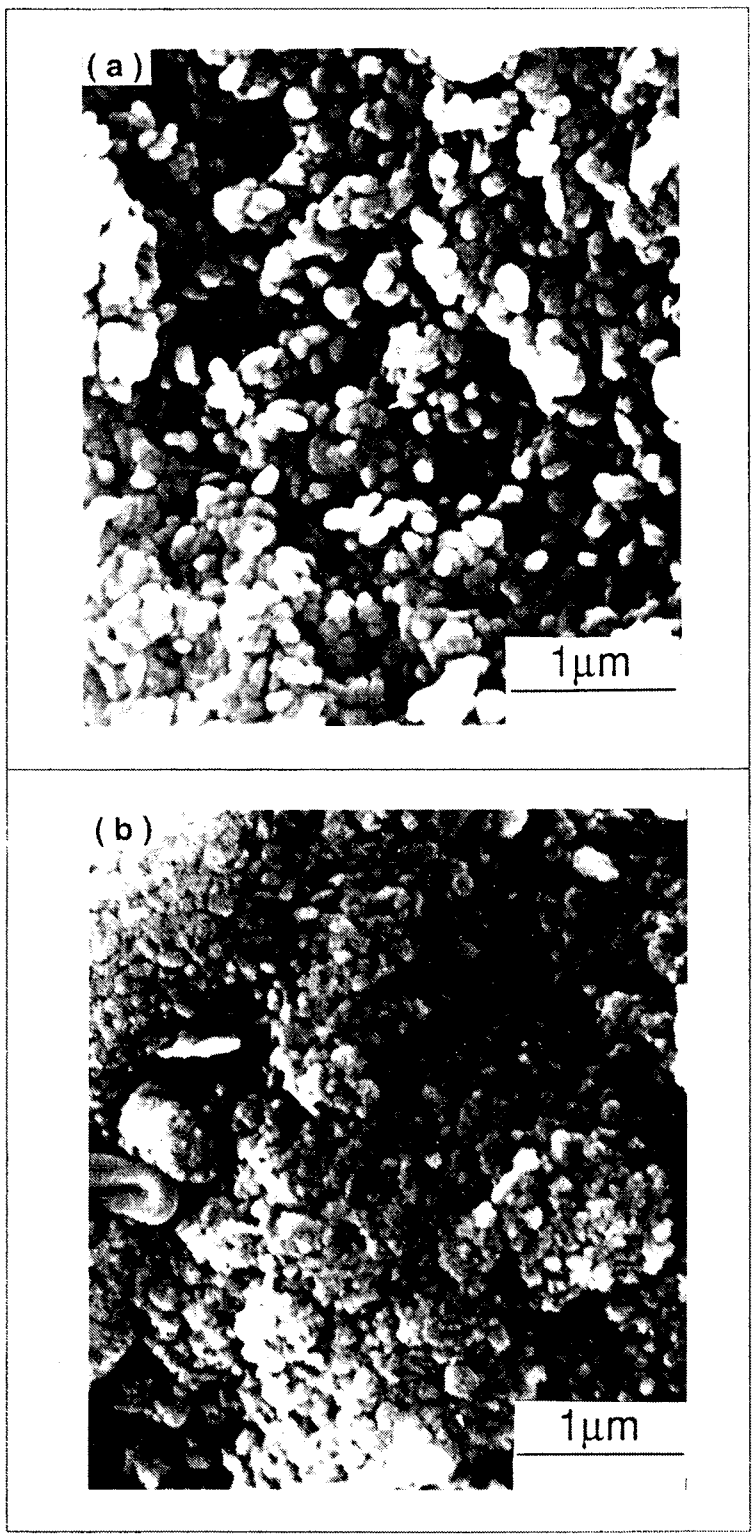


Planche I.V.3 : Observation au MEB de la structure des agrégats des sols des sites de Cascavel (a) et Palotina (b).

Des résultats similaires ont été obtenus par CHAUVEL et NOBREGA (1980) sur des terra roxa legitima et terra roxa estruturada qui indiquent que les sols de type terra roxa estruturada possèdent des organisations de plus grandes tailles que les précédents.

Pour les sols que nous étudions, nous pouvons **conclure** que même si le sol de Palotina n'est pas une terra roxa estruturada, il en possède des similarités au plan de son organisation.

C) ORGANISATION DES SOLS CULTIVES.

Elle se fera sur à partir de l'étude des lames minces. Nous présenterons d'abord les observations faites sur les sols labourés à la charrue à soc, puis nous examinerons les résultats du semis direct.

1) Charrue à soc (planche IV.4) :

Les observations ont été faites sur des lames minces de grande taille, afin de rendre compte au mieux de l'hétérogénéité du matériau. Dans les deux cas, l'organisation du sol présente de gros fragments dont la taille est de 50 à 100 mm. A la périphérie des fragments, on observe la présence de fragments très fins. De ce point de vue, les sols des deux sites possèdent une organisation très similaire.

A l'intérieur des blocs, des fissures sont présentes à Cascavel. Sur l'ensemble des blocs de Palotina nous n'avons pas observé de fissuration similaire.

2) Semis direct (planche IV.5) :

Par rapport au semis direct, les deux sols présentent une organisation beaucoup plus continue. Il n'est plus possible de distinguer des agrégats de taille décimétrique comme précédemment.

A **Cascavel**, le sol est fortement fissuré. La fréquence des grandes fissures est de l'ordre de 5 à 10 cm. Leur direction paraît très variable puisque sur nos lames toutes les directions de l'espace ont été représentées. Un second réseau de fissures est présent. A l'intérieur de blocs délimités par les fissures, les pores sont de taille millimétrique. L'activité biologique est relativement importante.

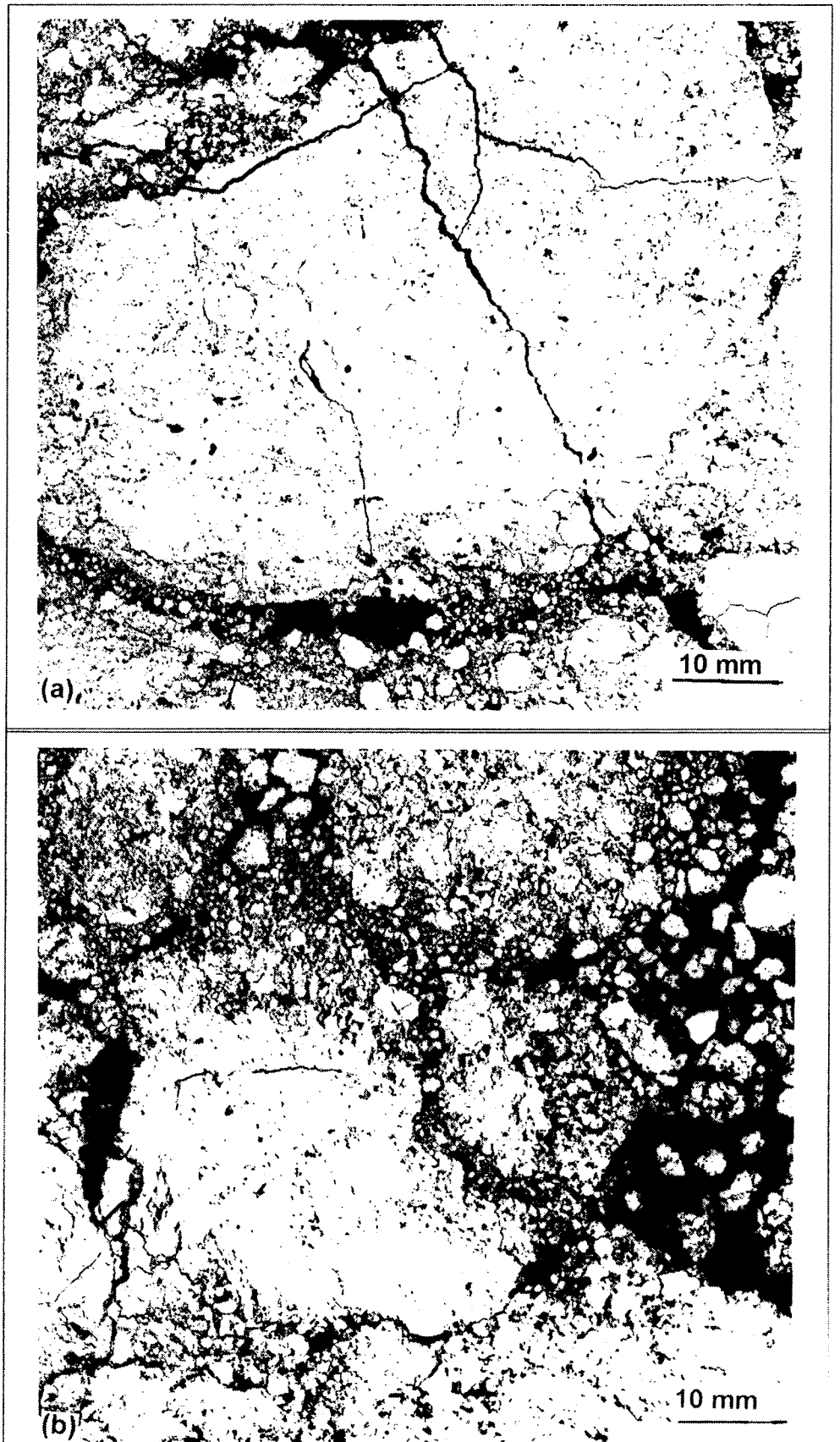


Planche IV.4 : Observation à la loupe binoculaire de l'organisation submacroscopique des sols sous charrue à soc du site Cascavel (a) et Palotina (b) .

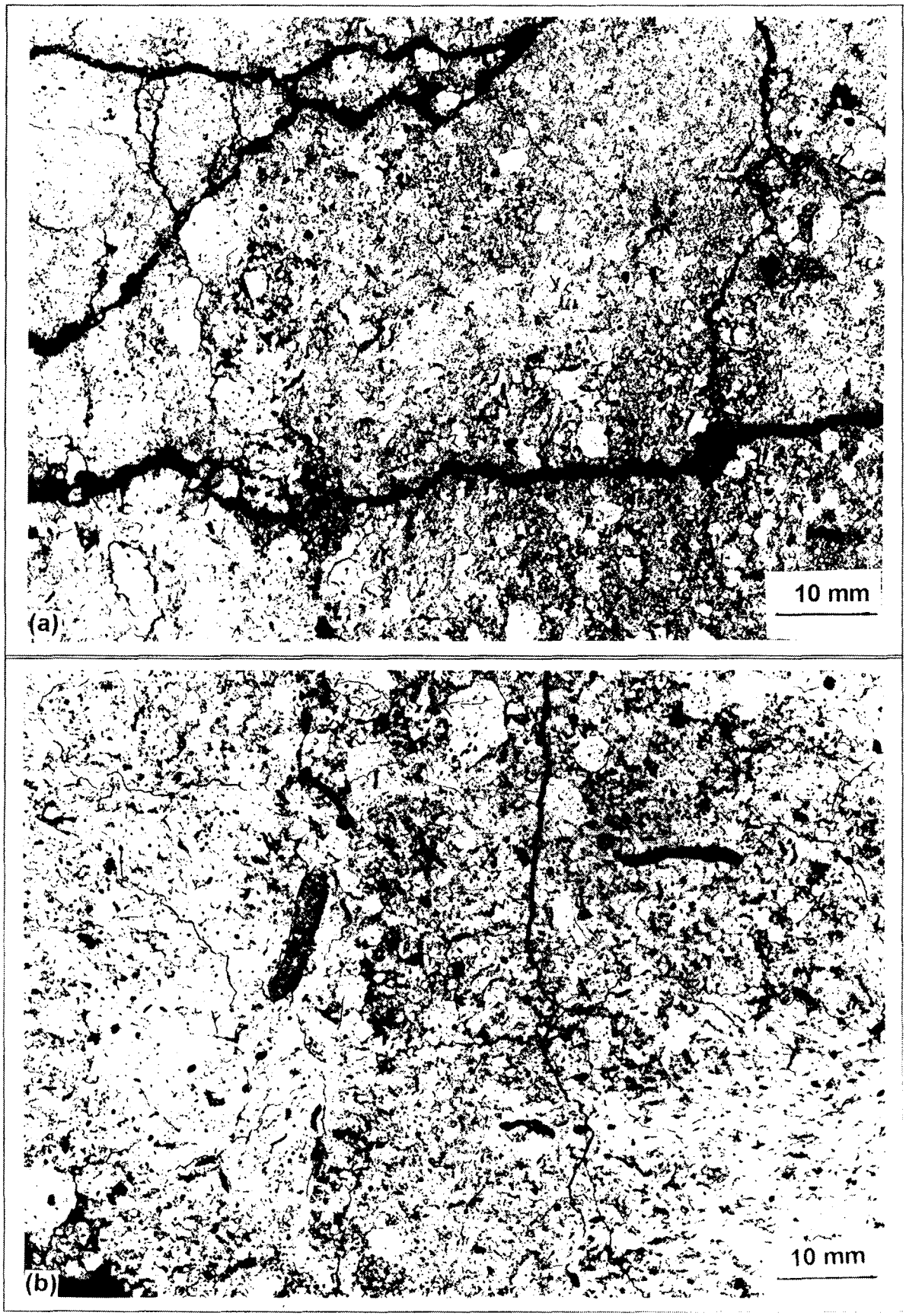


Planche IV.5 : Observation à la loupe binoculaire de l'organisation submacroscopique des sols sous semis direct du site Cascavel (a) et Palotina (b) .

A **Palotina**, le sol est beaucoup moins fissuré. La taille des fissures est réduite. Un réseau de fissures très fines est cependant présent. L'organisation du sol parait localement compacte. L'activité biologique est très clairement visible et elle semble plus importante qu'à Cascavel.

3) Discussion.

La difficulté dans les sols cultivés est d'abord de rendre compte de l'hétérogénéité du matériau à l'échelle de la lame mince. Nos observations confirment cependant les données de terrain, notamment pour ce qui concerne l'organisation du sol à l'échelle de l'horizon (système fissural), la structure des mottes (pores de taille millimétrique) et l'activité biologique.

Par rapport à la situation sous forêt, il est clair que la mise en culture entraine la disparition de l'organisation microagrégée de départ caractéristique de la forêt. Dans tous les cas, les agrégats initiaux se sont regroupés de façon à former des entités plus grossières que dans le site sous forêt. Sous la charrue cependant, de grandes discontinuités subsistent après quelques mois de labour. Sous semis direct au contraire, la plupart des discontinuités évoquées précédemment ont disparu.

La présence d'un système fissural est cependant très différente d'un sol à l'autre. Il est très présent à Cascavel alors que à Palotina il n' y a pas ou il est très peu représenté. Les deux sols n'ont certainement pas les mêmes propriétés de gonflement-retrait.

A Palotina, la porosité est avant tout biologique, même si cette dernière est faible.

D) Conclusion.

La mise en culture, quelle que que soit la pratique, conduit à une compaction. Mais l'effet de la compaction sur l'évolution de la structure et la porosité des sols dépend de la façon dont les sols sont travaillés :

- les sols travaillés à la charrue à soc présentent une structure moins massive où la différentiation des éléments structuraux (mottes des différentes tailles) est plus évidente, et la porosité prédominante est la porosité inter-mottes (tableau IV.2).

Tableau IV.2 : Organisation et types de discontinuités des sols sous forêt et mise en culture des sites étudiés.

Profils sous :	Site de Cascavel	Site de Palotina
Forêt	Structure microagrégée (poudre de café) et porosité d'assemblage d'agrégats (pores < 5mm)	Structure agrégée et porosité d'assemblage d'agrégats (pores < 30mm)
Charrue à soc	Structure plus au moins massive avec des grandes discontinuités et Porosité inter-mottes > Porosité fissurale > Porosite biologique.	Structure plus au moins massive, avec des discontinuités et Porosité inter-mottes > Porosité biologique > Porosité fissurale.
Semis direct	Structure massive sans discontinuité et Porosité fissurale > Porosité biologique.	Structure très massive sans discontinuité. Porosité essentiellement biologiques.

- les sols sous semis direct présentent une structure massive ou la différentiation des éléments structuraux est inexistante et la porosité prédominante est fissurale et biologique pour Cascavel et essentiellement biologique pour Palotina (tableau IV.2).

II) ORGANISATION DE L'ESPACE PORAL DES SOLS CULTIVES. ANALYSE QUANTITATIVE A PARTIR DES LAMES MINCES.

La prédiction du comportement des sols nécessite de prendre en compte la nature précise les modifications de l'organisation du système poral. Dans ce domaine nous pouvons nous référer à de nombreux auteurs [BOUMA *et al.*, (1979) ; VACHIER *et al.*, (1979) ; GERMANN et BEVEN (1981) ; SORANI (1985) ; CHRETIAN (1986) ; CHRETIAN et PEDRO (1987) ; COULON (1988) ; MONNIER et GUERIF (1988) ; GRIMALDI et BOULET (1990) ; CARVALHO (1990 et 1991) ; HARTMANN (1991) ; LASSAUSSE (1991) ; CURMI *et al.*, (1992) ; COLLEUILLE (1993)].

Dans ce paragraphe notre objectif est de caractériser les différents niveaux d'organisation de l'espace poral des sols cultivés afin de mieux comprendre le mécanisme de l'évolution des propriétés physiques.

A cet effet, deux approches ont été associées : l'approche morphologique à partir de laquelle nous étudierons les pores des lames minces de sols à l'aide de l'analyse d'image, et l'approche physique (porosimétrie au mercure) pour l'étude de la porosité plus fine.

A) ETUDE DES LAMES MINCES EN ANALYSE D'IMAGE.

1) Présentation.

L'étude de la porosité des sols à partir de lames minces a fait l'objet de nombreux travaux parmi lesquels ceux de [JONGERIUS *et al.*, (1972) ; ISMAIL (1975) ; BOUMA *et al.*, (1977) ; MURPHY *et al.*, (1977) ; BULLOCK et THOMASSON (1979) ; PAGLIAI *et al.*, (1983) ; MURPHY et KEMP (1984) ; RINGROASE-VOASE (1987, 1990(a et b)) ; BARTOLI *et al.*, (1991)].

Plus récemment, l'utilisation d'une caméra-video couplée à un ordinateur a permis l'analyse directe de la porosité à différents grossissements [WARNER *et al.*, (1989) ; HALLAIRE (1991) ; HARTMANN (1991) ; BRESSON et GUILLORE (1991) ; COLLEUILLE (1993) ; HALLAIRE et CURMI (1992) ; HALLAIRE et COINTEPAS (1993)].

Nous avons utilisé les lames minces qui ont été confectionnées comme déjà décrit dans le chapitre 3, de la partie II - "Confection de lames minces". Après

l'imprégnation les surfaces des échantillons ont été polies et observées par réflexion sous éclairage ultraviolet. L'analyse d'image a été effectuée sur un ordinateur Bull SPS7/75 doté du périphérique TITN Colorix pour la gestion en mémoire et l'affichage sur écran des images digitalisées, et équipé du logiciel Noesis Visilog pour le traitement proprement dit des images [HALLAIRE et COINTEPAS (1993) ; HARTMANN (1991)].

2) Acquisition d'image.

Cette acquisition a été effectuée directement au moyen d'une caméra vidéo placée au-dessus des échantillons éclairés en lumière ultraviolette, sans l'intermédiaire d'un microscope, de façon à exclure la microporosité de l'analyse. Les images acquises sont des fenêtres carrées de 23 mm de côté.

Pour chaque lame, 6 à 8 images ont été saisies. Les images ont été digitalisées en 768 x 576 pixels, selon une trame hexagonale, et numérisées sur 256 niveaux de gris (nous avons travaillé entre 35 et 255). Chaque pixel représente ainsi une longueur de 45 µm, soit une surface d'environ 2000µm².

La taille du pixel, qui correspondait à notre limite inférieure de résolution, a été choisie de façon à ne prendre en compte que la macroporosité : ne seront retenus dans l'analyse que les pores dont la taille, dans quelque direction que ce soit, est supérieure à 40 µm.

La faible différence de niveaux de gris entre les pores et la phase solide rend difficile la détection automatique des pores et la binarisation des images en niveaux de gris : le plasma est constitué de plages sombres et de plages claires. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé ***la technique de seuillage localisé***, c'est-à-dire tenant compte de l'environnement des objets à détecter, en utilisant les principes de la morphologie mathématique [Sera (1982), **in** : HARTMANN (1991)]. Ainsi on distingue la macroporosité de la matrice du sol.

3) Principe de la quantification des caractéristiques porales.

Cette quantification des caractéristiques porales a été faite à partir de 2 paramètres : la taille des pores et l'indice de forme.

3.1) Taille des pores.

Pour cette estimation nous avons d'abord estimé la ***macroporosité totale*** d'une image par l'aire occupée par les pores sur l'image binaire, exprimée en pixels. Ramenée à la surface de l'image (768 x 576 pixels), cette valeur sera dénommée ***porosité cumulée.***

La taille de chaque pore individualisé sera estimée par son aire porale, plus apte, en l'occurrence, à rendre compte de cette grandeur que le diamètre des pores utilisé lorsque la porosité est essentiellement tubulaire, EDWARDS *et al.,* (1988). A partir de la détermination du point d'intersection de deux tangentes de ces courbes cumulées, présentées en annexe, ***quatre classes de pores ont été sélectionnées*** :

- pores inférieurs à 0,01 mm^2 (moins de 10^2 pixels),

- pores de 0,01 à 0,1 mm^2 (de 10^2 à 10^3 pixels),

- pores de 0,1 à 1 mm^2 (de 10^3 à 10^4 pixels),

- pores supérieurs à 1 mm^2 (plus de 10^4 pixels) ;

et le pourcentage d'occupation de chacune des classes dans la porosité totale cumulée a été déterminé. Ainsi, nous saurons quelles sont les classes que sont le plus affectées par les pratiques culturales.

3.2) Forme des pores.

La forme des pores est couramment considérée comme un indicateur de l'organisation de la phase solide, on parle de "vides d'entassement" ou fentes "de retrait". [HARTMANN (1991)]. Selon HALLAIRE et COINTEPAS (1993), la classification des pores suivant leur forme a pour but de distinguer les pores tubulaires des pores fissuraux, en deux dimensions, ces pores se distinguent par la forme de leur section, arrondie pour les uns, allongée pour les autres.

L'indice de forme, a été calculé comme suit : (périmètre)² / 4π x aire (sans dimension), [COSTER et CHERMANT (1985) ; Sera (1982), **in** : HARTMANN (1991)]. Selon BUI *et al.,* (1989), cet indice s'avère utile pour classer les particules suivant leur forme, malgré les réserves qu'impose son emploi dans un espace digitalisé. Plus l'indice est grand, plus les pores sont allongés et pour un indice égal à 1 les pores sont considérés comme ronds.

A partir de là, nous avons procédé comme décrit pour l'étude de la taille des pores, et trois classes de forme (Planche IV.6) ont été choisies, lesquelles seront dénommées :

a) - classe des ***pores biologiques*** *pour un indice de forme entre 0 et 5,*

b) - classe des ***pores fissuraux*** *pour un indice de forme entre 5 et 10,*

c) - classe des ***pores interconnectés*** *quand l'indice de forme est > à 10.*

B) DONNEES SUR LA DISTRIBUTION DE LA TAILLE DES PORES.

Les résultats présentés par la suite sont la moyenne des 6 à 8 images par lame mince. Ils ont été comparés à partir d'un test de moyenne au seuil de 5% (PPDS).

Les résultats sont rassemblés sur le tableau IV.3 et figure IV.1.

Tableau IV.3 : Porosité cumulée totale (P.C.) et des différentes classes de pores, pour les sites de Cascavel et Palotina.

Site	Profil	P.C. totale (%)	P.C. de chaque classe de pores.							
			< 0,01mm²		0,01 - 0,1mm²		0,1 - 1mm²		> 1mm²	
			%	C.V(%)	%	C.V(%)	%	C.V(%)	%	C.V(%)
Casca-	Forêt	36	1,8	32	5,4	20	5,8	25	23,4	20
vel	C.soc	31	0,9	40	2,8	28	3,1	16	24,4	32
	S.direct	30	2,0	53	5,6	30	4,3	21	18,1	24
Paloti-	Forêt	31	1,6	38	4,3	14	12,4	55	12,7	73
na	C.soc	20	0,8	60	2,4	40	4,2	45	13,0	70
	S.direct	11	0,9	30	4,1	19	3,1	40	3,1	75

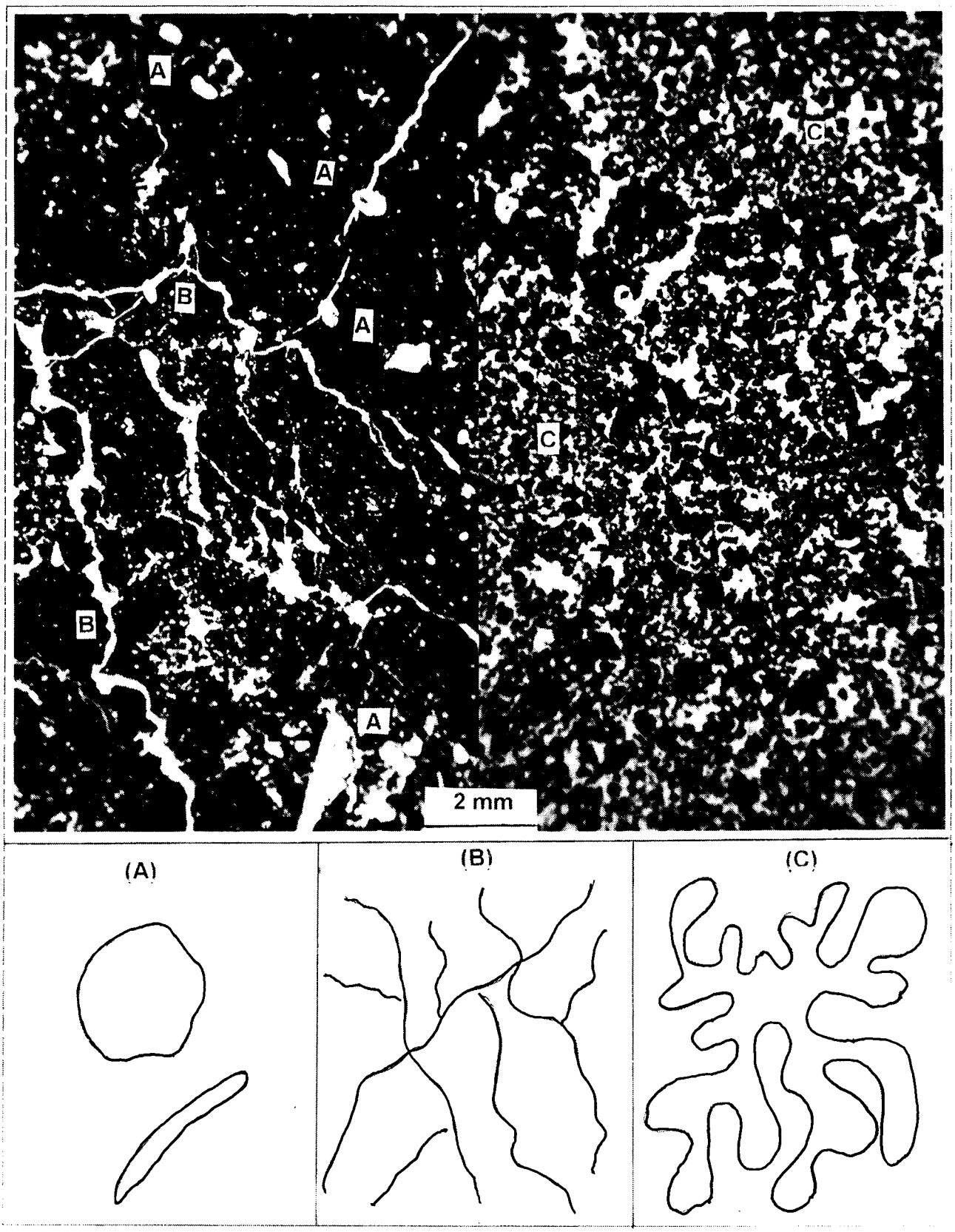


Planche IV.6 : Formes de pores qui ont été considérées dans notre étude (A=pores biologiques. B = pores fissuraux. C = pores interconnectés).

Tout d'abord, la porosité cumulée mise en évidence sur les lames minces est toujours supérieure à Cascavel par rapport à Palotina (tableau IV.3 et figure IV.1). On passe d'une porosité de 36 % sous forêt à Cascavel, à 31 et 30 % avec labour et semis direct.

A Palotina, sous forêt, la porosité est de 31 % alors que sous semis direct on a seulement 11 %. La valeur trouvée pour la charrue est intermédiaire et égale à 20%.

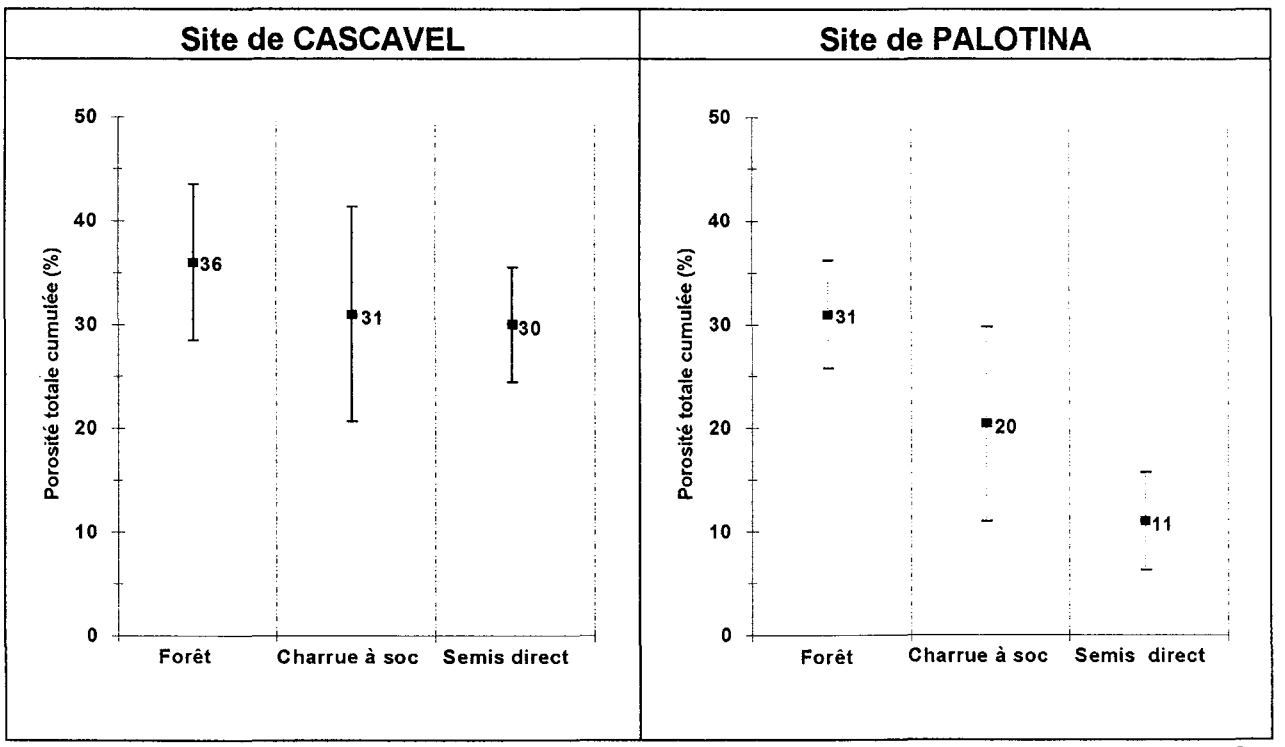


Fig. IV.1: Pourcentage totale cumulée pour les différents situations étudiées obtenue en analyse d'image à partir des lames minces.

A partir de l'analyse des images nous pouvons rendre compte de l'évolution des classes des pores (tableau IV.3 et figure IV.2).

Nous notons d'abord que les coefficients de variation observés sont parfois considérables, notamment pour les pores > 1mm² du site de Palotina (tableau IV.3). Dans tous les cas, les résultats obtenus devront donc être considérés comme étant des tendances en matière d'évolution du spectre poral, plutôt que comme une interprétation rigoureuse de son évolution. Nous voyons aussi que les

pores < 0,01 mm² sont peu représentés. L'analyse va donc porter sur les pores plus grands (> 0,01 mm²).

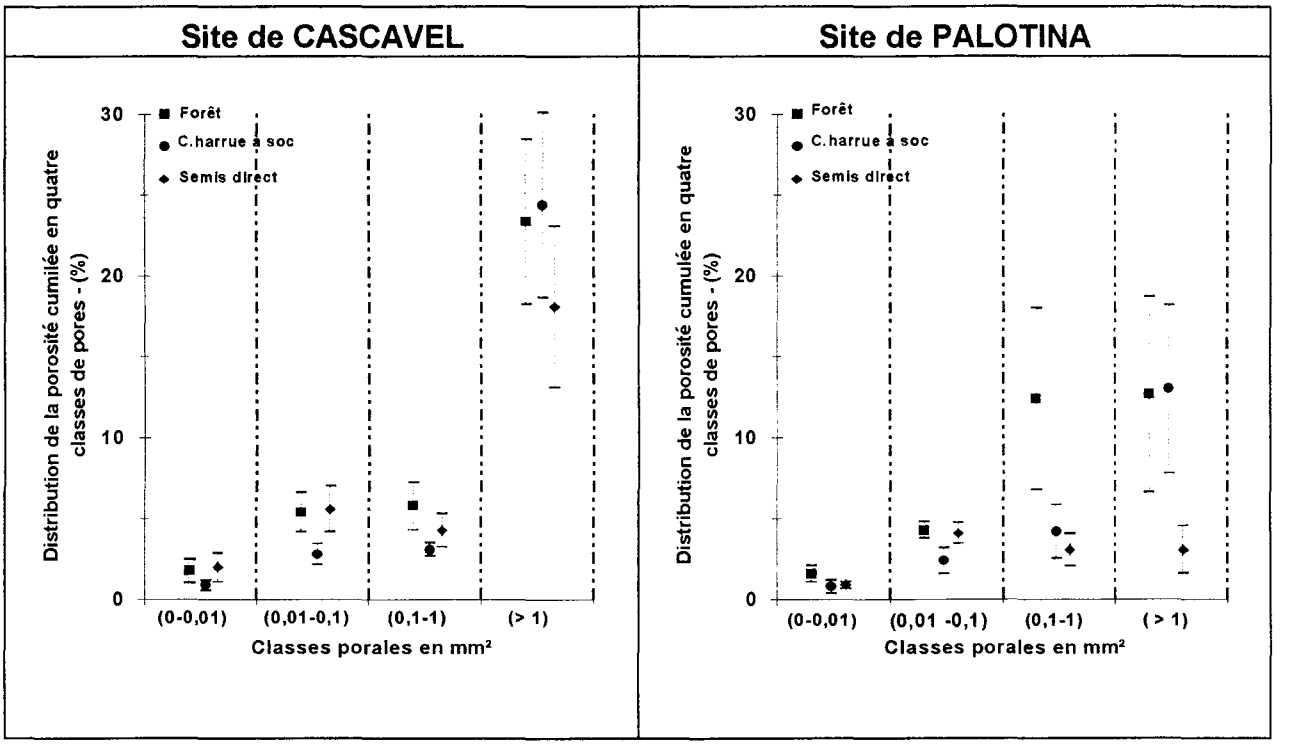


Fig. IV.2 : Porosité cumulée par chaque classe de pores.

A **Cascavel** (fig.IV.2) les pores > 1 mm² sont très nombreux dans tous les cas, y compris le labour et le semis direct. Pour les classes intermédiaires on observe pas d'évolution entre les sols.

A **Palotina** (fig.IV.2) les classes de pores entre 0 et 0,01 mm² sont similaires à Cascavel. Ce sont les clesses de pores de 0,1 - 1 mm² et > 1 mm² qui changent en foction des pratiques culturales.

Le labour à la charrue à soc, sans doute par des effets multiples, fait disparaitre une partie des pores de 0,1 à 1 mm², alors que le semis direct entraine la disparition d'une bonne partie de tous les pores de 0,1à 1 mm² et des pores > 1mm².

C) EVOLUTION DE LA FORME DES PORES.

Les résultats sont rassemblés dans les tableaux IV.4 et rapportés sur la figure IV.3.

Tableau IV.4 : Porosité cumulée (P.C.) suivant les différents indices de forme, pour les sites de Cascavel et Palotina.

Site	Profil	P.C. Totale	P.C. suivant l'indice de forme					
			(< 5)-porosité biologique		(5 - 10) - porosité fissurale		(> 10) - porosité interconnectée	
		(%)	%	C.V.(%)	%	C.V.(%)	%	C.V.(%)
	Forêt	36	4,7	29	2,8	48	28,6	20
Casc.	C.soc	31	4,7	35	3,1	55	23,3	26
	S.direct	30	7,5	28	3,0	51	19,5	24
	Forêt	31	7,4	35	4,7	18	19,2	29
Palot.	C.soc	20	3,6	17	2,6	60	14,0	45
	S.direct	11	5,6	23	1,7	80	3,9	50

Nous nous référons à la nomenclature décrite antérieurement sur les types de pores en fonction de leur forme.

A **Cascavel** les pores interconnectés dominent largement par rapport aux pores biologiques et aux pores fissuraux. Ainsi avec une porosité cumulée de 36 % pour la forêt, de 31% pour la charrue à soc et de 30 % pour le semis direct, nous avons pour les trois situations considérées au moins 20 % de pores interconnectés, de 5 à 8% de pores biologiques et 3% des pores fissuraux.

A **Palotina** cette tendance est vérifiée pour le sol sous forêt et sous charrue à soc. Elle ne l'est pas pour le profil sous semis direct où la porosité biologique est la plus importante, représentant 6 % de porosité sur une porosité totale de 11%.

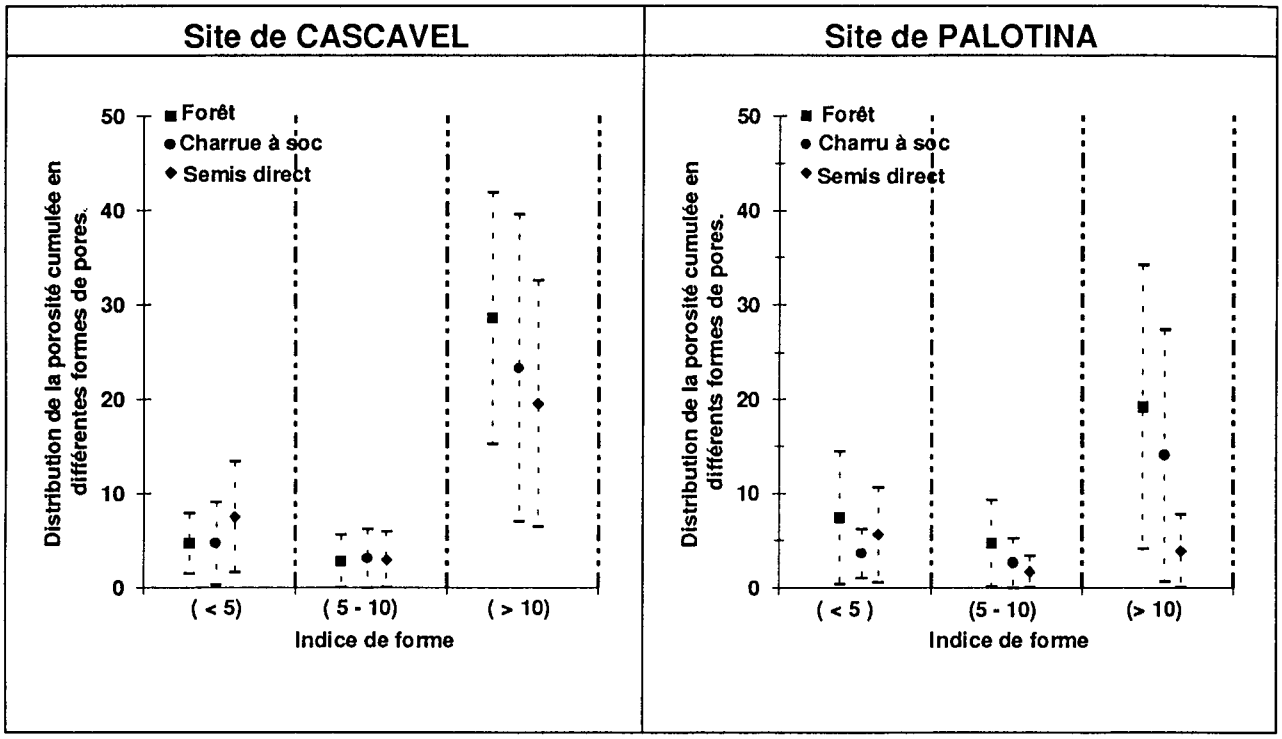


Fig. IV.3 : Porosité cumulée suivant l'indice de formes des pores.

D) EVOLUTION DE LA MICRO-POROSITE. ANALYSE DE LAMES MINCES AU M.E.B.

Jusqu'à présent nous n'avons discuté que de l'évolution de la porosité > 40 µm, donc du domaine de la porosité de drainage et d'aération ; notre but à présent est de mieux comprendre l'évolution morphologique de la porosité < 40 µm où l'eau peut être retenue par les sols.

D'après CALLOT *et al.*, (1982) et CHAMAYOU et LEGROS (1989) l'essentiel de la réserve en eau utilisable par les plantes est contenue dans des pores de rayon > 0,2 µm. Afin de caractériser cette porosité des échantillons ont été étudiés par analyse d'image à partir des images prises au M.E.B.

A cet effet, nous avons utilisé les échantillons issus de la couche 5 - 40 cm des profils sous forêt et sous semis direct. Les résultats sont rapportés sur les tableau IV.5. et IV.6.

Tableau IV.5 : Porosité cumulée totale (P.C.) des différentes classes de pores, pour les sites de Cascavel et Palotina obtenue au M.E.B. (electrons rétrodiffusés).

Site	Profil	P.C. totale (%)	P.C. de chaque classe de pores.							
			< 100µm²		100-500µm²		500-1000µm²		> 1000µm²	
			%	C.V.(%)	%	C.V.(%)	%	C.V.(%)	%	C.V.(%)
Cascavel	Forêt	1,3	0,51	37	0,30	70	0,30	80	0,20	90
	S.direct	1,1	0,40	30	0,50	50	0,11	95	0,10	90
Palotina	Forêt	0,7	0,31	40	0,20	55	0,13	70	0,10	50
	S.direct	0,5	0,40	21	0,10	70	0,01	10	0,01	10

Tout d'abord la porosité cumulée mise en évidence sur les lames minces analysées au M.E.B. est toujours supérieure à Cascavel par rapport à Palotina (tableau IV.5 et figure IV.4). A Cascavel on passe d'une porosité de 1,3 % sous forêt à 1,1 % avec le semis direct. A Palotina, sous forêt, la porosité est de 0,7 % alors que sous semis direct on a seulement 0,5 %.

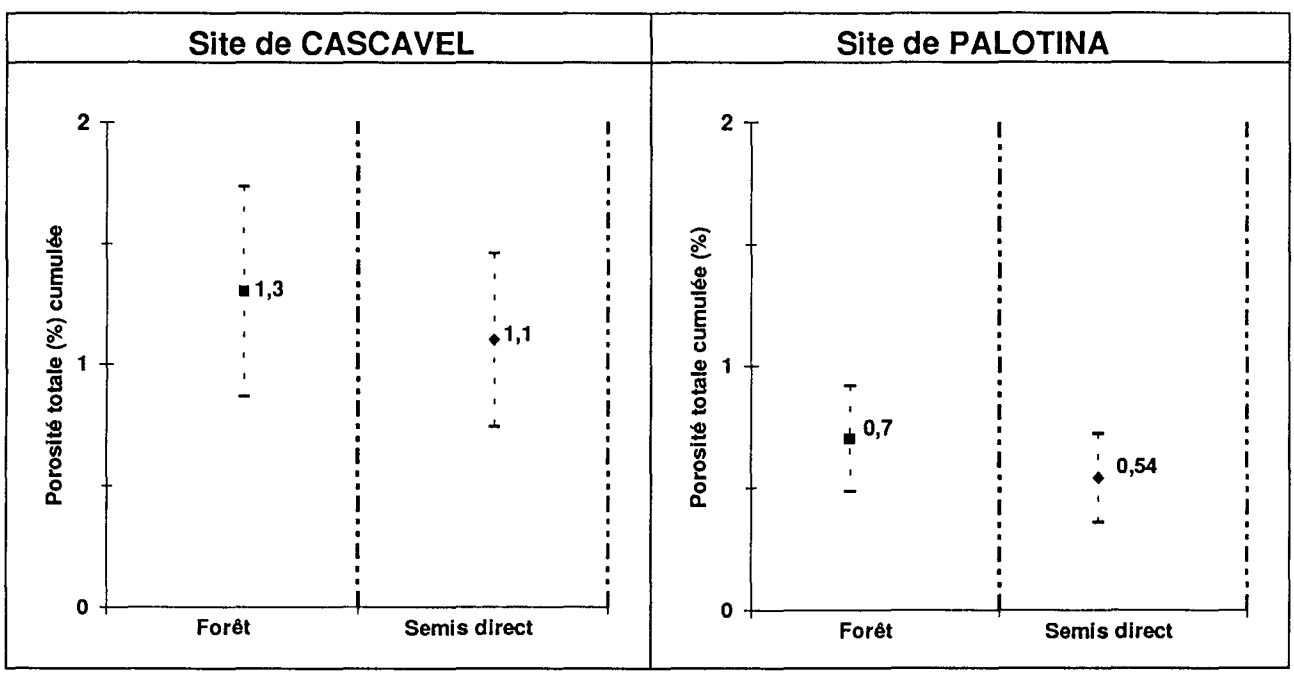


Fig. IV.4: Porosité totale total cumulée pour les différentes situations étudiées (M.E.B. - electrons rétrodiffusés).

Nous retrouvons donc les mêmes tendances mises en évidence jusqu'à présent : c'est le sol de Palotina qui posséde, même pour les pores de petite taille, les plus faibles porosités. Le tassement du sol, suite à la mise en culture, affecterait donc ausi ce type de pores.

En ce qui concerne la distribution des classes de pores, nous notons d'abord que les coefficients de variation observés sont considérables, notamment dans le site de Cascavel (tableau IV.5 et figure IV.5). Les résultats obtenus doivent donc être considérés comme *des tendances* d'évolution du spectre poral, et non comme une évolution statistiquement significative du spectre poral.

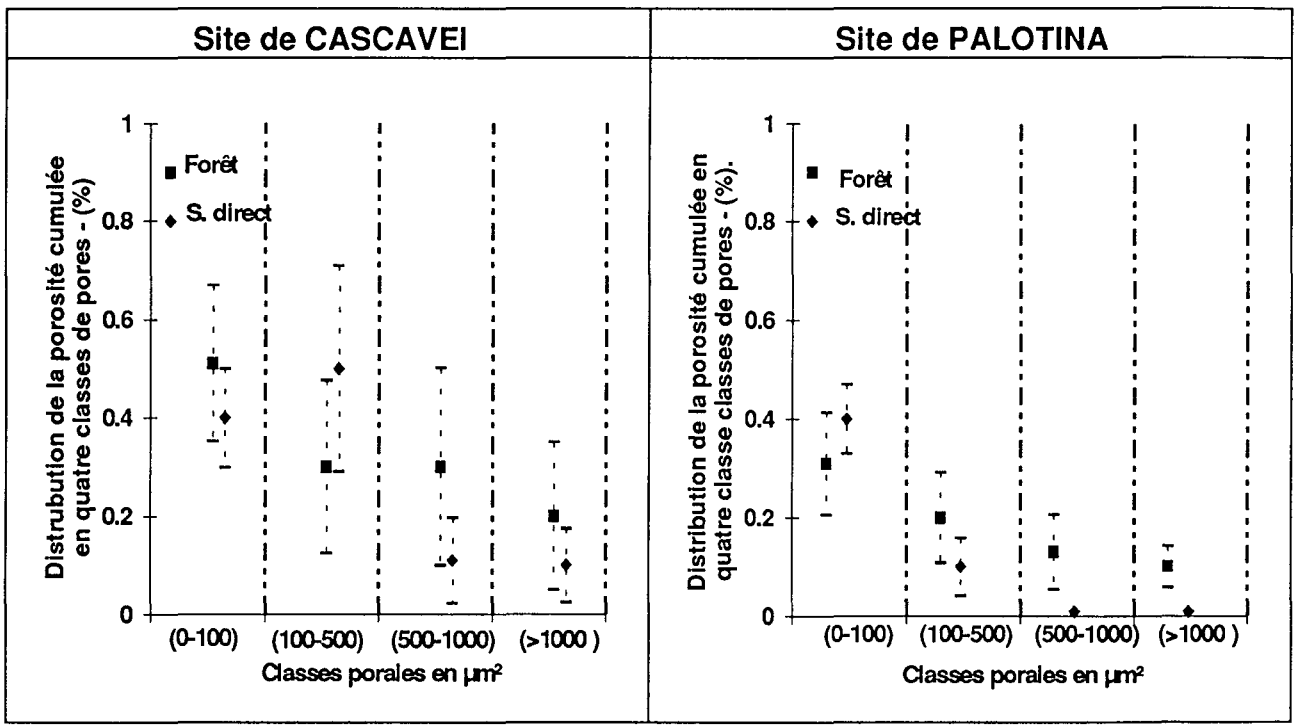


Fig. IV.5 : Porosité cumulée par chaque classe de pores (M.E.B. - électrons étrodiffusés.

Au M.E.B., la classe des pores dominante, dans le deux sites et pour les deux situations considérées est < 500µm². A Palotina sous semis direct, la classe > 500 µm² a pratiquement disparu.

Par rapport à l'indice de forme (tableau IV.6 et la figure IV.6), la tendance à Cascavel et à Palotina est d'avoir plutôt des pores avec un indice < 5 ("pores arrondis"). La mise en valeur des sols provoque, préférentiellement, une réduction des pores allongés (fissures) et des pores interconnectés.

Tableau IV.6 : Différentes classes d'indice de forme, pour les sites de Cascavel et Palotina, obtenue au M.E.B. (électrons rétrodiffusés).

Site	Profil	P.C. totale	P.C. suivant l'indice de forme					
			(< 5) - pores arrondis		(5 - 10) - pores alongés		(> 10) - pores interconectés	
		(%)	%	C.V(%)	%	C.V(%)	%	C.V(%)
Casc.	Forêt	1,3	0,65	15	0,20	50	0,47	60
	S.direct	1,1	0,61	28	0,20	45	0,30	70
Palot.	Forêt	0,7	0,46	25	0,07	10	0,20	60
	S.direct	0,5	0,40	20	0,08	81	0,03	60

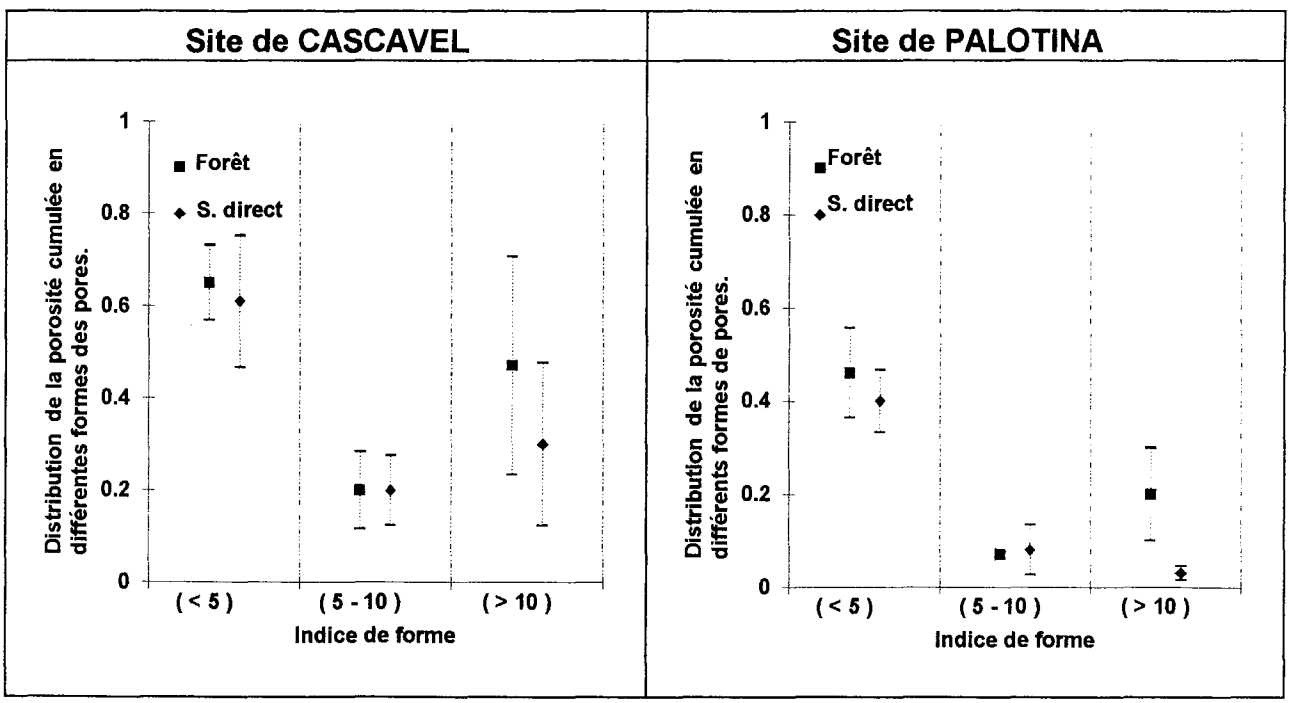


Fig. IV.6 : Indice de forme des pores obtenue au M.E.B. en mode électrons rétrodiffusés.

E) SYNTHESE ET CONCLUSION.

Nous avons vu que le sol sous forêt présente dans le site de Cascavel une structure microagregée, avec une porosité composée essentiellement des pores d'assemblage de microagrégats. Dans le site de Palotina la structure est plus

agrégée ménagent une porosité d'assemblage d'agrégats de taille plus importante, avec une forte activité biologique. Ces observations sont confirmées par les analyses d'images des lames minces.

Dès lors que les sols sont mis en valeur, une évolution structurale accompagnée d'une évolution de la porosité est observée. Pour le site de Cascavel une structure poreuse, avec des pores > 1mm² est toujours stable quelle que soit la situation (forêt, charrue à soc ou semis direct). On trouve aussi des pores plutôt interconnectés avec le développement d'une porosité biologique surtout pour le semis direct.

Dans le cas du site de Palotina, la réduction de la porosité structurale est beaucoup plus importante. Si les pores interconnectés de grande taille (> 1 mm²) subsistent dans les profils sous forêt et charrue à soc ils disparaissent dans le profil sous semis direct et seuls les pores de l'ordre de 0,01 à 0,1mm² subsistent et leur forme nous amène à la conclusion qu'ils sont d'origine essentiellement biologique.

Nous *concluons* que la mise en valeur des sols a réduit la porosité structurale (inter-agrégats) par le rapprochement des agrégats et des grains du squelette eux-mêmes. Il en résulte que la porosité biologique devient prépondérante surtout pour les situations sous semis direct. D'un autre côté, la charrue à soc semble provoquer une destructuration du sol de sorte que la porosité biologique est moins visible. La présence plus importante de matière organique dans le sol non travaillé aurait sans doute contribué au développement de la faune du sol et à une meilleure expression de la porosité qu'elle engendre.

Au total, c'est la porosité biologique qui dans le cas des sols les plus tassés, semble assurer l'essentiel des propriétés physico-hydriques des sols.

Nous verrons par la suite les conséquences pour l'eau utilisable par les plantes et la structuration des sols.

III) ORGANISATION DE L'ESPACE PORAL. APPORT DE LA POROSIMETRIE AU MERCURE.

Les études précédentes ont indiqué que la mise en valeur des sols affecte d'abord la gamme des pores les plus grands (inter-agrégats) qui correspondent pour l'essentiel à un ensemble de pores d'origine structurale. L'étude au M.E.B. suggère que la porosité la plus fine qui est associée à l'assemblage élémentaire des particules d'argiles est également affectée.

Pour vérifier cette hypothèse, nous allons utiliser la porosimétrie à mercure. Selon GRIMALDI et BOULET (1990), cette technique, associée à des mesures plus globales de la porosité, permet d'évaluer rapidement l'importance relative des principaux types des pores associés aux niveaux successifs d'organisation des constituants.

A) MATERIEL ET METHODES.

La méthode a été décrite de manière détaillée dans les travaux de LAWRENCE (1977 et 1978) ; PELLERIN (1980) ; GRIMALDI (1981) ; FIES (1984) ; CHRETIEN (1986) ; BRUAND (1985).

Les dispositifs de porosimétrie à mercure permettent d'enregistrer une courbe de volume de mercure pénétrant dans un échantillon en fonction de la pression d'injection. Le mercure est un liquide non mouillant que ne peut pénétrer dans le réseau poral d'un solide poreux que sous l'effet d'une pression [Van BRAKEL *et al.*, (1981) ; MORDRY *et al.*, (1981)]. Les diamètres de constriction des pores (diamètres équivalents) accessibles sont généralement compris entre 250 et $7,5 . 10^{-3}$ µm.

On peut calculer par la loi de Jurin le rayon équivalent (r) du capillaire de forme simple (par exemple cylindrique) auquel chaque pore est assimilé ; plus précisément, c'est le rayon équivalent du seuil du pore - par lequel le pore est accessible aux fluides - qui est déterminé [GRIMALDI et BOULET (1990)].

Des mottes de taille centimétrique (2 - 4 cm^3) prélevées entre 5 - 40 cm dans les deux sols étudiés, ont été préalablement déshydratées par séchage à l'air, puis à l'étuve à 105°C durant 24 h, et ensuite dégazées sous vide. Les mesures

d'injection de mercure ont été effectuées d'abord dans un poste de basse pression (pression inférieure ou égale à la pression atmosphérique), puis dans un poste de haute pression.

Ces mesures ont été réalisées au Centre ORSTOM à Cayenne, avec le porosimètre Carlo Erba 2000, et le rayon équivalent (Réq) des pores pris en compte est compris entre 100 µm et 3,75 nm. Trois répétitions ont été réalisées pour chacun des échantillons.

1) Présentation des résultats.

Deux formes de représentation graphique sont utilisés :

- la **courbe d'indice de vide cumulé** des plus petits vers les plus grands pores, en fonction de leur taille. Dans ce cas, les volumes poreux sont exprimés en indice des vides ;

- la **courbe dérivée** de la courbe cumulative exprime la distribution du volume des pores en fonction du rayon équivalent, ou spectre de porosité.

2) Points à considérer lors de l'utilisation de la porosimétrie à mercure pour l'étude de la porosité.

Cette technique permet d'analyser une large gamme de pores, mais la porosité la plus grossière (Réq > 100µm) et la porosité la plus fine (Réq < 3,75nm) na sont pas prise en compte.

Si on veut une analyse plus complète de l'organisation du système poral de la phase argileuse il faudrait utiliser la méthode de l'isotherme de désorption d'azote [MURRAY *et al.*, (1985) ; BRUAND et PROST (1987)].

En outre la porosimétrie ne renseigne pas sur la forme des pores. Les études par analyse d'images des lames minces sont donc complémentaires.

3) Résultats.

Les résultats des deux sites sont présentés sur les figures IV.7 et IV.8 pour les sites de Cascavel et Palotina respectivement.

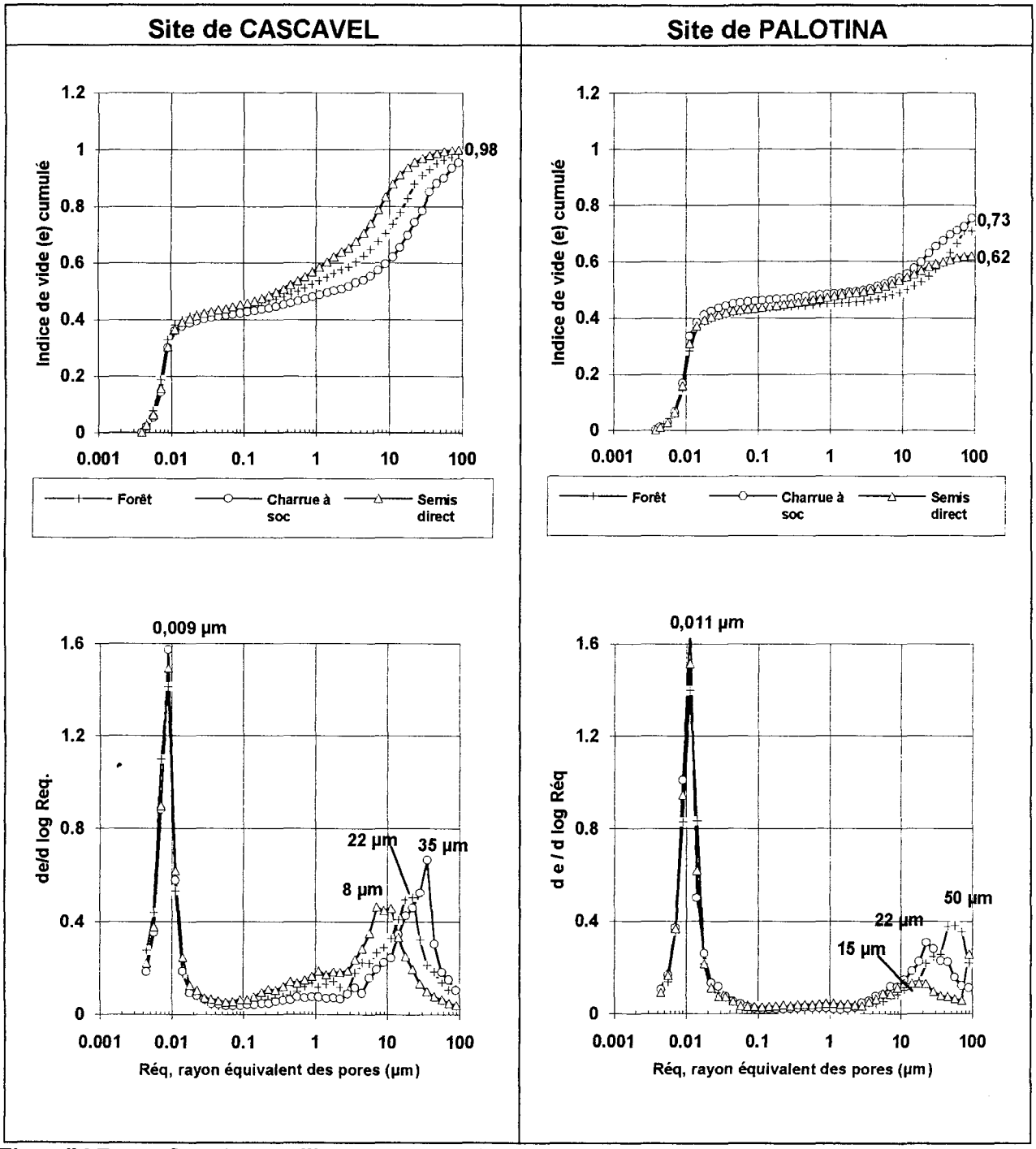


Fig. IV.7 : Courbes d'indice de vide cumulé (e), et spectre de porosité dérivés (de/dlog Réq) en fonction de la taille équivalente des pores (Req.), pour les échantillons prélevés entre 5 - 40 cm, dans les deux sites étudiés.

Pour le **site de Cascavel (fig. IV.7)** les courbes d'injection de mercure conduisent à des indices de vide cumulés égaux (e = 0,98) sur les trois situations. Cependant les spectres de porosité sont différents.

L'examen des courbes cumulées et derivées permet en fait de définir trois domaines de tailles de pores : un premier domaine pour les pores < 0,05 µm, un

deuxième domaine pour les pores entre 0,05 µm et environ 3 µm et un troisième domaine pour les pores > 3 µm.

Nous notons aussi que pour les pores > 3 µm leur taille modale decroît depuis le charrue à soc (35 µm), la forêt (22 µm) et le semis direct (8 µm).

Pour le **site de Palotina (fig. IV.7)** les courbes d'injection de mercure ont une allure assez semblable à celles, des courbes de Cascavel, mais les indices de vides cumulés sont inférieurs et décroissent dans l'ordre : e = 0,73 pour les profils sous forêt et charrue à soc, et e = 0,62 pour le profil sous semis direct.

L'examen des spectres de porosité, définit deux domaines de taille de pores : le premier domaine pour les pores < 0,05µm, et le deuxième domaine pour les pores > 3µm.

Le domaine de porosité entre 0,05 et 3µm est pratiquement inexistant.

Nous notons aussi que pour les pores > 3 µm a taille modale décroît depuis la forêt (50 µm), le labour (22 µm) et le semis direct (15 µm).

4) Discussion.

Notre but est de vérifier si la mise en valeur des sols affecte ou pas la porosité la plus fine associée à l'assemblage élémentaire des particules d'argile (porosité interparticulaire), [DIAMOND (1970) ; FIES (1984) ; BRUAND (1985) ; BRUAND *et al.*, (1990) ; CHAUVEL *et al.*, (1991) ; GRIMALDI *et al.*, (1993)].

Les résultats précédents indiquent que, pour les deux sols étudiés, les volumes poraux correspondants à ces pores interparticulaires sont exactement les mêmes dans les sols travaillés et la forêt, avec un même mode à 0,009 µm pour le sol de Cascavel et de 0,011µm pour le sol de Palotina. Par ailleurs, GRIMALDI (1989) a montré que la diminution de la taille des particules va de pair avec une diminution de la taille des pores entre ces particules. Ceci est en accord avec les donnés de surface spécifique de l'argile : 103 m²/g à Cascavel et de 86 m²/g à Palotina.

Comme la porosité d'assemblage des particules est fixe, on ne peut donc envisager une réorganisation de cette porosité du fait de la mise en valeur des sols. La porosité interparticulaire n'est donc pas modifiée par les pratiques culturales et ne dépend que de l'épaisseur des particules.

Par contre, dans le domaine de porosité entre 0,05 µm et 3 µm, les deux sites étudiés sont très différents. A Palotina cette gamme de pores est absente, même dans le profil sous forêt, alors qu'elle est présente à Cascavel. On observe alors par rapport la forêt une augmentation de cette gamme de pores dans le cas du semis direct, et une diminution dans le cas du labour. Ce dernier semble-il a

provoqué un rapprochement des agrégats du sol, donc une réduction de cette porosité "inter-agrégats".

Il semble que, dans les deux sites, il y a eu une évolution du spectre poral, en particulier pour la classe des pores Réq. > 3 µm pour la site de Cascavel. Dans ce cas, même si le volume poral cumulé ne diminue pratiquement pas, on observe (fig.IV.7) que le spectre poral évolue d'une situation à l'autre.

B) SYNTHESE ET CONCLUSION.

Dans ce chapitre, notre objectif a été de caractériser les différents niveaux d'organisation de l'espace poral des sols mis en valeur afin de mieux comprendre et prédire l'évolution des propriétés physiques des sols. A cet effet, deux approches ont été utilisées. L'approche morphologique (l'analyse d'image), et l'approche physique (porosimétrie à mercure).

L'analyse d'image nous a permis, non seulement de classer les pores en fonction de leur taille, mais surtout de les classer en fonction de leur forme, donc de leur origine. On a pu élaborer une sorte de classification en fonction de la valeur d'indice de forme. Même si les donnés doivent être manipulées avec précaution du fait de leur grande variabilité (coefficients de variations assez importants) les tendances obtenues nous ont permis avec d'autres données de conforter nos interprétations et montrer que le spectre macroporal et submacroporal a subi une profonde transformation suite à la mise en culture des sols, à l'exception sans doute de la porosité biologique. Celle-ci semble assurer l'essentiel des propriétés physiques et hydriques des sols, surtout quand ils sont tassés.

La porosimétrie au mercure nous a montré que l'organisation des sols étudiés est différente à l'échelle microstructurale puisque Cascavel possède une porosité très étalée : toutes les gammes de pores sont représentées. A Palotina les pores entre 0,05 µm et 3 µm n'existent pas. La dégradation semble être aussi liée à Cascavel à l'évolution de ces pores. On a pu aussi vérifier que le spectre poral des particules d'argile n'est pas modifié en fonction de la mise en valeur des sols et qu'il est un héritage des conditions de genèse du sol au sens large.

De l'ensemble de nos données, il apparaît qu'il n'y a jamais contradiction entre les résultats des analyses physico-chimiques, minéralogiques et les données du profil cultural, mais aussi avec celles de l'analyse d'image et de porosimétrie à mercure. Nous en ***concluons*** donc que ces différentes approches permettent de faire réellement le point sur l'organisation de la phase solide et des pores depuis l'échelle du profil jusqu'à l'arrangement des constituants élémentaires.

CHAPITRE 5 :

COMPORTEMENT PHYSIQUE ET MECANIQUE DES SOLS

Dans le chapitre précédent nous avons mis en évidence les changements d'espace poral des sols.

La question posée maintenant est de savoir si ces différences mises en évidence précédemment se manifestent au niveau des comportements physiques, surtout de la rétention d'eau et du changement de volume. Il s'agit aussi d'étudier l'aptitude à la compaction des sols étudiés.

I) ANALYSE DU COMPORTEMENT PHYSIQUE.

La relation entre la teneur en eau d'un échantillon de sol et l'état énergétique de l'eau est étroitement dépendante des caractéristiques de l'espace poral, et en particulier de la distribution de la taille des pores (HILLEL, 1971).

Il s'agit a présent d'étudier les propriétés de rétention de l'eau et de retrait-gonflement des sols dans une large gamme de contraintes hydriques.

A) MATERIEL ET METHODE.

Rappelons que des blocs non perturbés ont été prélevés dans la couche de sol entre 5 et 40 cm, et ce, à partir des descriptions des profils culturaux (*chapitre 3*). Après leur collecte, les échantillons ont été stockés dans des sacs clos afin de conserver leur humidité au moment du prélèvement. Au laboratoire, ils ont été fragmentés à la main de façon à obtenir des *"mottes"* de 10 à 15 cm^3, lesquelles ont été étudiées en dessiccation de pF=1 jusqu'à pF=7.

Les mottes ainsi préparées n'ont pas toujours d'existence structurale véritable. Elles permettent cependant d'étudier, si ce n'est la totalité de l'espace poral, tout au moins une fraction des différentes classes de pores assurant la rétention de l'eau.

1) Dispositifs utilisés pour l'application des contraintes hydriques.

Il s'agit de suivre l'évolution simultanée du volume d'eau retenue dans l'échantillon et son volume apparent en fonction du potentiel de l'eau. Il est donc nécessaire de fixer d'abord la valeur du potentiel de l'eau ou "contrainte hydrique". Dans ce qui suit, les résultats seront exprimés en unité pF qui est le logarithme décimal de la succion matricielle évaluée par la hauteur d'une colonne d'eau en centimètres (SCHOFIELD (1935)). A chaque valeur du pF on déterminera ensuite son volume apparent et sa teneur en eau.

Les courbes obtenues pourront fournir des informations sur l'évolution du système poral et sur la localisation de l'eau dans le sol. A cet effet, une relation entre la valeur du potentiel de l'eau dans un échantillon et la valeur du rayon de pore équivalent Réq (valeur maximale du rayon d'un pore cylindrique rempli d'eau) sera établie sur la base de loi de Jurin.

2) Application des contraintes.

Les mottes ont été mises à l'équilibre à une contrainte hydrique déterminée en utilisant différentes techniques :

- ***de pF = 1 à pF = 3***, un dispositif de filtration mis au point par TESSIER et BERRIER (1979). L'état hydrique matriciel est fixé en soumettant les mottes durant une semaine environ à une pression pneumatique de -1 kPa jusqu'à -100 kPa.

- ***de pF = 4 à pF = 4,2*** (-1000 kPa à -1600 kPa) on a utilisé des cellules de RICHARDS (1947). Les échantillons sont soumis à une pression pneumatique dans une presse à membrane;

- ***aux pF > 4,2 jusqu'à pF = 6,03*** (pression équivalente de -107000 kPa), les échantillons ont été placés dans des dessiccateurs à l'intérieur desquels l'humidité relative a été fixée avec des solutions salines saturées. Dans nos expériences, nous avons estimé que l'équilibre était obtenu lorsque la courbe d'évolution du poids des échantillons a atteint un palier (TESSIER, 1975) ;

- ***à pF = 7*** (pression équivalente de -1000000 kPa), séchage à 105°C.

Le tableau V.1 donne les équivalences entre les différents modes d'expression de l'état énergétique de l'eau (activité de l'eau, potentiel matriciel), ainsi que les différentes techniques utilisées pour amener des échantillons de sol à une contrainte hydrique déterminée. Nous avons aussi donné la relation générale qui lie la contrainte hydrique à la taille maximale des pores remplis d'eau.

Tableau V.1 : Niveaux énergétiques de l'eau dans le sol : correspondance entre l'humidité relative, la pression pneumatique et le pF. Relation avec le rayon maximal équivalent remplis d'eau (loi de Jurin) ou rayon de constriction (Rc). D'après [Tessier (1975) ; Grimaldi (1981) ; Tessier (1984) ; Bruand (1985)].

Humidité relative à % à 20°C	Pression		pF	Rayon de constriction (µm)	Méthodes utilisées pour amener les échantillons à l'équilibre	
	cm d'eau	KPa				
100	0	0	0	------	eau libre	
	3.2	-0.32	0.5	460	Dispositif proposé par Tessier et Berrier (1979)	Pression pneumatique
99.9993	10	-1	1	150		
	32	-3.2	1.5	47		
99.9927	100	-10	2	15		
	320	-32	2.5	4.7		
99.9275	1000	-100	3	1.5		
	3200	-320	3.5	0.47	Appareil de Richards	
99.275	10000	-1000	4	0.15		
99.88	16000	-1600	4.2	0.094		
98	28000	-2800	4.45	0.052	$CuSO_4,5H_2O$	Solutions salines Saturées
95	69200	-6920	4.84	0.021	$Na_2SO_3,7H_2O$	
90	151000	-15100	5.18	0.0097	$ZnSO_4,7H_2O$	
81	260000	-26300	5.42	0.0056	(NH_4) , SO_4	
79.5	331000	-33100	5.52	0.0044	NH_4Cl	
66	562600	-56260	5.75	0.0026	Na NO_2	
47	1070000	-107000	6.03	0.0014	K CNS	
32.5	1585000	-158500	6.2	0.00094	$CaCl_2,6H_2O$	
20	2344230	-234423	6.37	0.00063	CH_3COOK	
8.5	3548133	-354813	6.55	0.00042	H_2SO_4 (1.6)	
3.2	5011900	-501190	6.7	0.00029	H_2SO_4 (1.7)	
-----	10000000	-1000000	7	0.00015	Séchage à l'étuve à 105°C	

3) Mesures.

Pour chaque valeur de potentiel de l'eau (pF), le volume apparent des mottes a été déterminé par la mesure de la poussée d'Archimède dans le pétrole [MONNIER *et al.*, (1973)], et la teneur en eau pondérale par gravimétrie après séchage à 105°C. Selon MONNIER *et al.*, (1973), avec un tel protocole, l'opération de ressuyage et la mesure du volume (poussée hydrostatique), constituent les deux principales sources d'erreur.

Les mottes (plus de 500 au total pour les différents traitements), ont été soumises à un pF déterminé (de 1 à 7) pour une mesure de teneur en eau ou de masse volumique. Le nombre de répétitions pour chaque valeur de pF a été au minimum de 10 et, dans chaque cas, pour bien caractériser et aussi apprécier l'hétérogénéité de la structure des volumes pédologiques travaillés, la moyenne, le coefficient de variation, ainsi que l'intervalle de confiance à 95% ont été calculés. Le test de la plus petite différence significative (PPDS) (DAGNELIE, 1969), a été appliquée à l'ensemble de l'échantillonnage.

B - PROPRIETES DE RETENTION DE L'EAU ET DE RETRAIT.

1) Présentation générale.

Les résultats des mesures du comportement des mottes, exprimés en indice des vides, d'eau et d'air, sont présentés en annexe et reportés figure V.1. Pour les changements de volume apparent ils indiquent les évolutions suivantes :

- à Cascavel, dans toutes les situations et aux bas pF, les sols sont toujours plus poreux qu'à Palotina ;
- à Cascavel, sous forêt et sous semis direct, le changement de volume du sol est faible aux pF < 5. A Palotina au contraire la variation de volume est importante dans toute la gamme de pF ;
- un comportement similaire est observé à Cascavel, dès lors que le sol est labouré avec la charrue à soc.

Pour la rétention de l'eau les courbes semblent à première vue avoir des formes similaires. La rétention de l'eau est généralement un peu plus forte à Cascavel qu'à Palotina.

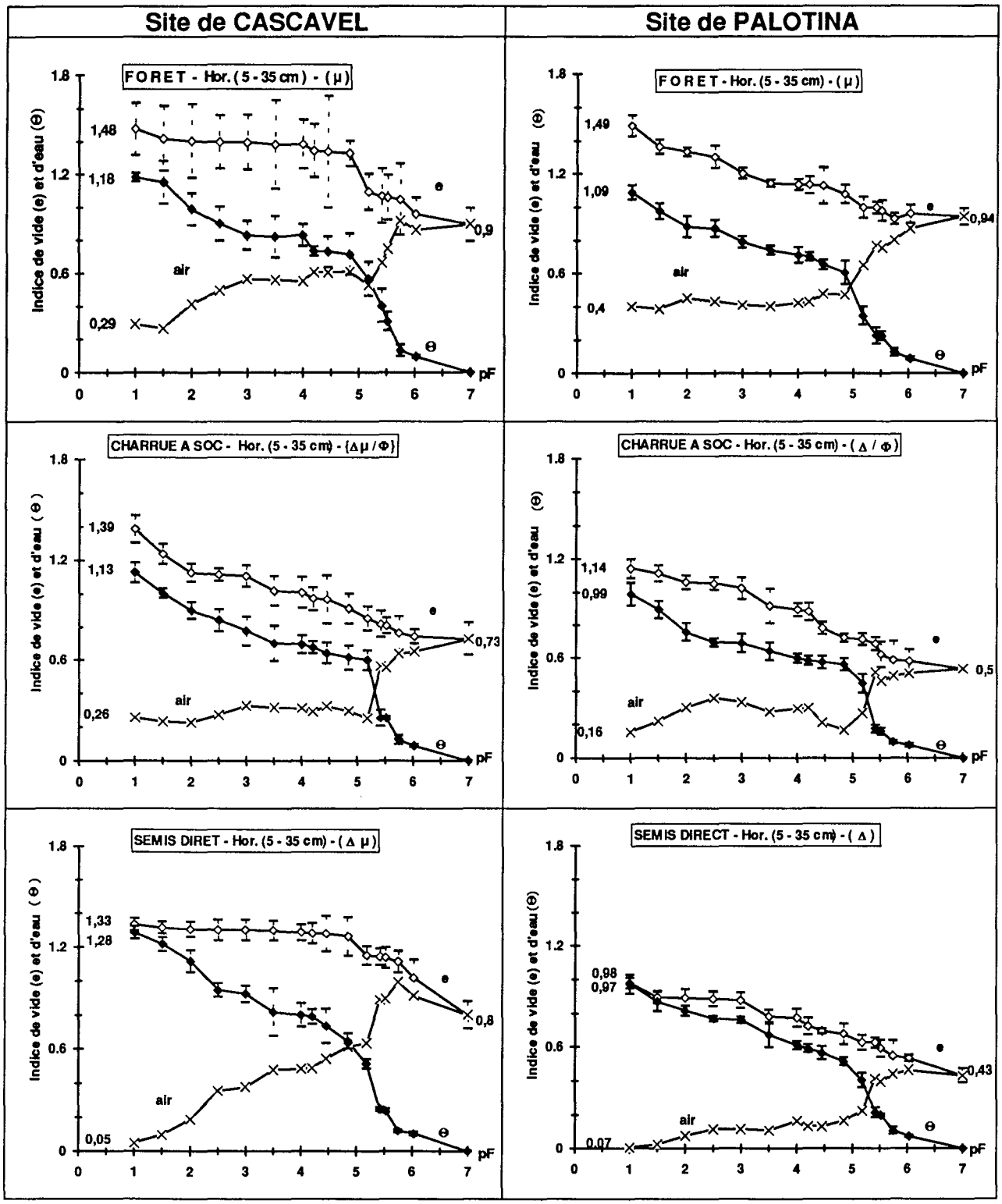


Fig. V.1 : Evolution des indice de vide, d'eau et d'air des différents traitements pour les deux sites étudiés.

2) Analyse de l'évolution de l'indice de vides.

Sur chaque site, nous allons comparer les trois situations (forêt, charrue à soc et semis direct), en utilisant les données rassemblées figure V.2. Le test de la plus petite différence significative entre deux moyennes (PPDS) a été appliqué à l'ensemble des données.

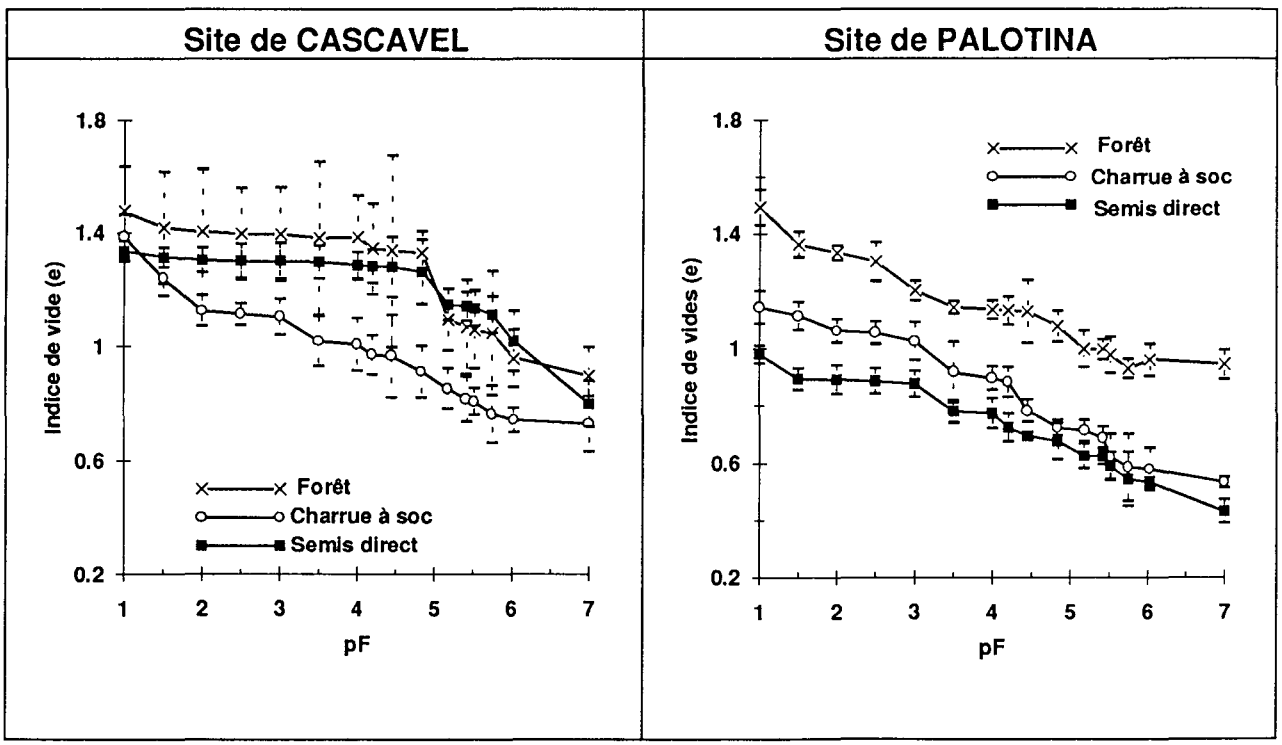


Fig. V.2 : Evolution des indices de vides des différentes situations étudiées dans les sites de Cascavel et Palotina.

A Cascavel, aux bas pF, les indices des vides moyens décroissent dans l'ordre suivant: forêt, semis direct et charrue à soc. Ces données doivent être interprétées avec prudence car les différences d'indice de vide entre la forêt et le semis direct ne sont pas significatives su seuil de 5%. En revanche, une différence significative au seuil de 5% est observée entre la forêt et la charrue à soc d'une part, et entre la charrue à soc et le semis direct d'autre part, sauf à pF = 1.

A Palotina, les indices de vides décroissent dans l'ordre suivant : forêt, charrue à soc et semis direct. Le test statistique indique que les différences sont significatives au seuil de 5% entre les indices de vides du sol sous forêt et ceux des sols cultivés.

3) Variations de l'indice d'eau.

Les résultats sont reportés figure V.3 pour Cascavel et Palotina.

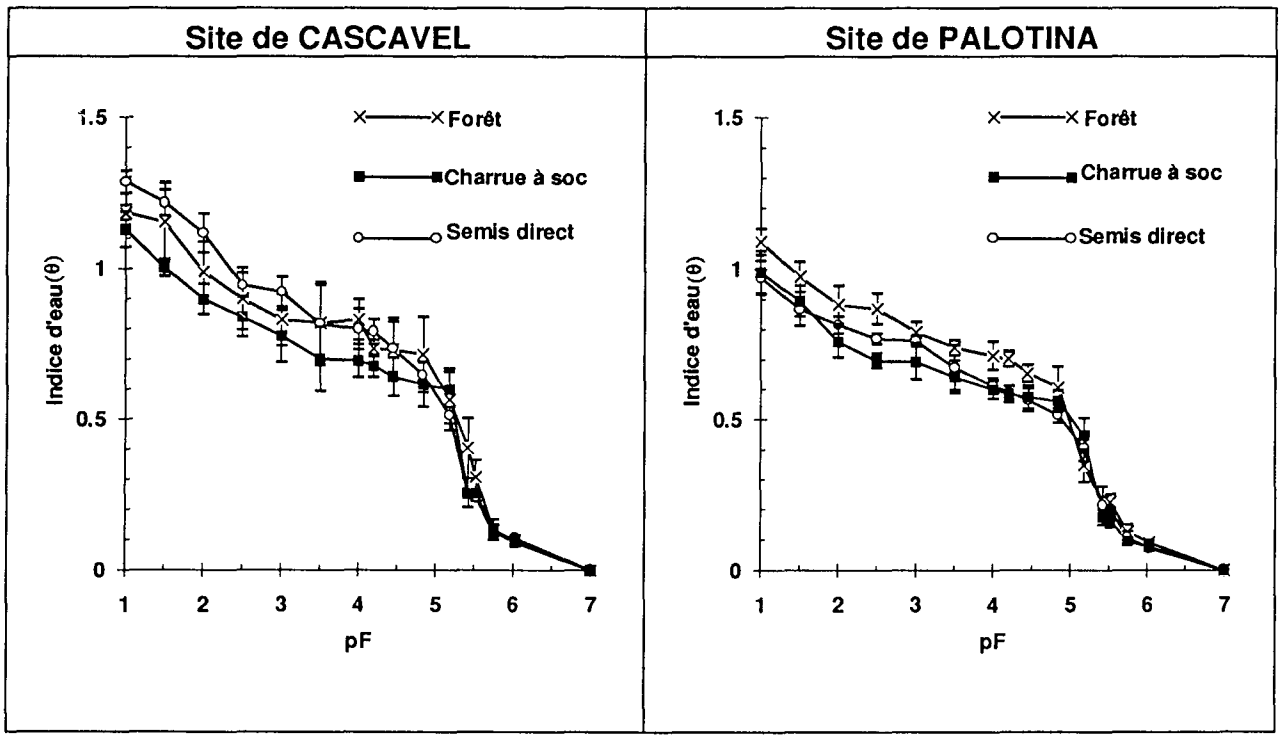


Fig. V.3 : Evolution des indices d'eau des différents situations étudiées dans les sites de Cascavel et Palotina.

A Cascavel les courbes présentent une forme en S caractéristique avec la moitié de la perte d'eau au voisinage de pF = 5. De petites variations de teneurs en eau sont observées entre la forêt, le semis direct et la charrue à soc. Aux bas pF la teneur en eau diminue dans l'ordre suivant :

semis direct > forêt > charrue à soc.

Ces différences ne sont pas cependant significatives au seuil de 5 %.

A Palotina les courbes ont aussi une allure en S et les variations de contenu en eau sont similaires dans les différentes situations. Cependant, d'une situation à l'autre, l'ordre des courbes est différent de celui de Cascavel puisqu'aux bas pF le contenu en eau semble décroître dans l'ordre suivant :

forêt > charrue à soc > semis direct (entre pF = 1,5 et pF = 3,5)

Cependant à Palotina comme à Cascavel, les différences de contenu en eau entre les situations (forêt, charrue, semis direct) ne sont pas significatives au seuil de 5 %.

4) Discussion.

La discussion portera sur quatre points :

- évolution de l'indice d'eau en fonction du potentiel de l'eau (pF) : signification des courbes de rétention d'eau ;
- porosité de drainage et rétention de l'eau ;
- étude du retrait.

4.1) Evolution de l'indice d'eau en fonction du potentiel de l'eau (pF) : signification des courbes de rétention d'eau.

Les données relatives au contenu en eau dans des gammes de pF définis sont rassemblées tableau V.2 et figure V.4 .

Tableau V.2 : Variation de l'indice d'eau entre différents pF, pour l'ensemble des sites étudiés.

Site	Profil	ΔΘ (%) entre :			
		(pF = 1 et 3)	(pF = 3 et 4,8)	(pF = 4,8 et 5,5)	(pF = 5,5 et 7)
	Forêt	0,35	0,11	0,41	0,31
Cascavel	Charrue à soc	0,35	0,16	0,36	0,25
	Semis direct	0,36	0,27	0,41	0,24
		(pF = 1 et 2)	(pF = 2 et 4,8)	(pF = 4,8 et 5,5)	(pF = 5,5 et 7)
	Forêt	0,21	0,27	0,38	0,22
Palotina	Charrue à soc	0,23	0,20	0,40	0,16
	Semis direct	0,15	0,30	0,32	0,20

Ces données permettent d'identifier des domaines d'énergie de rétention de l'eau différents d'un type de sol à l'autre et de mettre en évidence une certaine évolution des propriétés hydriques en fonction des pratiques. Ces domaines sont les suivants :

- pF 1 à 3 pour Cascavel et pF 1 à 2 pour Palotina,
- pF 3 à 4,8 pour Cascavel et pF 2 à 4,8 pour Palotina,
- pF 4,8 à 5,5 pour les deux sites,
- pF 5,5 à 7 pour les deux sites.

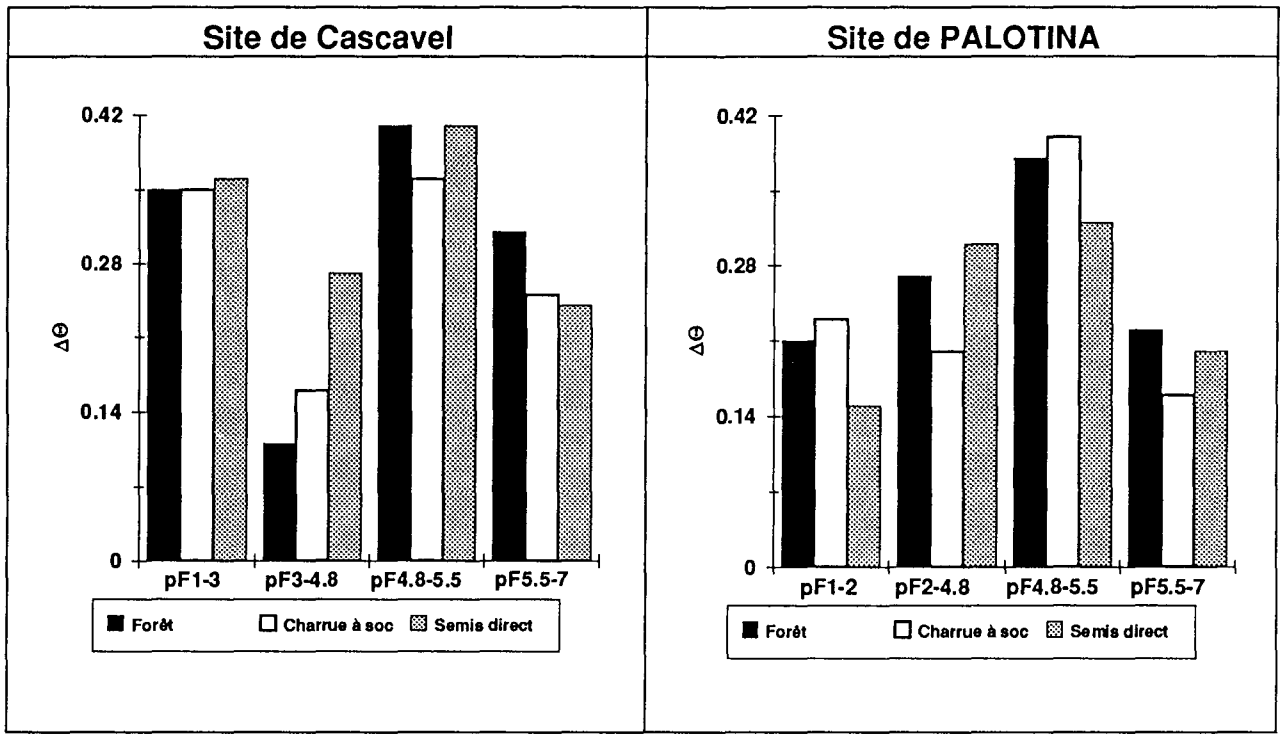


Fig. V.4 : Variation de l'indice d'eau entre différents pF pour l'ensemble des sites étudiés.

Ces différents domaines énergétiques correspondent en fait à des niveaux d'organisation de la phase solide très différents.

D'après les données antérieures obtenues en analyse d'image, aux bas pF les sites de rétention pour l'eau sont des organisations submacroscopiques. Pour les pF entre 3 et 4,8, les pores qui se désaturent ont une taille équivalente comprise entre 1 µm et 0,01 µm. Nous remarquons qu'il existe un domaine de rétention de l'eau tout à fait particulier à ces sols puisqu'il concerne une gamme extrêmement étroite de pF entre 4,8 et 5,5. En vertu de la loi de Jurin-Laplace cela correspond à des pores de 0,021 et 0,0044 µm. Enfin il existe une porosité résiduelle au delà de pF = 5,5.

Cette distribution de la porosité n'est pas surprenante si on la compare à d'autres sols argileux riches en kaolinite d'Afrique [KILASARA (1989) ; KILASARA et TESSIER, 1991 ; HARTMANN (1991)] du Brésil [CARVALHO (1990) ; CARVALHO *et al.*, (1991) ; LUCAS (1989) ; LUCAS *et al.*, (1984 et 1986) ; CHAUVEL (1982) ; CHAUVEL *et al.*, (1986, 1987 et 1991) ; GRIMALDI (1989) ; GRIMALDI *et al.*, 1993)] et de Guyane (GRIMALDI et BOULET,1990), décrits par d'autres auteurs. Ils montrent l'importance décisive des organisations à différentes échelles de la kaolinite associée à des oxydes [CHAUVEL (1977) ; CHAUVEL et al., (1976)].

4.2) Porosité de drainage et rétention de l'eau.

Nous savons qu'une bonne partie du régime hydrique des sols (circulation, rétention, vitesse d'évaporation) est en relation avec l'énergie de rétention de l'eau dans le sol. Les plantes elles-mêmes ne peuvent se développer que dans un domaine de potentiel de l'eau très étroit.

Nous avons classé les pores en fonction de l'énergie de rétention de l'eau. A cet effet, nous avons estimé que les pores d'un rayon équivalent > 47 µm (pF = 1,5) assurent la circulation rapide de l'eau et l'aération du sol. Nous appellerons ce type de porosité **" porosité de drainage "**. Entre pF = 1,5 et pF = 4 l'eau contribue à l'alimentation hydrique des plantes, c'est **" l'eau utile "**.Nous avons pris pour référence pF = 1,5 qui est en accord avec plusieurs travaux sur la capacité au champ ; citons HALL *et al.*, (1977). Au delà de pF = 4 l'eau est trop fortement retenue et ne peut donc ,être utilisée par les végétaux, c'est l'eau fortement liée ou **" non utile "**.

Tableau V.3 : Volume poral total (cm^3/g), de l'eau de drainage, de l'eau utilisable et de l'eau non utile pour les différentes situations.

Site	Profil	Volume poral de :		
		Porosité de drainage	Eau utile	Eau non utile
Cascavel	Forêt	0,27	0,32	0,83
	Charrue à soc	0,24	0,30	0,70
	Semis direct	0,09	0,42	0,80
Palotina	Forêt	0,38	0,31	0,77
	Charrue à soc	0,22	0,30	0,60
	Semis direct	0,02	0,26	0,60

Nous remarquons d'abord que la ***porosité de drainage*** concerne un volume de pores limité comparé aux autres classes de pores (tableau V.3 et fig. V.5). Elle diminue du profil sous forêt, au profil sous charrue à soc, puis au profil sous semis direct. Dans les deux situations nous voyons donc que la mise en culture induit depuis la forêt une réduction de la porosité de drainage.

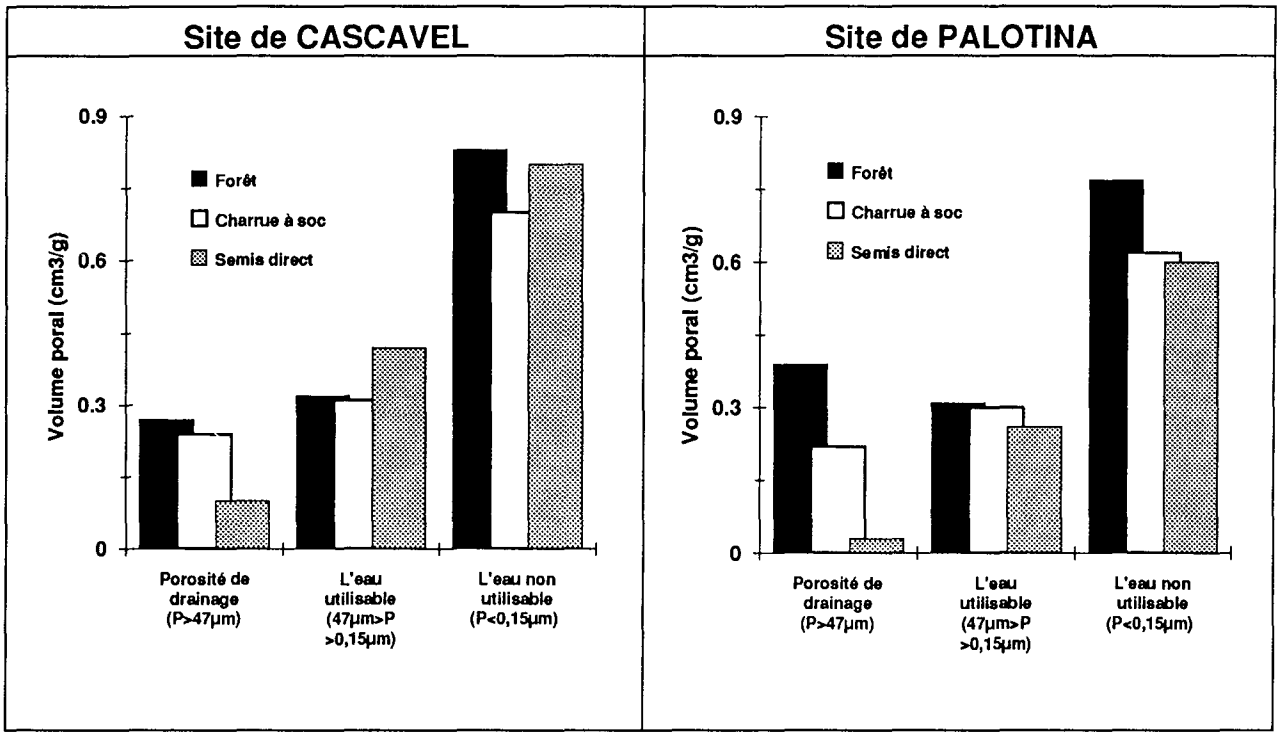


Fig. V.5 : Volumes poral total (cm^3/g), de l'eau de drainage, de l'eau utilisable et du point de flétrissement pour les trois situations des deux sites étudiés.

Cependant la réduction de cette porosité est beaucoup plus accentuée à Palotina (quasi disparition avec le semis direct (0,02 cm^3/g) qu'à Cascavel (0,09 cm^3/g) .Nous pouvons donc considérer que la diminution de la porosité de drainage est un élément notable de la dégradation physique des sols. A ce sujet, il faut rappeler ici qu'une différence de 0,01 cm^3/g au niveau du volume de pore correspond à un volume de 10 litres par tonne de sol, ce qui fait environ une différence de 70 litres de pores par tonne de sol entre les situations sous semis direct de Cascavel et de Palotina.

En ce qui concerne ***l'eau utilisable pour les plantes,*** les sites ont aussi un comportement différencié :

- à Cascavel, sous forêt et avec le semis direct, la teneur en eau utile est similaire. En revanche, avec le semis direct, l'eau utile augmente considérablement et passe de 0,32 à 0,42 cm^3/g ;

- à Palotina en revanche avec le semis direct l'eau utile pour les plantes diminue.

Par rapport à ***l'eau non utilisable*** (pF > 4), les sites présentent aussi un comportement assez différencié :

- l'eau non utilisable est toujours présente en quantité plus importante, à traitement identique, à Cascavel par rapport à Palotina ;

- la réduction du volume des micropores semble la règle à Palotina avec la mise en valeur des sols. A Cascavel, c'est la charrue à soc qui semble affecter le volume des micropores.

A partir de ces résultats, la conclusion qui s'impose est qu'à Cascavel le semis direct induit des propriétés de rétention d'eau intéressantes. Il préserve aussi une partie de la porosité de drainage et d'aération. A Palotina c'est le contraire, car la technique culturale du semis direct fait presque complètement disparaître la porosité de drainage et d'aération. Les pores assurant la rétention de l'eau utile sont aussi affectés.

Au total, il apparaît donc que les techniques culturales induisent des changements des différents types de pores dans les deux sols. Chaque pratique culturale présente cependant une certaine spécificité dans l'évolution des différents types de pores. Nous reviendrons sur ce point par la suite.

4.3) Etude du retrait.

Les courbes de retrait donnent des informations sur l'évolution du volume apparent des échantillons en fonction du contenu en eau. Leur principal intérêt est d'indiquer les modifications de la géométrie de l'espace poral du matériau [Haines, 1923 et Stirk, 1954 in : BRUAND (1986) ; TESSIER (1980 et 1984) ; GRIMALDI (1981) ; SORANI (1985) ; SORANI *et al.,* (1987) ; BRUAND (1985 et 1986) ; GRIMALDI et TESSIER (1986) ; CARVALHO (1990) ; MAPANGUI (1992) ; PERRET (1992)].

Les courbes de retrait sont reportées figure V.6.

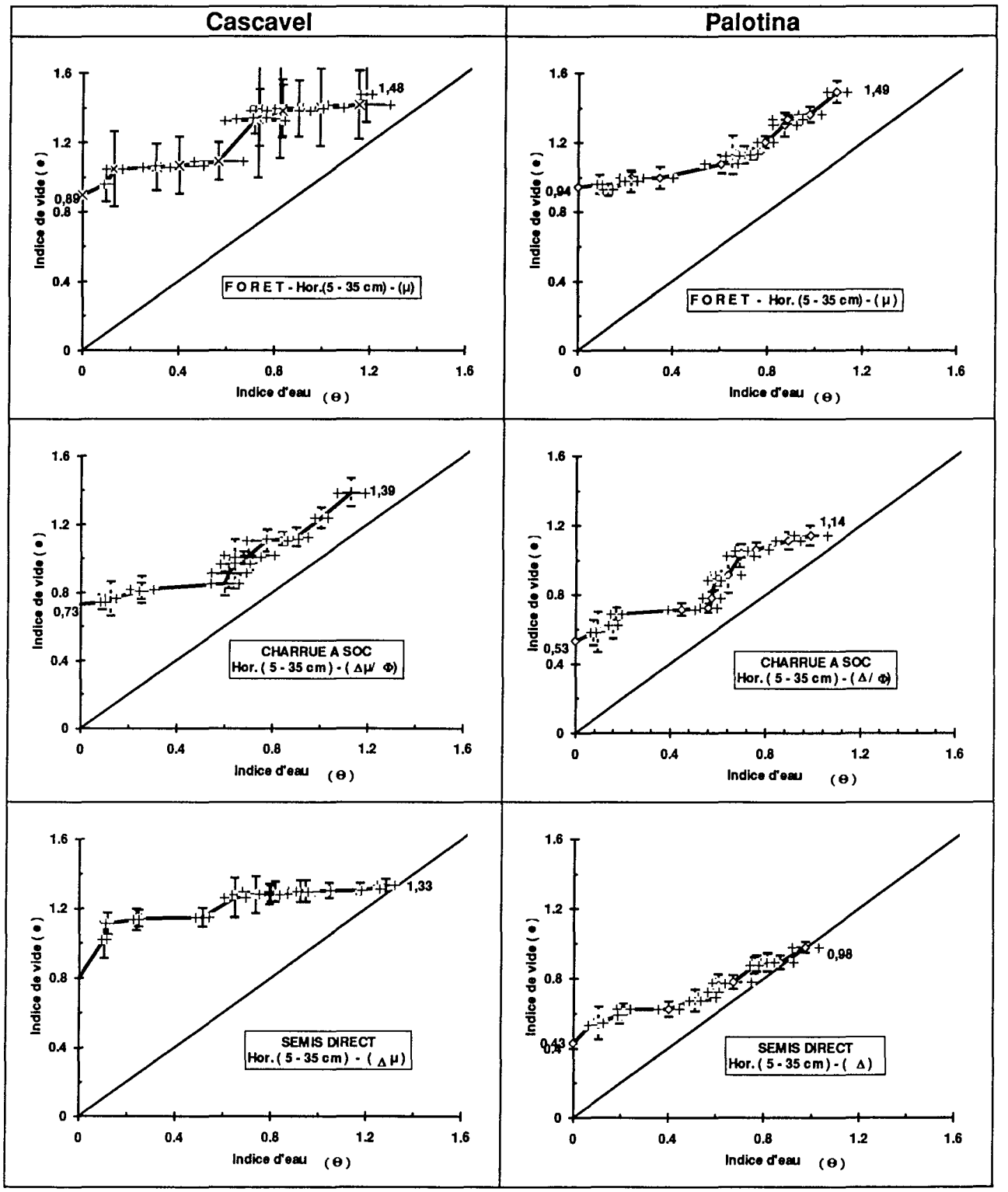


Fig. V.6 : Evolution des courbes de retrait sur des mottes des deux sols étudiés.

Tout d'abord, le retrait global d'un matériau peut être calculé à partir de la relation suivante :

$$\Delta e / 1 + e,$$

où Δe est la variation de l'indice de vide consécutive à la dessiccation et **e** l'indice de vide initial.

Pour évaluer le retrait et l'aptitude du matériau à se structurer nous avons pris pour référence l'indice de vide des mottes mesuré à pF = 1. Les résultats ont été reportés dans le tableau V.4 et sur la figure V.7.

Tableau V.4 : Retrait global entre pF = 1 et 4,8 pour les différentes situations à Cascavel et à Palotina.

Site	Profil	Δe / 1 + e (%) : (pF = 1 - 4.8)
Cascavel	Forêt	6,4
	Charrue à soc	25
	Semis direct	3,2
		(pF = 1 - 4,8)
Palotina	Forêt	20
	Charrue à soc	24
	Semis direct	18

Il est particulièrement intéressant d'étudier le retrait, dans le domaine de pF où l'eau n'est pas retenue spécifiquement dans la matrice argileuse (pF < ou égaux à 4,8). Ce domaine de pF est aussi celui le plus concerné par les variations probables *in situ*.

Nous voyons que le retrait est faible à Cascavel sous forêt (6,4%) et sous semis direct (3,2%) alors qu'il est toujours important à Palotina (~20%). En outre la charrue à soc semble induire à Cascavel un comportement de type Palotina (24%) (retrait important).

Il apparaît donc que, suivant les situations, les deux sols présentent ou non un retrait macroscopique dans la gamme des faibles pF, notamment pour les valeurs

d'indice d'eau > 0,6 ce qui correspond à des pF < 4,8. Dans ce cas, même les sols à structure "poudre de café" ne peuvent être considérés comme des matériaux rigides.

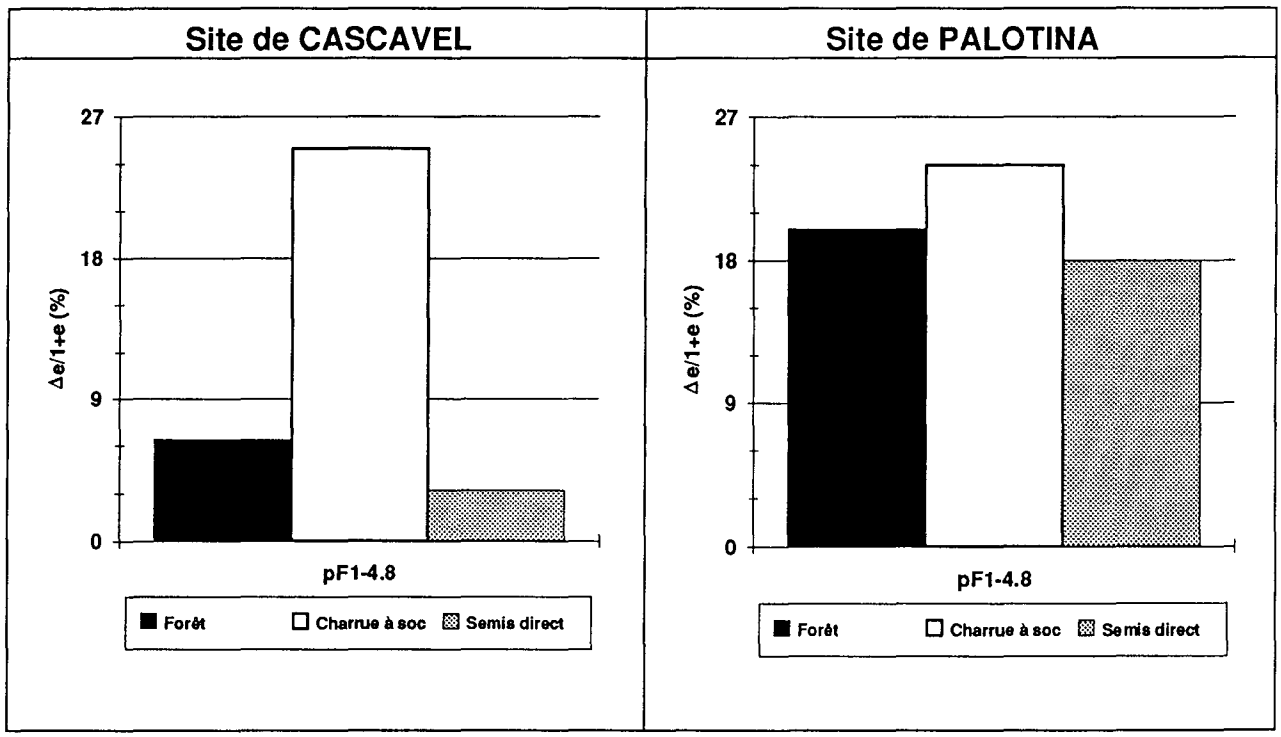


Fig. V.7 : Retrait global entre pF = 1 et 4,8 pour les sites de Cascavel et Palotina.

Afin d'aller plus loin dans l'analyse du comportement nous allons analyser conjointement l'évolution du volume macroscopique et l'évolution du contenu en eau. En outre, nous allons, pour différents potentiels de l'eau, analyser l'évolution du rapport $\Delta e/\Delta\theta$ (tableau V.5 et figure V.8), que nous appellerons ***"coefficient de retrait"***.

Tableau V.5 : Rapport Δe / $\Delta\theta$, calculé entre pF = 1 et pF = 4,8 pour les différentes situations.

Site	Profil	$\Delta e / \Delta\Theta$ (pF = 1 - 4,8)
Cascavel	Forêt	0,32
	Charrue à soc	0,95
	Semis direct	0,11
Palotina	Forêt	0,86
	Charrue à soc	0,98
	Semis direct	0,66

On voit (tableau V.5 et figure V.8), que pour les deux sites, quelle que soit la situation considérée, le rapport $\Delta e / \Delta\theta$ est compris entre 0,1 et 1. Lorsque le coefficient est égal à 1 cela signifie que toute variation du contenu en eau entraîne une variation identique du volume apparent. Le comportement est alors caractéristique des sols très argileux et gonflants comme les vertisols. *A contrario*, quand le coefficient de retrait est égal à 0, le matériau poreux est rigide et se rapproche de celui d'un grès ou d'une craie.

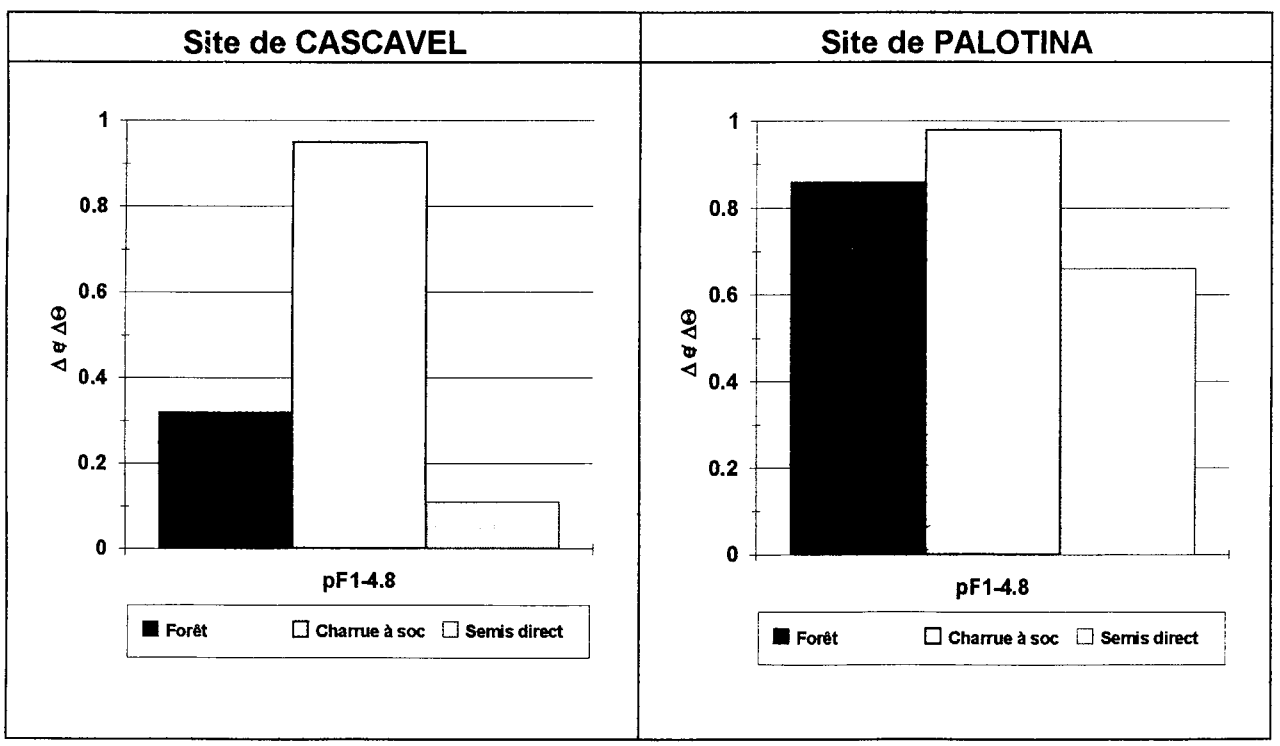


Fig. V.8 : Retrait global entre pF = 1 et 4,8 pour les différentes situations étudiées

On peut donc dire qu'à partir du sol sous forêt dont le comportement se rapproche de celui d'un sol sableux ($\Delta e / \Delta\theta = 0{,}3$), la charrue à soc tend à induire un comportement de type argileux ($\Delta e / \Delta\theta \sim 1$). Il faut donc admettre que des particules au début agrégées se sont trouvées libérées par l'action de la charrue à soc.

Ainsi au cours du temps, des agrégats constitutifs de la " poudre de café " ont été partiellement détruits par le travail du sol. Ceci signifie aussi que des pores interagrégats au départ de grande taille (~50 µm), ont disparus. Le résultat final est un retrait macroscopique important jusqu'à un pF élevé (4.8).

Il apparaît donc qu'à Cascavel le travail du sol avec la charrue à soc semble désolidariser l'organisation des d'agrégats existant dans le sol sous forêt, les rapprochant, ce qui n'est pas le cas du semis direct. Ce comportement est sans

doute lié au mode spécifique d'intervention de l'outil. Compte tenu de ce que l'on sait, la charrue tend à rompre le sol tandis que l'effet du semis direct sur le sol serait autre, d'une certaine façon moins dégradante en conservant les discontinuités existant entre les particules et agrégats du sol sous forêt.

Cette interprétation suggère aussi que le comportement spécifique des sols de Palotina (déformabilité quasi idéale), serait donc liée à l'organisation du sol résultant de la pédogenèse. Nous avons vu que les agrégats sont alors partiellement en continuité et donc que le retrait peut alors mieux s'exprimer. Ceci est probablement du aussi à l'absence quasi complète de forces de cohésion interparticulaires, comme par exemples entre les argiles et les oxydes, qui ne peuvent bloquer la déformation de la structure du sol et empêcher le rapprochement des particules et des agrégats du sol.

Le caractère gonflant va aussi de pair, à Palotina, avec des valeurs de l'indice d'air très différentes. L'exemple de Palotina illustre cette évolution puisque l'on passe de **a** # 0,4 sous forêt à **a** # 0,2 avec la charrue et à **a** entre 0 et 0,1 avec le semis direct. La valeur de l'indice d'air apparaît ainsi comme un indice intéressant de dégradation de l'espace poral au même titre que la porosité de drainage.

C - SYNTHESE ET CONCLUSION.

Le but de ce chapitre était d'analyser l'évolution des caractéristiques physiques des sols du fait de leur mise en valeur.

En premier lieu, la porosité des sols est une conséquence directe de l'organisation des matériaux pédologiques. Ainsi, à Cascavel, la porosité des sols est toujours plus importante qu'à Palotina, et ce quelle que soit la gamme de pF considérée.

Les facteurs extrinsèques, notamment l'utilisation d'outils, sont susceptibles de faire évoluer les sols. C'est à Cascavel que l'organisation et les propriétés du sol semblent avoir le plus évolué par la charrue à soc puisque le sol acquiert des propriétés de retrait-gonflement qu'il n'avait pas auparavant. A Palotina les propriétés de retrait-gonflement existent au départ (forêt) et les pratiques peuvent alors être très dégradantes sur la porosité de drainage, l'aération et la réserve utile.

Compte tenu de ce qui précède, la conclusion qui semble s'imposer à ce niveau de la discussion est qu'il faudrait continuer la pratique du semis direct à Cascavel et maintenir le labour avec la charrue à soc à Palotina.

II) ETUDE DU TASSEMENT ET INFLUENCE DE L'HISTOIRE HYDRIQUE.

Les études précédentes ont montré que la mise en culture de sols a provoqué des modifications des propriétés physiques des sols. Il semble en premier lieu que les sols présentent une sensibilité différenciée à la densification, laquelle peut aussi bien être liée à des cycles de dessiccation-humectation qu'à un effet conjugué avec des pressions mécaniques.

Il s'agit maintenant d'analyser l'aptitude au tassement des sols en faisant intervenir ces deux types de paramètres.

Les systèmes de culture se distinguent en effet par la fréquence et l'intensité des pressions mécaniques exercées sur le sol et par les effets ultérieurs du climat et de l'activité biologique. La conjugaison de ces effets sur les "Latosols Roxo", est cependant mal connue.

Parmi les travaux réalisés en laboratoire sur ce sujet FAURE (1971 et 1978) ; FAURE et FIES (1972) ; ZIMMER (1981) ; GUERIF (1982) ; GUERIF et FAURE (1979) ; CORDIER (1983), ont étudié le tassement de matériaux pédologiques soumis à un compactage dynamique ou statique ; ces auteurs ont précisé l'influence d'un certain nombre de facteurs (intensité de la contrainte mécanique, teneur en eau du matériau, teneur en argile et en matières organiques) sur l'état physique du sol considéré macroscopiquement.

GRIMALDI (1981) et COULON (1988) ont étudié l'évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques *puis* hydriques, en prenant en compte différents niveaux d'organisation du matériau. CAMARA (1982) et TESSIER (1984) ont montré le rôle des cycles de dessiccation et d'humectation sur la microstructure d'argiles de différentes natures. SORANI *et al.* (1987) ont étudié le comportement physique d'échantillons à structure conservée d'un sol argileux, en fonction de leur état hydrique. AZZAOUI (1988) analyse le comportement mécanique et l'organisation de matériaux argileux soumis simultanément à des contraintes mécaniques et hydriques.

Enfin, SALA (1991) et TAVARES FILHO (1992 et 1994) ont montré que c'est le potentiel matriciel de l'eau, plus que la teneur en eau du matériau, qui semble déterminer les changements de comportement au compactage de massifs d'agrégats argileux.

La présente étude se situe dans la continuité de ces différents travaux. Nous utiliserons en particulier les méthodes mises en oeuvre par AZZAOUI (1988),

SALA (1991) et TAVARES FILHO (1992), pour contrôler les pressions mécaniques et les potentiels hydriques.

A) COMPACTION DE MASSIFS D'AGREGATS. COMPORTEMENT PHYSIQUE AVANT COMPACTAGE ET COMPORTEMENT AU COMPACTAGE.

1) Matériel et méthodes.

1.1) Présentation des matériels utilisés.

Des échantillons ont été prélevés dans ***l'horizon B***, *autour de 150 cm de profondeur dans le profil sous forêt des deux sites.*

Le tableau V.6 ci-dessous, résume les caractéristiques des deux matériaux.

	Cascavel	Palotina
Profondeur	150 cm	150 cm
% d'argile	80%	80%
% de sable	2,1%	6,1%
C. Organique	0,83 %	0,38 %
C/N	13	8
pH	acide	neutre
ΔpH	> 0	> 0
C.E.C.	9,6 - 4,6	10,5 - 6,6
S/T	11%	74%
Densité réelle	2,88	2,94
Minéralogie	Minéraux 1:1, 2:1 et oxydes de fer (10%) et gibbsite(~15%)	Minéraux 1:1, 2:1 et oxydes de fer (~10%).

1.2) Méthodes.

La démarche suivie a consisté à soumettre des massifs d'agrégats préparés à différentes valeurs du potentiel de l'eau à des pressions mécaniques d'intensité croissante. Par la suite, nous avons analysé le comportement physique (rétention de l'eau, retrait, gonflement) des massifs d'agrégats, compactés ou non, en les soumettant à différents cycles de dessiccation et réhumectation.

Le mode de préparation du matériau est un facteur important à contrôler. Dans nos expériences nous avons travaillé sur des massifs d'agrégats, c'est à dire des matériaux discontinus mais macroscopiquement homogènes. A cet effet, les échantillons de sol ont été fragmentés avec précaution, à l'état humide, et tamisés pour obtenir des agrégats < à 5 mm. Cette taille a été choisie car, après un tamisage, nous nous sommes rendu compte qu'il y avait une distribution assez régulière des tailles entre 1 et 5 mm pour les deux matériaux.

Les massifs d'agrégats ont été préparés à un potentiel de l'eau donné comme décrit auparavant. Par la suite, pour compacter les différents matériaux, nous devions disposer d'une méthode qui permettait la mesure des variations de volume, et maîtriser l'ensemble des paramètres qui déterminent les caractéristiques mécaniques (les états structuraux initiaux, les valeurs des contraintes hydriques et mécaniques).

Parmi les méthodes existantes, le test Proctor, quoique rapide, ne permet pas d'apprécier les variations de volume poral (l'état initial demeurant mal défini), ni de traduire l'énergie mise en jeu en termes de pression appliquée (GUERIF, 1982). C'est pour cela que nous avons choisi le test de compactage uniaxial (test oedométrique) (MIEUSSENS *et al.,* 1985), qui est repris pour des applications agronomiques [ZIMMER (1981) ; GUERIF (1982) ; CORDIER (1983)].

Pour appliquer une pression mécanique, un piston est placé à l'intérieur du tube pF au dessus du massif d'agrégats (figure V.9). Une pression de gaz est alors appliquée sur le piston qui se transmet intégralement au massif d'agrégats. L'appareil fonctionne alors comme un oedomètre. La pression mécanique unidimensionnelle appliquée a été comprise entre 32 kPa et 1 MPa. L'équilibre à une pression donnée est atteint presque instantanément. Nous avons attendu une minute à chaque palier.

2) Résultats et interprétations.

2.1) Comportement physique des sols avant compactage.

Les résultats obtenus sont rassemblés dans le tableau V.7, et reportés sur la figure V.10.

L'indice d'eau est systématiquement plus élevé à Cascavel qu'à Palotina ;

L'indice de vide est aussi plus élevé à Cascavel et la variation d'indice de vide entre pF = 4 (-1 MPa) et pF = 1 (-1 kPa) est faible.

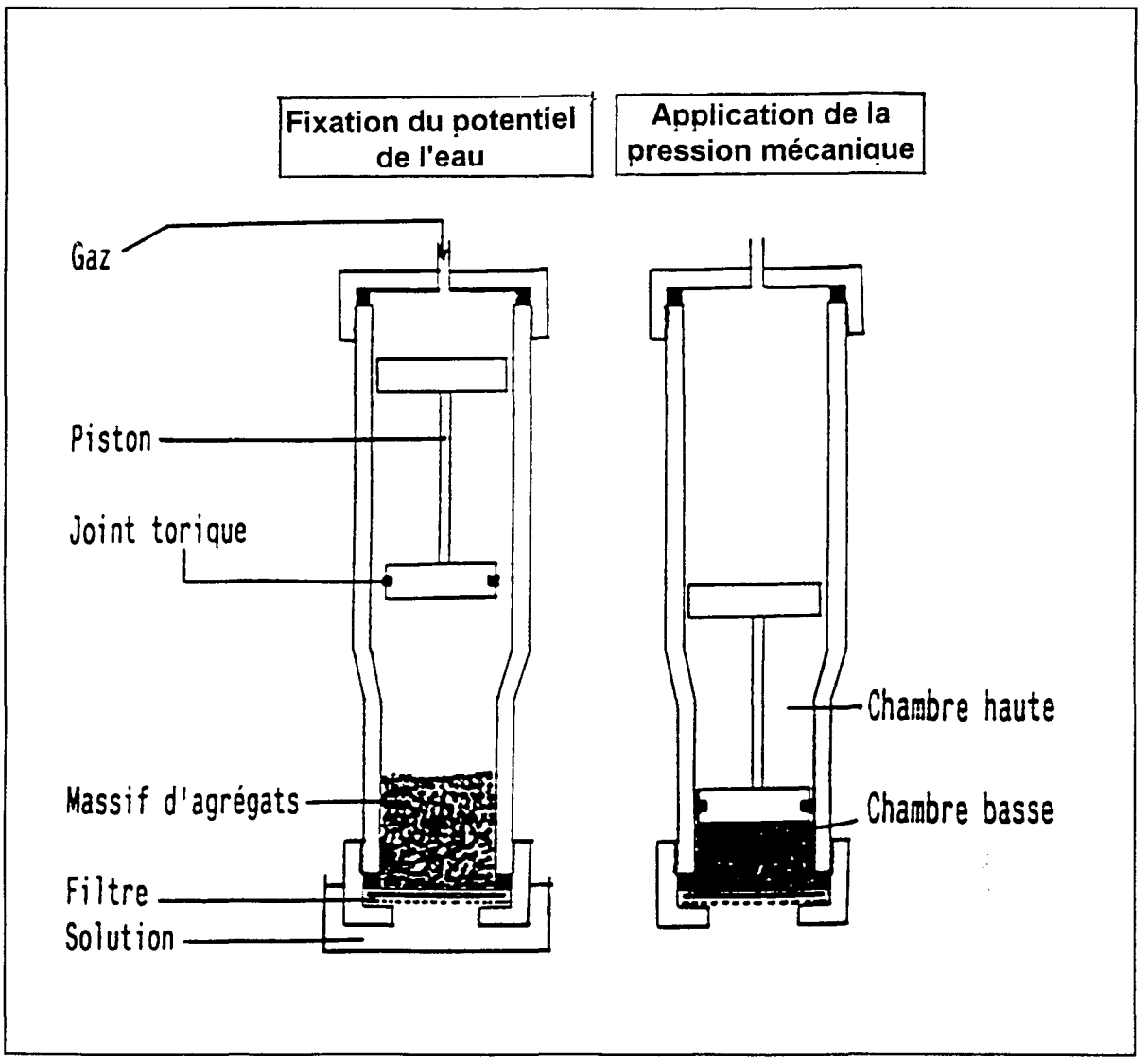


Figure V.9 : Schéma du dispositif d'application des contraintes au laboratoire (d'après SALA et TESSIER, 1992).

Tableau V.7 : Indices de vide (e), d'eau (Θ), d'air (a) et coefficients de variations(C.V.) des massifs d'agrégats avant compactage.

	Cascavel					Palotina				
pF	e	C.V.(%)	θ	C.V.(%)	a	e	C.V.(%)	θ	C.V.(%)	a
1	1,96	6,50	1,69	6,48	0,27	1,30	9,80	1,10	7,70	0,20
1.5	1,92	5,78	1,51	6,76	0,41	1,29	8,60	1,06	6,85	0,23
2	1,91	4,52	1,23	5,42	0,68	1,28	6,75	0,94	7,09	0,34
2.5	1,89	5,66	1,07	7,03	0,82	1,28	8,36	0,79	6,83	0,49
3	1,89	4,89	1,02	6,46	0,87	1,27	7,28	0,76	8,67	0,51
3.5	1,88	6,55	1,01	5,56	0,87	1,27	9,70	0,72	7,80	0,55
4	1,87	7,62	0,98	9,10	0,89	1,25	9,79	0,70	9,88	0,55
Δ (pF1-pF4)	0,09	-----	0,71	-----	-----	0,05	-----	0,40	-----	-----

L'indice d'air varie régulièrement entre pF = 4 et pF = 1 pour devenir faible à pF = 1 (seulement de 0,27 pour l'échantillon du site Cascavel et 0,20 pour l'échantillon du site Palotina). On n'arrive cependant jamais à la saturation ; notons qu'à pF = 4, l'indice d'air est assez différent entre les deux échantillons (de 0,89 pour l'échantillon du site de Cascavel et 0,55 pour l'échantillon du site de Palotina).

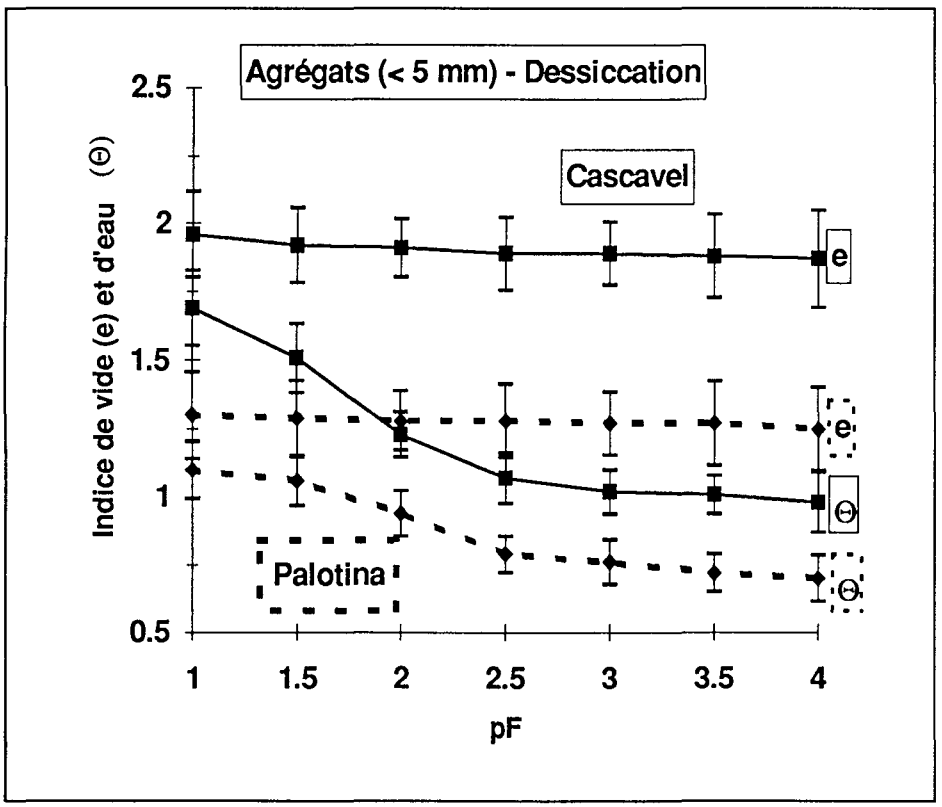


Fig. V.10 : Indice de vide (e) et d'eau (Θ) des massifs d'agrégats non compactés mis en équilibre à différents potentiels de l'eau exprimés en unité pF.

**** Discussion :***

Les résultats montrent d'abord que l'échantillon de Cascavel retient plus d'eau que l'échantillon de Palotina, et ce, quel que soit le potentiel de l'eau. Cette différence s'accroît à partir de pF = 2 (pF<2), et tend à montrer que le volume des pores de taille supérieure à 5 µm est plus important à Palotina qu'à Cascavel.

2.2) Comportement des massifs d'agrégats sous compression oedométrique.

Les résultats obtenus après la compression oedométrique sont présentés en annexe et reportés sur la figure V.11.

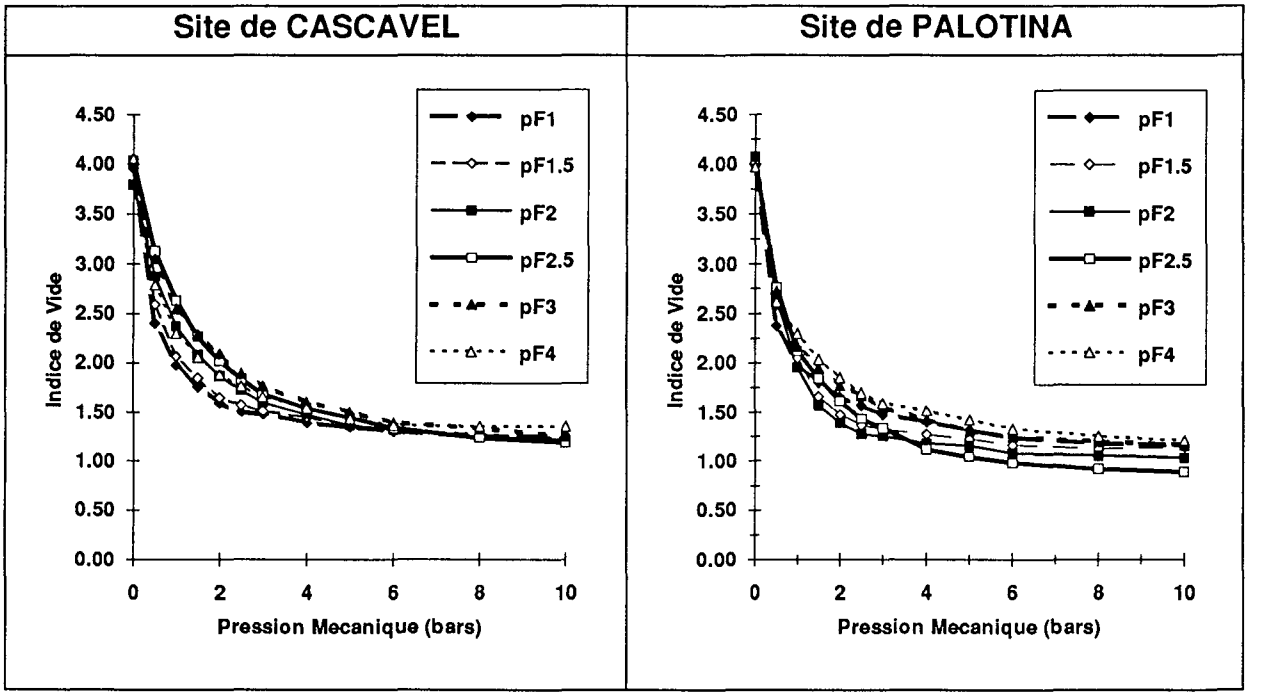


Fig. V.11 : Courbes de compactage de massif d'agrégats préparés à différents états hydriques initiaux.

L'essentiel de la réduction de volume est obtenue pour les pressions mécaniques inférieures à 4 bars (400 kPa) pour le site Palotina et pour les pressions mécaniques entre 5 bars (500 kPa) et 6 bars (600 kPa) pour le site Cascavel.

Les tassements les plus faibles correspondent en outre aux potentiels hydriques initiaux les plus élevés (-1 kPa, pF = 1) et les plus bas (- 1 MPa, pF = 4).

C'est à -32 kPa (pF = 2,5), à Cascavel comme à Palotina, que le tassement est le plus important (Fig. V.12).

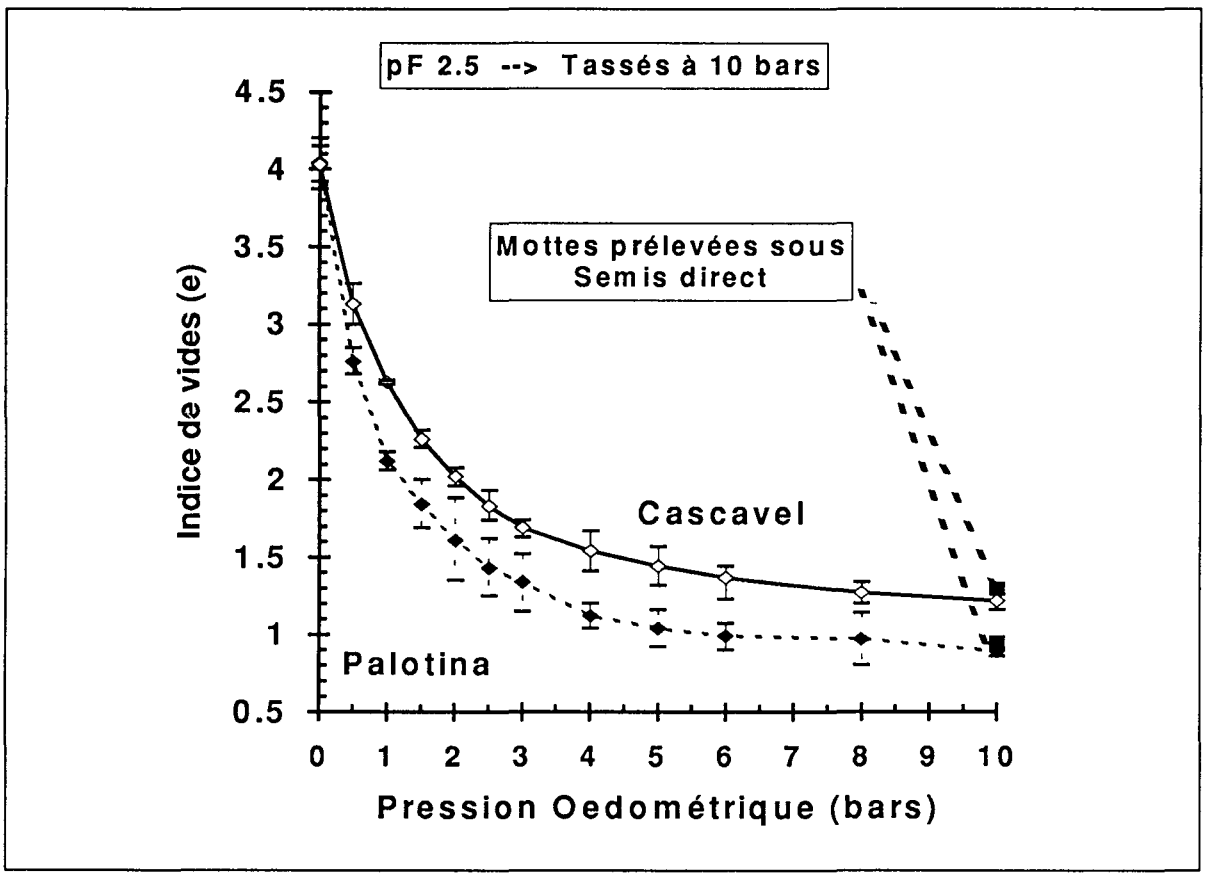


Fig. V.12 : Courbes de compactage des massifs d'agrégats préparés à pF = 2,5 et comparaison avec les mottes des mêmes sols sous semis direct.

**** Discussion :***

Il est intéressant de comparer les résultats d'indice de vide à une compression mécanique de 10 bars sur les massifs d'agrégats à ceux des situations au champ. Nous notons qu'ils sont comparables à ceux du semis direct (§ II.2). **Ainsi une seule compression mécanique, dans des conditions d'humidité appropriées semble en mesure de provoquer une compaction du sol analogue à celle du terrain.**

La figure 13a montre que les massifs d'agrégats provenant des deux sols sont sensibles au compactage dans une gamme de teneurs en eau très étroite, mais très différente entre eux (*28 à 29%* pour Palotina et *35 à 37%* pour Cascavel). On voit sur la figure 13b que cela correspond aux potentiels de l'eau voisins de -32 kPa

(pF = 2,5). Nous retrouvons ici les résultats de SALA (1991) et TAVARES FILHO *et al*, (1992 et 1994).

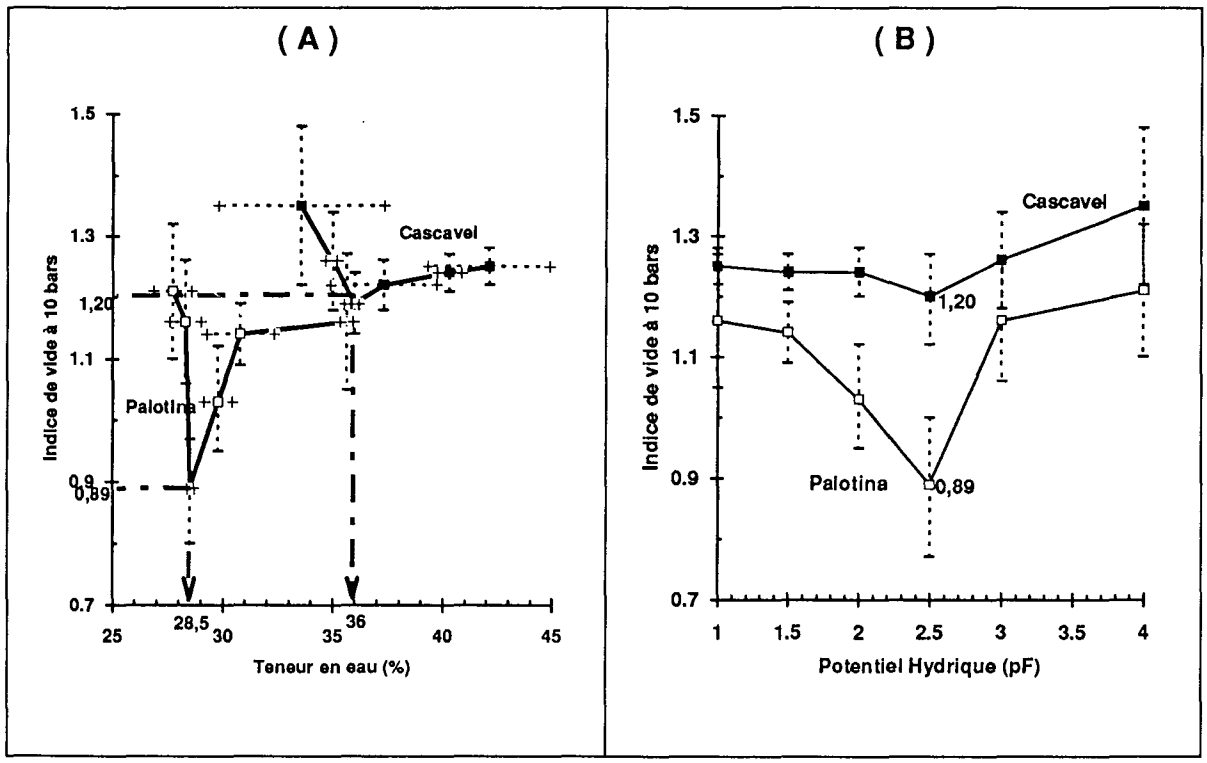


Fig. V.13 : Evolution de l'indice de vide total du massif d'agrégats, pour différentes pressions appliquées, en fonction de la teneur en eau finale (A) ou du potentiel de l'eau (B).

La question posée à ce stade de la discussion est de savoir pourquoi les matériaux pédologiques sont plus sensibles au compactage dans un domaine de potentiel restreint et situé au voisinage de -32 kPa.

Les massifs d'agrégats que nous avons préparés présentent essentiellement deux types de pores. Les uns résultent de l'assemblage des particules argileuses, c'est en grande partie la porosité inter-cristallites, les autres résultent de l'assemblage des agrégats, c'est la porosité inter-agrégats. Nous savons que dans le sol étudié, la porosité intra-agrégats est saturée en eau à pF = 2,5. Dans l'espace inter-agrégats les forces d'hydratation susceptibles d'intervenir à grande distance sont les forces capillaires (SALA et TESSIER, 1992). Au voisinage de pF = 2,5 les rayons de courbure des ménisques sont de taille suffisante pour qu'une partie de l'espace poral inter-agrégats soit rempli d'eau. Les ménisques capillaires peuvent

ainsi contribuer à rapprocher les agrégats en exerçant une traction sur leurs parois (SALA et TESSIER, 1992).

Lorsque la plupart des pores sont remplis d'eau (à - 1 kPa par exemple, pF = 1), le matériau devient peu à pas compressible, comme a pu le vérifier FAURE (1978).

En revanche, à pF 4, l'eau remplit seulement l'espace poral inter-cristallites. Les forces capillaires ne pourraient plus contribuer à réorganiser le massif d'agrégats (SALA et TESSIER, 1992). De plus, la cohésion des agrégats est d'autant plus élevée et l'angle de frottement interne d'autant plus grand (FAURE, 1978) que le pF est plus élevé; Dans ces conditions, les agrégats n'ont pas un comportement plastique (l'argile hydratée n'a pas de propriétés "lubrifiantes"). Il en résulte que, sous l'action d'une même pression mécanique, les agrégats se déforment d'autant moins que le pF est plus élevé ; l'assemblage des agrégats, après compactage, est alors moins serré et le tassement plus faible.

B) REVERSIBILITE DU TASSEMENT ET IMPORTANCE DE L'HISYOIRE HYDRIQUE.

Après compactage à 1 MPa, les massifs d'agrégats (environ 50 g de masse sèche) ont été soumis à différentes histoires hydriques :

- équilibre à - 1 kPa (pF = 1), puis *dessiccation progressive*, jusqu'à - 1000 MPa (pF = 7),

- *dessiccation* préalable à pF = 6 (directe) puis *réhumectation progressive* jusqu'à pF = 1,

Des mottes non compactées de le couche de sol entre 120 - 150 cm des deux sols ont été soumises aux mêmes histoires hydriques.

1) Courbes de retrait

Elles sont rassemblées en annexe et figure V.14. De leur examen il ressort que :

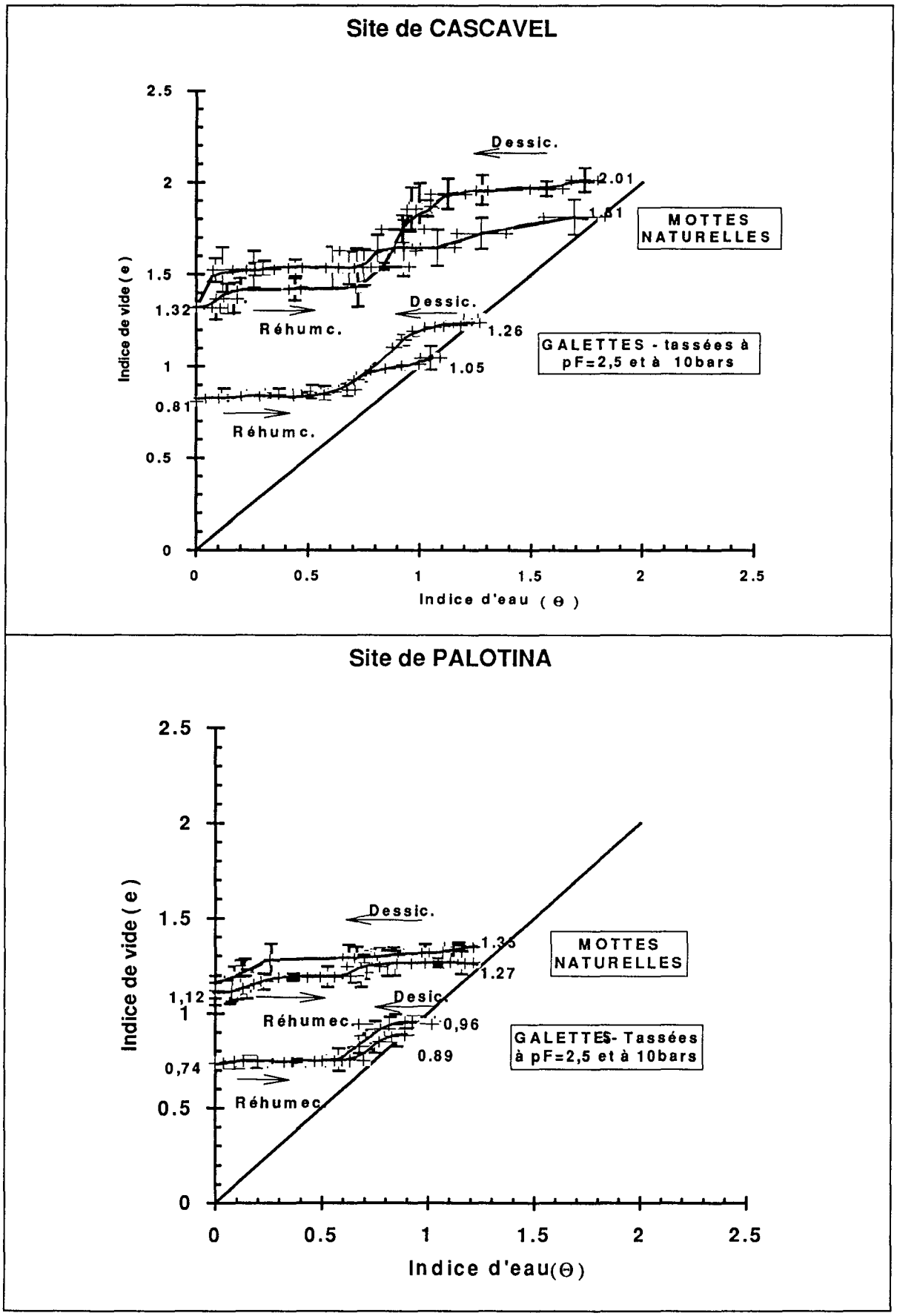


Fig. V.14 : Courbes de retrait et gonflement des échantillons naturel et compactés à 10 bars des deux sites étudiés.

- le sol de Palotina est toujours plus compact que le sol de Cascavel, aussi bien au niveau des mottes naturelles que des galettes ;

- dans les deux sols, on observe une augmentation de la compacité des mottes non compactés et des galettes compactées, au cours de la dessiccation ;

- à pF = 1 les matériaux compactés à 10 bars sont saturés en eau ;

- le plus grande partie du retrait, aussi bien pour les mottes que pour les galettes, se produit à Cascavel au voisinage de $\theta = 1$. A Palotina le phénomène est moins amplifié et il intervient à une valeur de l'indice d'eau plus basse ($\theta \sim 0,7$) ;

- un retrait résiduel se produit aux faibles valeurs de θ ($\sim 0,2$). Il est peut marqué sur les galettes, plus important sur les mottes du sol non compacté.

**** Discussion:***

a) Importance de la dessiccation sur la rétention de l'eau.

Nous avons rassemblé les courbes de rétention des quatre échantillons figure V.15.

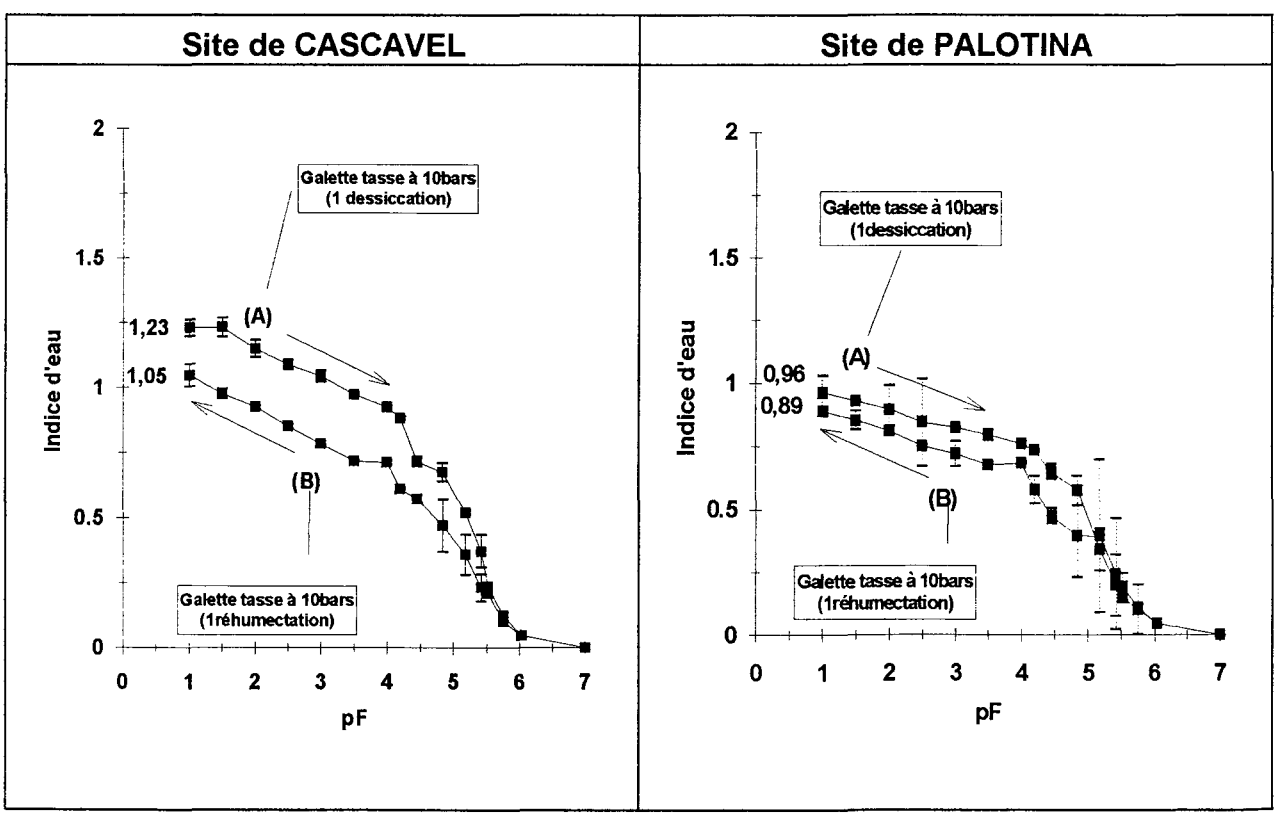


Fig V.15 : Courbes de rétention d'eau des galettes compactées à pF=2,5 et à 10 bars, des échantillons de Cascavel et Palotina (horizon B).

Nous voyons que le compactage des agrégats joue un rôle important sur la rétention de l'eau car :

- en première dessiccation les matériaux compactés retiennent moins d'eau. D'après la figure V.15 les changements de propriétés de rétention de l'eau interviennent surtout aux pF élevés (pF > 4.8) ;

- en réhumectation la teneur en eau est toujours plus faible qu'en dessiccation. En outre, la rétention de l'eau est plus faible si l'échantillon a été compacté au préalable.

On remarque aussi que la pente des courbes de rétention d'eau est, de pF = 1 à pF = 4,4 identique en dessiccation et en humectation, à Cascavel comme à Palotina. C'est donc dans le domaine des pF élevés (entre 4.4 et 4.8) que le sol perd la plus grande partie de son eau d'hydratation.

Ceci nous amène à la conclusion qu'une fois le sol tassé, un cycle de dessiccation-humectation est en mesure de réduire de façon largement irréversible le volume microporal. Il ne s'agit pas d'un phénomène d'histérésis classique car on ne revient pas à la teneur en eau initiale à pF = 1 même si le matériau a été réhydraté au maximum, c'est à dire au voisinage de pF = 1.

On peut donc dire que le compactage et les cycles de dessiccation-humectation peuvent induire un changement du spectre microporeux des sols, essentiellement des pores de taille inférieures à ~ 60 nm (pF > 4,4).

b) Evolution du spectre microporal poral.

Nous nous intéresserons ici aux échantillons compactés, à l'issue d'une première dessiccation.

Les courbes d'indice de vide cumulée et dérivée, en fonction de la taille équivalente des pores sont reportées figure V.16 :

- les courbes d'introduction de mercure ont une allure assez semblable avec des indices de vides finaux quasiment égaux (e = 0,80 pour Cascavel et e = 0,76 pour Palotina).

- les familles de classes de pores sont semblables à ce que nous avons vu auparavant sur des mottes non compactées, à savoir un premier mode à 0,009µm

pour Cascavel et à 0,011µm pour Palotina. Un deuxième mode apparaît clairement à 5µm pour les deux échantillons. Cependant le volume de pores compris entre 0,05 et 1µm est faible pour les deux matériaux (e ~ 0,2).

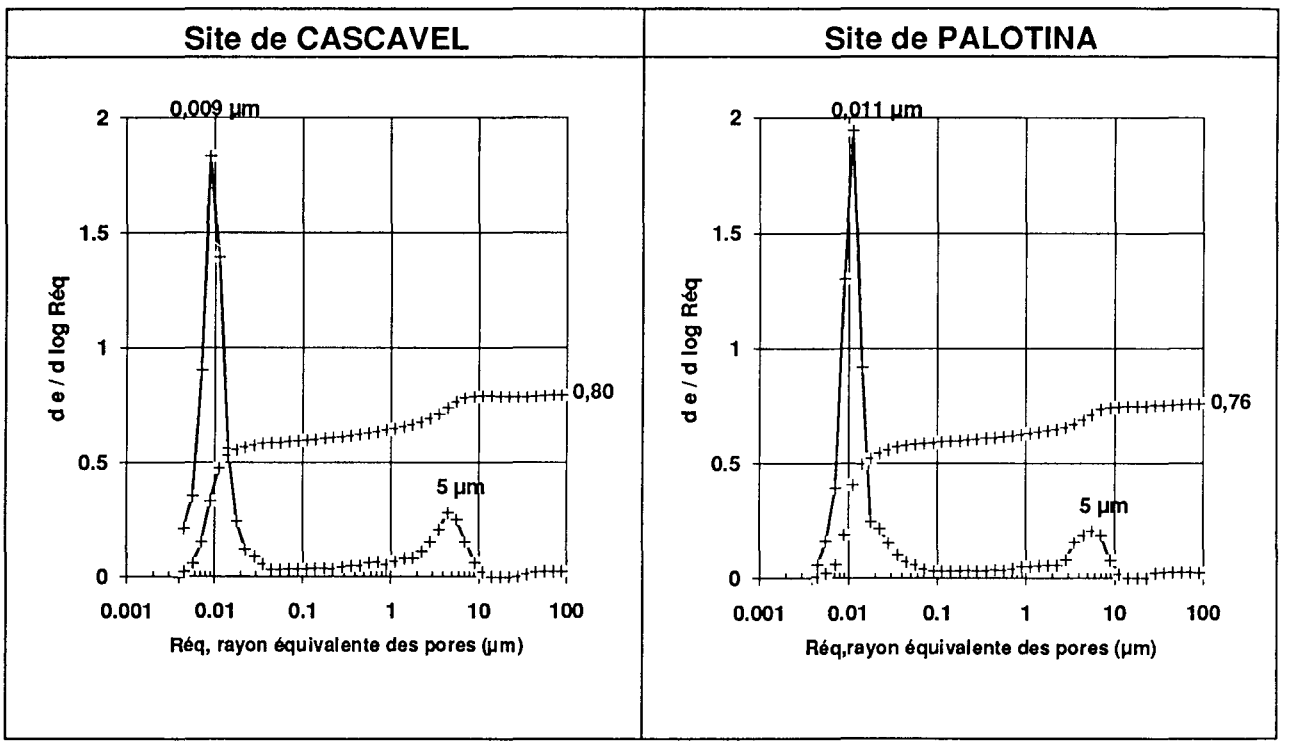


Fig V.16 : Courbes d'injection de mercure obtenues sur des galettes compactées des échantillons de Cascavel et Palotina (horizon B).

Nous voyons donc que dans les échantillons compactés et après dessiccation le volume poreux délimité par les particules élémentaires d'argiles représente environ 80 % du volume total accessible au mercure. Ce résultat est cohérent avec les résultats d'autres auteurs [DIAMOND (1970) ; FIES (1984) ; BRUAND (1985) ; BRUAND *et al.*, (1990) ; GRIMALDI et BOULET (1990)].

Si on compare les courbes de spectre poral des sols tassés à 10 bars aux mottes du sol sous forêt (fig. V.16 et IV.7 respectivement), on ne peut mettre en évidence avec la porosimétrie au mercure, une évolution de la porosité inter-cristallite sous l'effet du compactage. De fait les courbes de rétention d'eau au delà de pF = 5.4 sont similaires, quel que soit le traitement du sol (dessiccation, compactage). Leur taille est d'après la loi de Jurin < ~ 6 nm. En revanche, ce sont les pores les plus grossiers, entre 60 et 6 nm qui paraissent affectés par les pratiques culturales.

Nous pensons donc que la porosité inter-cristallites n'est pas fondamentalement modifiée par l'histoire énergétique récente du sol. Ceci confirme les résultats de GRIMALDI (1989) qui a montré, en étudiant en porosimétrie au mercure un sol ferralitique de l'Amazonie brésilienne, que la taille des particules d'argile (kaolinite dans le présent cas), détermine largement la taille des pores intercristallites.

C - SYNTHESE ET CONCLUSION

Ce chapitre est avant tout consacré à l'étude du tassement de matériaux pédologiques sous l'effet d'une pression mécanique et à la mise en évidence de leur comportement ultérieur en fonction d'une histoire hydrique définie.

L'étude du tassement des massifs d'agrégats indique que le matériau du site de Palotina possède une plus forte sensibilité au tassement que le matériau du site Cascavel. On constate aussi que le tassement est plus important aux potentiels de l'eau voisins de - 32 kPa (pF = 2,5), qu'il ne l'est aux plus hauts potentiels et aux plus bas potentiels de l'eau. La dessiccation des échantillons compactés accroît encore la différence de compacité des deux matériaux étudiés. Autrement dit, plus le matériau est compact au départ (matériau du site de Palotina) plus la dessiccation est efficace.

L'étude du comportement des échantillons soumis à un cycle complet de dessiccation-réhumectation montre qu'un compactage suivi d'une dessiccation a des effets néfastes. Un tel traitement empêche la régénération potentielle de la structure de ces matériaux, surtout pour la matériau le plus compactable, c'est-à-dire celui du site de Palotina.

Ces résultats indiquent aussi que la sensibilité d'un matériau au seul compactage, même suivi d'une dessiccation ultérieure, n'est pas nécessairement un critères suffisant pour évaluer la dégradation physique d'un sol. Il est préférable d'examiner l'effet d'un cycle *complet* de dessiccation puis de réhumectation pour en voir les effets.

L'étude des relations entre les comportements physiques et le spectre poral des matériaux indique aussi que le compactage n'affecte que la porosité inter-agrégats. Il résulte de ce qui précède que, plus que le compactage lui-même, c'est l'application successive de contraintes mécaniques *puis* hydriques qui apparaît néfaste pour ce type de sol.

CHAPITRE 6 :

INTERPRETATION GENERALE DES RESULTATS

Rappelons d'abord que ce mémoire s'inscrit dans le cadre de préoccupations d'ordre agronomique et concerne l'étude de la dégradation des sols du Parana au sud du Brésil. Parmi les facteurs en cause dans la dégradation, le compactage du sol et l'évolution des structures superficielles sont à l'origine de changements profonds des propriétés des sols. Les principales conséquences en sont une baisse des rendements des cultures dont l'origine peut d'ailleurs être multiple (problèmes phytosanitaires et déficits hydriques par exemples). Il s'agit de prendre en compte l'évolution de facteurs propres aux sols dont l'évolution conditionne le maintien à long terme du patrimoine sol.

La dégradation de l'espace poral avec ses répercussions sur de multiples aspects du fonctionnement des sols (réserve en eau, pénétration racinaire, aération, infiltration, formation de croûte de surface, etc...) s'est imposée à tous les observateurs du milieu comme une cause principale des chutes de rendement. Dans un travail sur l'évolution des sols à plus ou moins long terme, il ne faut cependant pas négliger en parallèle une dégradation chimique, en particulier les phénomènes d'aluminisation des sols et donc de phytotoxicité.

La démarche que nous avons suivie dans ce mémoire nous a amené à envisager les sols sous deux aspects :

- la relation entre les comportements physiques et mécaniques des sols leurs constituants et leur degré d'évolution pédogénétique;
- le rôle des pratiques culturales par la mise en évidence de l'action spécifique des diverses sollicitations auxquelles sont soumis les sols depuis leur mise en valeur, directement (travail du sol par exemple) et indirectement (impact des cultures sur le sol à plus long terme) ;

Dans cette synthèse nous nous proposons donc de situer nos résultats dans un contexte géologique et d'évolution pédogénétique afin d'en tirer quelques conséquences agronomiques. Nous montrerons la contribution de facteurs anthropiques à l'évolution de quelques paramètres de l'agrosystème. Enfin, nous conclurons sur les modifications éventuelles des pratiques pour mieux gérer le milieu.

I) GENESE DES SOLS ET CONSEQUENCES AU PLAN AGRONOMIQUE.

A) LE SUBSTRATUM GEOLOGIQUE ET LES PREMIERES PHASES DE L'ALTERATION

Les deux sites étudiés sont situés dans une région à climat tropical humide, au milieu de plateaux à relief peu marqué. A Cascavel le relief est cependant plus ondulé et le réseau hydrographique plus dense qu'à Palotina. L'organisation des sols dans l'espace semble alors proche de ceux à caractère ferrallitique d'Afrique comme a pu l'évoquer HARTMANN *et al.*, (1994) sous forêt (vallées assez profondes).

Les sols étudiés se sont développés sur des matériaux volcaniques (basaltes). La connaissance que nous avons des basaltes est relativement globale et a fait l'objet de nombreux travaux en géologie cités en première partie.

A Cascavel et à Palotina, les auteurs s'accordent pour dire il s'agit d'un même écoulement basaltique dont la composition tend cependant à varier d'un lieu à l'autre. La roche " saine " que nous avons étudiée a été prélevée au voisinage des sites. Nous avons admis que la composition du basalte est suffisamment homogène à l'échelle du site pour être représentative du matériau parental à partir duquel le sol s'est développé. Le basalte de Cascavel contient des feldspaths riches en albite. A Palotina la roche présente la même composition avec cependant la présence de feldspaths/plagioclases un peu plus riches en calcium (anorthite).

Nos résultats indiquent aussi que la roche " saine " est en fait déjà altérée (présence de smectite). L'apparition de smectite dans le basalte semble devoir être la règle puisque tous les auteurs signalent sa présence. La néogenèse de smectite se produirait du fait de l'altération hydrothermale au moment du refroidissement de la roche et se ferait au dépens des olivines et des pyroxènes.

D'après nos résultats, la néogenèse de smectite ne se produit pas aux dépens des feldspaths puisque ceux-ci restent parfaitement sains. Dans le basalte, il n'est pas possible d'identifier des oxydes de fer même si la roche en contient de fortes quantités (>10%). Nous en concluons que, dans l'altération initiale du basalte, les oxydes se trouvent sous une forme amorphe ou mal cristallisée, c'est à dire dans des structures que nous n'avons pas identifiées avec la diffraction des rayons X.

Si l'on se réfère aux travaux effectués par ailleurs en régions tropicales, la seconde phase d'altération devrait commencer par la formation d'une *altérite* au contact du basalte [LUCAS *et al.*, (1984) ; LUCAS (1989) ; ROBAIN (1989) ; TANDY (1987) ; TANDY *et al.*, (1990)]. L'altération des feldspaths donnerait alors naissance à un matériau poreux riche en kaolinite. La structure de la roche à ce stade de l'évolution

reste continue et contient souvent des macrocristaux de kaolinite. Il ne s'agit pas d'un sol puisque le matériau n'est pas encore affecté par l'activité biologique. Bien qu'important dans l'étude de la formation des sols, nous n'avons pas eu les moyens dans ce travail d'étudier les premiers stades de transformation du basalte.

B) LA TEXTURE DES KAOLINITES ET LA PRESENCE D'ALUMINIUM AU SEIN DE LA MATRICE ARGILEUSE

Les sols ont été étudiés jusqu'à 150 cm de profondeur et leur étude donne des informations sur leur nature et leur organisation. Nous avons entre autres retenu les critères suivants :

- taille de cristaux de kaolinite et des oxydes de fer,
- taux de saturation en bases, pH,
- présence ou non de gibbsite,
- aluminisation des argiles et présence d'Al échangeable,
- structure micro-agrégée développée
- type de matières organiques.

Nous avons attaché beaucoup d'importance au critère taille des constituants car il permet d'approcher l'organisation du sol. A cet effet, nous avons observé les organisations des sols au MET de telle façon que l'on puisse observer la taille et l'arrangement des constituants sur des échantillons non remaniés.

La Planche VI.1 montre que les sols présentent des organisations très différentes:

- à Cascavel le sol (le plus altéré) présente au MET une organisation relativement compacte avec des particules mal individualisées. Une phase amorphe semble engluer les particules de kaolinite ;

- à Palotina, l'organisation est plus lâche et les particules sont toujours bien individualisées et plus grandes qu'à Cascavel.

Des analyses chimiques ont été réalisées à la microsonde à la fois sur les particules d'argiles elles-mêmes et sur les phases amorphes présentes à leur périphérie. A cet effet, la taille du faisceau d'électrons a été réduite au maximum afin d'analyser chacune des phases en présence.

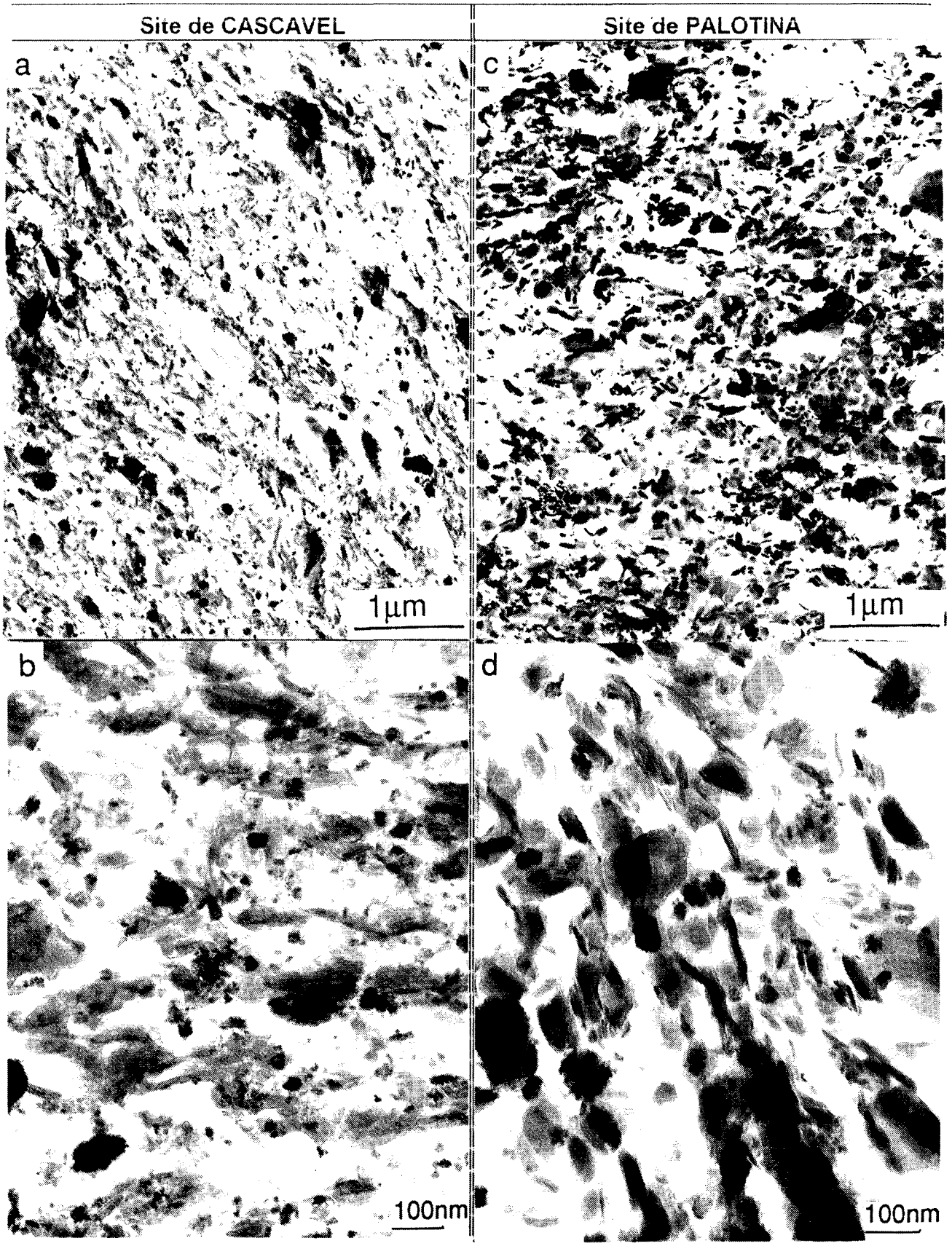


Planche VI.1 : Organisation des sols au MET sous forêt. (a) et (b) - Cascavel ; (c) et (d) - Palotina.

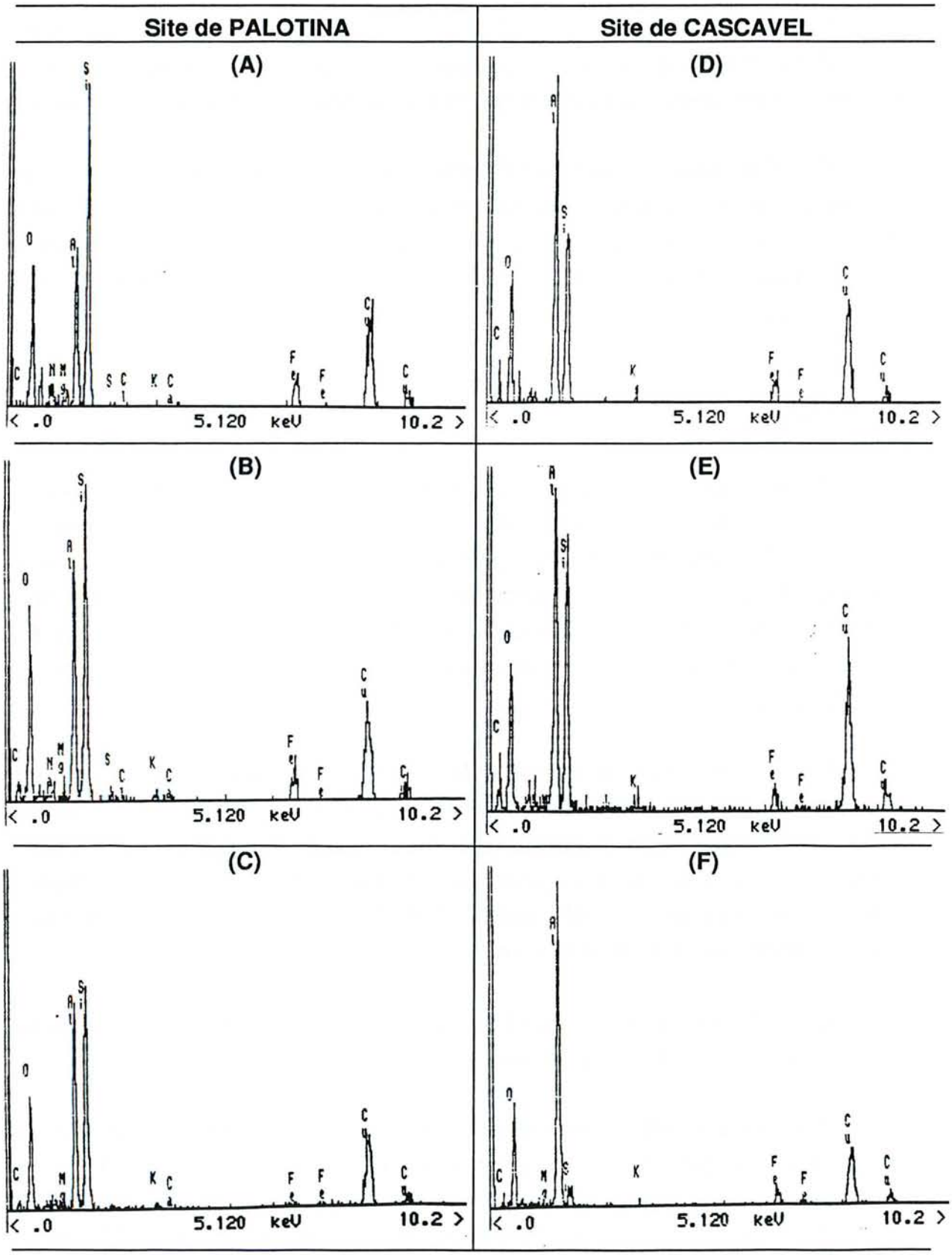


Planche V.I.2 : Analyses chimiques réalisées à la microsonde sur des particules des échantillons non remaniés sous forêt. (a), (b) et (c) Palotina ; (d), (e) et (f) Cascavel (MET).

Pour **Palotina** (fig. VI. 2 A, B et C), l'ensemble des analyses montre que l'intensité du pic de silicium est toujours supérieure à celle du pic d'aluminium. Nous donnons trois exemples d'analyse avec Si/Al peu supérieur à 1, Si/Al # 1,5 et Si/Al # 2.

Pour **Cascavel** les analyses ont porté sur des particules de kaolinite et sur leur zone périphérique. Dans tous les cas l'intensité du pic de silicium est toujours inférieure à celui d'aluminium. Les zones amorphes au contact des cristallites de kaolinite peuvent être composées d'aluminium et de silicium (Si/Al # 0,5) ou même d'aluminium pur.

**** Discussion***

On remarque d'abord que les deux sols se caractérisent par des textures de la kaolinite très différentes. Si l'on se réfère à plusieurs travaux analogues réalisés sur les sols ferrallitiques, les premières phases de l'altération ont ceci de particulier qu'elles conduisent à la cristallisation de kaolinites dont la taille peut être supérieure à 10 µm [CHAUVEL et al., (1976) ; CHAUVEL (1977)]. A contrario, il a été montré que la taille des kaolinites diminue au fur et à mesure que le sol évolue, en particulier qu'il devient plus pauvre en silice.

Toutes choses étant égales par ailleurs, notamment la profondeur, à Palotina la taille des kaolinites est beaucoup plus grande qu'à Cascavel. Il en est de même des oxydes de fer. Nous concluons donc que le sol de Palotina qui possède des kaolinites relativement grossières est plus proche dans sa constitution et son organisation de l'altérite formée à partie du basalte que le sol de Cascavel. Ce dernier, au contraire, serait à un stade plus avancé de son évolution.

A côté de la texture des kaolinites, la microsonde permet d'apporter quelques données relatives à l'évolution géochimique du système.

*A Palotina on trouve des intensités de pics Si/Al allant de 1 à 2. D'après les données obtenues par ailleurs, on sait que le rapport de 1 est caractéristique des kaolinites alors que le rapport de 2 est attribué aux minéraux 2:1. Une vermiculite a effectivement été identifiée en diffraction des rayons X et au MET sur la fraction < 2 µm. L'étude en microsonde confirme ce résultat.

*A Cascavel les analyses chimiques des cristallites de kaolinite donnent toujours des intensités de pics plus fortes en aluminium qu'en silicium. Ceci tend à

montrer que ces dernières sont partiellement altérées sans doute du fait du départ de la silice. La présence d'aluminium amorphe à la périphérie des cristallites suggère que certains d'entre eux ont été dissous. Il ne s'agit pas ici d'aluminium présent dans des gros cristaux de gibbsite mais d'une sorte de glu enrobant un réseau de cristallites de petite taille. Il faut donc distinguer dans ces sols au moins deux formes de l'aluminium : la gibbsite présente dans des cristallites de la taille des argiles grossières et des limons et cette phase alumineuse enrobant les cristallites et assurant ainsi une certaine continuité entre les constituants.

Au total la taille des cristallites d'argile et la présence d'aluminium traduisent l'évolution du sol. Depuis la roche basaltique initiale on aurait donc la succession suivante :

BASALTE INITIAL
(Olivine, pyroxènes et feldspaths sains)
↓
BASALTE ALTERE
(Néogenèse de smectite, feldspaths non altérés)
↓
ALTERITE
(Dissolution des feldspaths, néogenèse de kaolinites et d'oxydes de grande taille)

SOL DE PALOTINA	***SOL DE CASCAVEL***
Sol saturé en bases, pH ~ neutre, kaolinite, présence de vermiculite, oxydes de grande taille et C/N faible	pH acide, apparition de gibbsite, Al-échangeable, Al-amorphe engluant la microstructure, kaolinite, présence de vermiculite alumineuse, oxydes de petite taille et C/N plus élevé

Nous voyons donc que les deux sols sont du point de vue de leur développement pédologique à des stades d'évolution très différents que traduisent leur composition minéralogique et chimique. Nous verrons par la suite comment cela se traduit au niveau des organisations des sols.

II) ROLE DES FACTEURS ANTHROPIQUES ET DE LA CONSTITUTION DU SOL SUR LEUR STABILITE PHYSIQUE.

A) ROLE DES CONTRAINTES D'ORIGINE ANTHROPIQUE SUR LES PROPRIETES.

Des résultats d'analyses minéralogiques et chimiques, nous avons pu déduire des résultats relatifs à la pédogenèse. Dans les chapitres qui précèdent nous avons vu que le développement pédologique tend à engendrer des organisations elles-mêmes caractéristiques de leur évolution. C'est la cas en particulier dans le sol sous forêt où l'intervention de l'homme a été minimale.

En fait, toute action d'origine anthropique semble contribuer à faire évoluer ces organisations.

En effet, les résultats obtenus montrent que la mise en culture des sols, quelle que soit la pratique, conduit à une réorganisation du sol dont l'effet dépend à la fois du type de pratique et du type de sol. Il y a lieu aussi de distinguer la zone travaillée de la zone non travaillée.

1) Impact de la mise en culture sur le sol en profondeur

De nos résultats il ressort clairement que la mise en culture du sol peut induire, par rapport au sol sous forêt, une chute importance de l'indice de vides sur une profondeur de 1,50 m.

A Cascavel, sur des mottes de 10 cm3 environ, (Fig. VI.1) la chute de la porosité est faible et concerne seulement la parcelle labourée avec la charrue à soc. Avec le semis direct le tassement est minime, voire nul. A Palotina, c'est le contraire puisque la réduction de la porosité semble se produire jusqu'à 150 cm avec la technique du semis direct. Sur des éléments structuraux de l'ordre de 200 cm^3 (Fig.VI.2), l'évolution de la porosité est similaire.

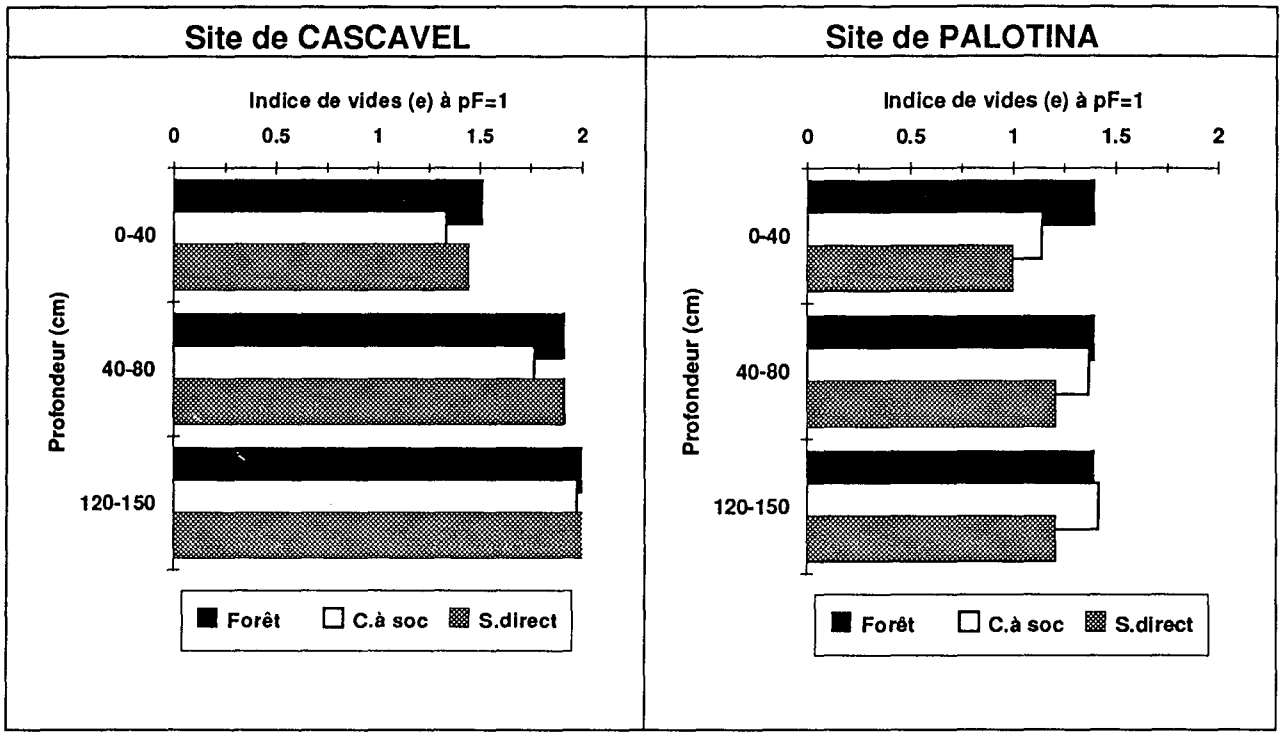


Fig. VI.1 : Evolution de l'indice de vides (e) à pF = 1 en fonction de la profondeur dans les deux sites étudiés (mottes de ~ 10 cm^3).

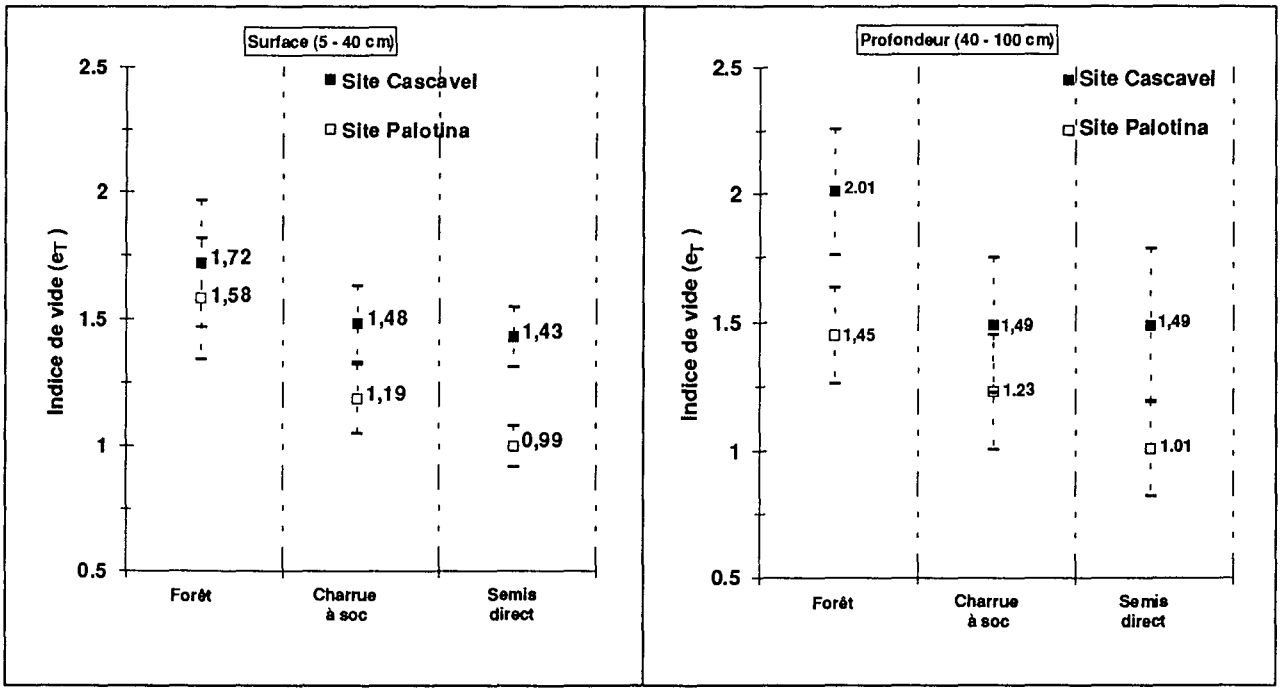


Fig. VI.2 : Evolution de l'indice de vides (e_T) sur un volume de sol de 200 cm^3 entre 5 et 40 cm et entre 40 et 100 cm de profondeur.

Nous constatons donc que la mise en culture provoque, à Palotina et pour la technique du semis direct, une réorganisation du sol même en profondeur. Nous pouvons noter qu'au delà de 50 cm, il s'agit de la zone du sol non travaillée mais cependant colonisée par les racines. On ne peut donc alors évoquer le travail direct des outils dans l'évolution de la porosité des sols.

Il convient donc de s'interroger sur l'origine de la réduction de la porosité des sols en profondeur. D'après ce que nous savons sur le système racinaire des plantes (blé en particulier), les racines peuvent pénétrer jusqu'à plusieurs mètres et ainsi contribuer à dessécher fortement le sol.

Sur des échantillons extraits de la couche de sol entre 120 et 150 cm, nous avons étudié l'influence du séchage à l'air sur l'évolution des propriétés physiques (Chapitre 5). Nous avons montré que le séchage à l'air suffit, après une seule dessiccation et sans intervention d'une action de type mécanique, à réduire la porosité du sol.

Ainsi, la dessiccation du sol en profondeur par le système racinaire des plantes, pourrait être à l'origine d'un phénomène analogue. Il faut alors admettre que des dessiccations importantes peuvent se produire dans les sols cultivés et qu'elles sont beaucoup plus fortes que sous la forêt.

Dans cette région du Brésil la tradition est de faire deux cultures par an (blé et soja) sur la même parcelle. Au Parana, le blé est par excellence la culture " d'hiver " (saison sèche), parce qu'il est bien adapté à une période de faible pluviométrie. La résistance du blé à la sécheresse est en partie liée au développement de son système racinaire qui lui permet de puiser l'eau très profondément. Ceci nous amène à conclure que les cultures, dès lors qu'elles sèchent fortement les sols, peuvent contribuer à réduire la porosité du sol, d'autant plus que leur organisation est fragile. C'est semble-t-il le cas à Palotina, beaucoup moins à Cascavel.

Cette dégradation n'est pas sans conséquence pour la porosité de drainage mais aussi pour la réserve en eau utile des plantes.

En parallèle à l'évolution des composantes de l'espace poral disponibles pour le stockage et la circulation des fluides, l'évolution de la porosité sur l'ensemble du profil peut modifier la cote de la surface du sol. En découpant le sol en horizons dont on connaît l'indice de vide, et en évaluant le tassement des sols sous semis direct par rapport la forêt, une variation d'indice de vide de 0,3 sur 1,50 m, correspond à une diminution de la cote de l'ordre de 20 cm.

La mise en culture peut donc, indépendamment de toute érosion être à l'origine d'un changement de cote du sol. Ce phénomène de tassement généralisé risque d'avoir de nombreuses implications notamment sur le comportement des sols à long terme, aussi bien sur l'activité biologique, que sur les propriétés physiques et chimiques.

Il apparaît aussi que suivant les sols et leur mode de mise en valeur cet effet peut se manifester ou non. Le moins acide (Palotina) qui apparaît le moins stable, est le plus sensible à ce genre d'évolution.

2) Rôle du travail du sol sur les propriétés

Si le tassement des sols consécutif à la mise en culture est en grande partie inévitable, les techniques culturales quant à elles peuvent en orienter les effets. Dans ce travail, nous nous sommes limités à l'étude de deux conditions extrêmes de travail du sol, à savoir le semis direct et le labour à la charrue à soc. La période durant laquelle ces deux pratiques ont été mises en oeuvre (supérieure à 20 ans) devait être suffisante pour mettre en évidence des différences de propriétés entre les deux pratiques.

Les systèmes de culture étudiés varient en premier lieu par le type et l'intensité des sollicitations mécaniques exercées sur les sols. Rappelons que les pressions mécaniques sur le sol sont généralement de courte durée. Sur le sol préalablement tassé les effets ultérieurs du climat et de l'activité biologique peuvent alors s'exercer.

A technique culturale identique, les sols étudiés présentent une sensibilité différente au tassement. En prenant pour référence les sols en profondeur (~ 150 cm), sous forêt nous avons pu étudier l'effet propre des compressions mécaniques dans le tassement, ainsi que les effets conjugués des cycles de dessiccation-humectation et des pressions mécaniques.

Nos essais indiquent qu'une seule compression mécanique, dans des conditions d'humidité appropriées (au voisinage de pF = 2,5) semble en mesure de provoquer une compaction du sol analogue à celle du terrain. Avant et après tassement, les sols présentent un comportement tout à fait différent vis-à-vis des cycles de dessiccation-réhumectation. A Cascavel l'effet est peu marqué alors qu'à Palotina les conséquences sont importantes.

Le choix d'une pratique doit donc se faire avec une connaissance des propriétés intrinsèques du sol, et des facteurs extrinsèques, notamment en relation avec les pratiques culturales. La porosité des sols est une conséquence directe de l'organisation des matériaux pédologiques. Il semble donc que le degré d'évolution des sols joue un rôle décisif sur le comportement des sols vis-à-vis de leurs propriétés physiques (tassement) mais aussi chimiques, et que les différents types de mise en valeur des sols peuvent aussi les faire évoluer rapidement.

La question posée à ce niveau est de savoir à quelles caractéristiques des comportements aussi différenciés des sols peuvent être rattachés.

B) ROLE DE LA CONSTITUTION DU SOL SUR LES PROPRIETES.

Rappelons que les sols de Palotina et de Cascavel sont très argileux (en moyenne 80% d'argile). Ils sont aussi à un stade d'évolution différencié puisqu'à Cascavel, le sol est plus acide et plus riche en gibbsite qu'à Palotina. Il semble qu'à Cascavel l'existence de particules plus petites avec des oxydes de fer et la présence d'aluminium en abondance, conduise à un système formé de petits agrégats relativement stables (pseudo sables). Ce résultat est en accord avec les données de CHAUVEL et al., (1976) ; CHAUVEL (1977) ; CHAUVEL et NOBREGA (1980).

Pour mieux expliciter la stabilité ou l'instabilité des sols il est nécessaire de faire intervenir simultanément plusieurs facteurs.

1) Tout d'abord la taille des constituants. Les mesures de surface comme les observations au MET amènent à la conclusion que l'épaisseur et la taille des particules est significativement différente suivant les sites. Ceci est confirmé par la porosimétrie à mercure puisque la taille modale des pores est de 11 nm à Palotina et de 9 nm à Cascavel.

Il a été montré que les propriétés physiques des argiles dépendant de leur taille. A cet effet, nous pouvons nous référer aux travaux de VAN DAMME et BEN OHOUD (1990). Ces auteurs montrent que plus l'épaisseur des particules d'argile est petite, plus les surfaces en contact entre elles sont grandes. Cette théorie appliquée aux deux sites permettrait d'expliquer, par l'intermédiaire de grandes surfaces de contact, le caractère plus stable du matériau de Cascavel.

2) A Cascavel comme à Palotina, la présence de minéraux 2:1 est démontrée. La caractéristique principale des minéraux 2:1 est avant tout d'avoir des espaces interfoliaires hydratés. Lorsque tel est le cas, l'empilement des feuillets est généralement partiellement ordonné dans la direction normale au plan des feuillets. Dans les autres directions un glissement latéral des feuillets les uns sur les autres est possible lors de cycles de dessiccation-humectation si les cations interfoliaires sont monovalents ou divalents. Ce glissement permet d'expliquer pourquoi les smectites peuvent acquérir à l'état sec des densités aussi importantes (TESSIER, 1984).

La teneur en minéraux 2:1 à Cascavel et à Palotina peut être estimée à environ 20 %. Il ne s'agit donc pas à proprement parler d'une phase mineure. On doit aussi considérer la présence d'aluminium sous se différents formes qui est très différente d'un site à l'autre. A Palotina le sol est quasi saturé avec du calcium alors qu'à Cascavel l'aluminium est présent dans l'espace interfoliaire.

Le fait qu'à Cascavel, la CEC de l'argile soit plus faible qu'à Palotina, vient à l'appui de ce raisonnement. L'aluminium dans ces conditions peut jouer un rôle spécifique sur l'organisation et les propriétés des minéraux 2:1, par exemple en empêchant les feuillets de glisser les uns sur les autres lors du processus de dessiccation-humectation. Les propriétés micromécaniques de l'argile risquent de se trouver modifiées limitant ainsi le processus de retrait-gonflement. Ainsi, à Cascavel la présence d'aluminium interfoliaire pourrait rigidifier la matrice argileuse et contribuer à assurer une certaine stabilité ce qui est probablement moins le cas des minéraux 2:1 saturés avec des cations alcalino-terreux (Palotina).

3) Une partie de la réponse concernant la stabilité de l'argile réside aussi dans la nature des charges de surface des argiles en fonction du pH. Les deux sols sont très différents du point de vue de leur contexte géochimique. A Palotina le pH est voisin de la neutralité. Par rapport aux oxydes de fer on se trouve très près du "zpc". En revanche à Cascavel le pH est voisin de 5. Il s'agit donc du domaine de pH où les kaolinites sont supposées être chargées négativement alors que les oxydes sont chargés positivement. Cette différence de charge est en faveur d'une grande stabilité physique à Cascavel et d'une faible stabilité à Palotina.

4) L'originalité de notre étude est sans doute d'attribuer un rôle essentiel à l'aluminium amorphe en tant liant interparticulaire des autres phase minérales. Dans une situation comme celle de Cascavel, là où le sol est acide, nous avons montré que de l'alumium est présent en quantité suffisamment importante pour assurer une sorte de continuité à la phase solide et donc jouer le rôle de liant interparticulaire.

Au total les considérations précédentes suggèrent que l'accroissement de la stabilité physique des sols met en jeu simultanément plusieurs facteurs qui tous ensemble tendent à stabiliser la structure du sol. Si l'aluminium localisé à la périphérie des kaolinites joue un rôle décisif en assurant la continuité de la phase solide minérale, c'est semble-t-il au niveau du contexte géochimique (pH), de la texture des fractions minérales et de la présence d'un liant minéral alumineux qu'il faut rechercher l'origine de la plus ou moins grande stabilité physique et mécanique du sol.

C) EVOLUTION DU CONTEXTE GEOCHIMIQUE DES SOLS CULTIVES

Ce point a peu été abordé dans ce mémoire. La question posée est de savoir si, à partir de la forêt, la mise en culture n'est pas sans conséquences sur les caractéristiques chimiques des sols. Le site de Palotina est particulièrement approprié à cet effet puisque le sol contenait au départ peu d'aluminium échangeable.

Les résultats obtenus sont rassemblés Fig. V.4. Il indiquent un effet contrasté puisque le sol sous semis direct contient de fortes quantités d'aluminium échangeable alors que sous charrue à soc c'est beaucoup moins le cas.

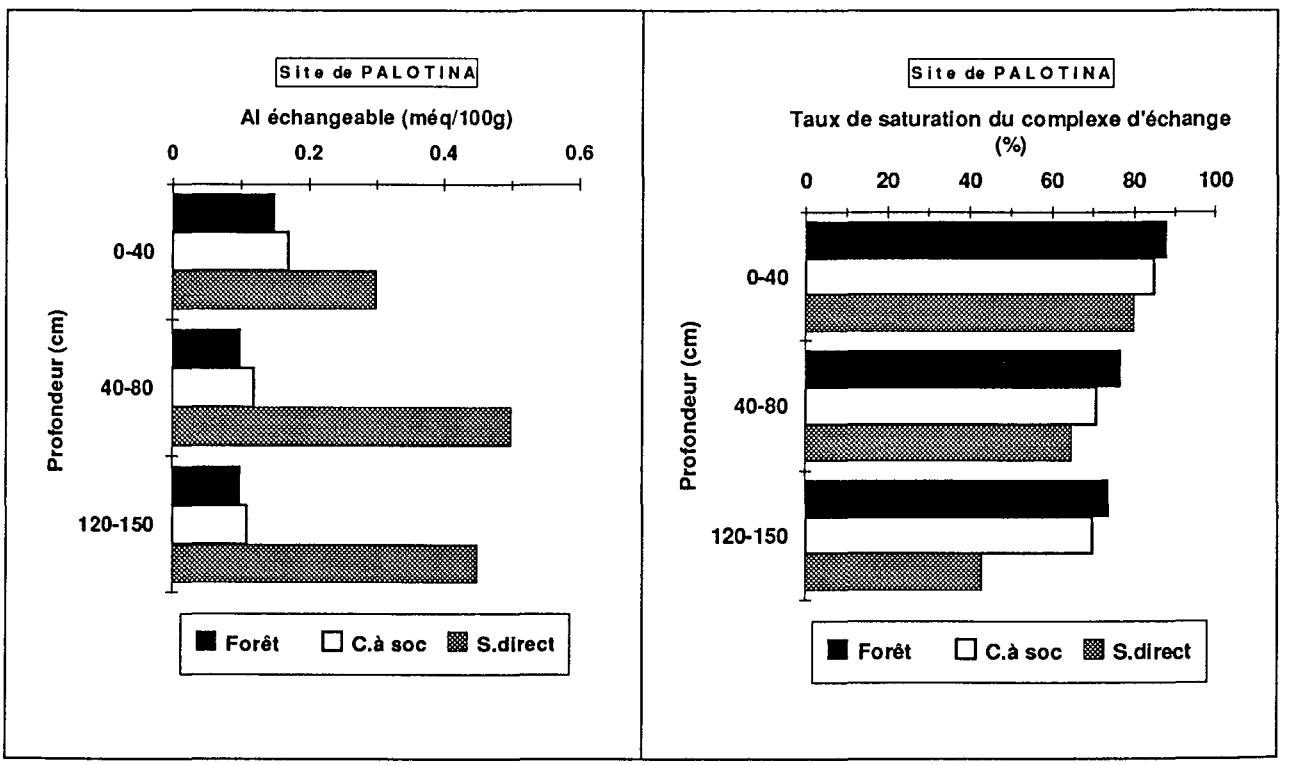


Fig. VI.4 : Evolution de l'aluminium échangeable et du taux de saturation du complexe d'échange à Palotina.

Cette apparition d'aluminium échangeable peut être reliée à l'absorption préférentielle de silice par les plantes comme cela a été évoqué par LUCAS *et al.*, 1993, notamment provenant de la dissolution des kaolinites. Il resterait un résidu alumineux toxique pour les plantes. Le phénomène d'aluminisation survenant seulement après semis direct, nous n'avons pas d'éléments d'explication à ce sujet qui mériterait dans le futur d'être étudié dans le détail.

III) CONTRIBUTION A LA DEFINITION D'UNE AGRICULTURE PLUS CONSERVATRICE.

Le but dans ce paragraphe est de donner quelques perspectives en matière d'utilisation des sols à partir des résultats qui ont été obtenus. *Il ne s'agit pas pour nous de nous substituer aux agronomes, mais à l'aide de conclusions relatives aux sols et en tenant compte des situations analysées, de donner quelques éléments de référence.*

Nous avons montré en premier lieu que dans la mise en valeur des sols tropicaux, il est absolument nécessaire d'avoir des informations sur leur contexte pédogénétique (leur degré d'évolution par exemple), pour bien comprendre leur comportement physique et chimique.

D'un sol à l'autre, la nature des constituants est fortement orientée par la nature du matériau parental. Ainsi le fait que les sols soient développés sur des basaltes conduit à des matériaux riches en minéraux 2:1 comme le révèlent les capacités d'échanges. Dans les sols du Parana que nous avons étudiés, et semble-t-il dans tous les sols de cette région, la capacité d'échange revenant à la phase minérale peut atteindre 6 méq/100g. Elle est bien supérieure à ce que l'on trouve dans les sols tropicaux ne contenant que des minéraux phylliteux kaolinitiques. Il y a donc une richesse potentielle du sol due à la nature de ses constituants.

Une partie de cette richesse peut être altérée par la présence d'aluminium échangeable qui bloque des sites. Précisément, ce sont certainement les sites des minéraux 2:1 qui sont le plus affectés. Ainsi à Cascavel la CEC est plus faible qu'à Palotina (tableau VI.1). En outre, le contexte géochimique du sol semble imposer un type de matière organique que nous avons mis en évidence par le rapport C/N. Plus le sol est acide plus la contribution de la matière organique à la CEC est faible (tableau VI.1).

Pour ce qui est de la stabilité physique des sols, il apparaît que la valeur du pH jouerait un rôle décisif, toutes choses étant égales par ailleurs. Ainsi, ***le pH devrait rester bas*** pour maintenir dans le sol l'existence de forces de cohésion entre les constituants (charges positives des argiles et négatives des oxydes) et que pour que des liants, à savoir l'aluminium intercristallites assurent ainsi le stabilité physique du système. Toute remontée excessive du pH risque de mettre en danger la stabilité du

sol. ***Il doit y avoir un compromis entre l'acidité qui entraîne une certaine toxicité due à l'aluminium et la stabilité physique***.

Tableau VI.1 : Résumé des principales caractéristiques des deux sols.

	Sol à Cascavel	Sol à Palotina
Profondeur	> 3 m	> 3m
Relief	plan	ondulé
% d'argile	80%	80%
% de sable	2,1%	6,1%
Carbone organique (%)	3,28 - 0,83	3,26 - 0,38
C/N	13	8
pH (H_2O)	5	6,5
C.E.C.	9,6 - 4,6	10,5 - 6,6
"T" (100 à 150 cm)	11%	74%
Structure de l'horizon (B)	microagrégé (poudre de café)	agrégé
Minéralogie	Oxydes Fe et Al (gibbsite) minéraux 1:1 et 2:1	Oxydes Fe ; minéraux 1:1 et 2:1
$SiO_2/Al2O3$	0,93	1,25
Compaction maximale à pF = 2,5	~ 600 kPa	~ 400 kPa
Densité réelle	2,73 - 2,88	2,81 - 2,94

En ce qui concerne les techniques culturales, la question est de savoir quel type de dégradation est spécifique de chacune d'entre elles.

A partir des résultats acquis, nous avons pu montrer que le labour, en agissant en compression sur le sol induit essentiellement des effets de rupture par cisaillement. Ces effets doivent être considérés dans une perspective de changement des propriétés à long terme et donc par leur effet cumulatif. Le labour semble, après 20 ans de mise en culture, apte à modifier de façon profonde le comportement du sol. C'est le cas lorsque les associations microstructurales évoquées antérieurement assurent une stabilité physique au sol. Le labour se révèle alors une technique relativement dangereuse car il tend à rompre de façon durable la structure microagrégée de ces sols. Le sol acquiert un caractère gonflant dont les effets à long terme ne sont pas bien connus.

En revanche, la pratique du semis direct n'a pas les mêmes inconvénients. En limitant les façons culturales, le sol perd une partie de sa macroporosité mais il n'est pas fondamentalement modifié dans sa structure naturelle microagrégée. Dans cette optique, la technique du semis direct semble donc une bonne technique de conservation du sol.

Cette conclusion valable pour Cascavel n'est pas appropriée pour Palotina car l'organisation du sol à l'échelle des constituants n'est pas de même nature. Cela tient à la fois à la texture, aux charges de surfaces et à l'absence de liants interparticulaires. En l'absence de forces de cohésion, aucun obstacle ne s'oppose à la réorganisation des particules élémentaires. Dans ce cas, la technique de semis direct tend à dégrader encore plus le sol. Le terme extrême de l'évolution est obtenu quand toute la porosité autre que celle des constituants a disparu. C'est ce qu'on obtient dans les horizons A après environ 20 ans de mise en culture. Le tassement généralisé du sol, même en profondeur (~ 100cm), est révélateur d'une grande fragilité aux agents externes.

Cependant, c'est dans ce cas de figure que le labour permet de maintenir une porosité favorable au développement des plantes.

**** Interventions sur le sol et importance de l'humidité***

Les données sur l'importance de l'humidité dans le tassement des sols ont été obtenues sur des massifs d'agrégats de taille < 5 mm. Leur taille correspond assez bien à ce qui est obtenu lors de la préparation d'un lit de semence.

Dans les expériences de compaction, notre but a été de montrer que les sols peuvent avoir une fragilité très différente, en fonction de leur nature comme évoqué précédemment, mais aussi fonction de l'état hydrique au moment du compactage.

De nos résultats, il apparaît qu'il existe un potentiel de l'eau particulier auquel les sols sont très sensibles au tassement. Celui-ci se situe au voisinage de pF = 2,5 (tableau VI.1). La teneur en eau du sol serait alors inférieure à la capacité au champ. Même si ce type de résultat doit être utilisé avec précaution, le comportement que nous avons mis en évidence ne semble pas fortuit car plusieurs travaux aboutissent à une conclusion similaire [SALA (1991 ; TAVARES FILHO (1992) ; TAVARES FILHO *et al.,* (1994)].

Si l'on admet que la capacité au champ est voisine de pF = 1,7, la sensibilité au tassement serait plus grande lorsque le sol est déjà ressuyé, donc en début de dessèchement. D'un autre côté, la sensibilité maximale au tassement est obtenue à ~

34 à 36 % de teneur en eau massique pour Cascavel et seulement ~ 27-29% de teneur en eau massique pour Palotina. La teneur en eau du sol correspondant au tassement maximum est donc une caractéristique propre de chaque sol et qui ne peut être transposée directement d'un sol à l'autre. En revanche la valeur du potentiel de l'eau apparaît beaucoup plus caractéristique.

Le fait que le tassement se produise dans une gamme de pression faible, indique que les ***pressions mécaniques exercées sur les sols doivent être limitées au maximum. Il n'est pas dans notre propos de proposer des solutions techniques, mais il est possible par exemple de diminuer la pression de gonflage des pneumatiques*** comme l'ont préconisé ONI et ADEOTI (1986).

D'un autre côté, ceci incite à ***limiter le nombre de passages de roues et à cet effet de passer aux mêmes endroits***, comme ceci est préconisé par LAMERS *et al.,* (1986). Les mêmes auteurs insistent également sur l'augmentation de la praticabilité qu'apporte cette technique.

Enfin il faut rappeler que dans ces régions le labour à la charrue à disque est le plus souvent pratiqué et qu'il a aussi des effets notables sur la dégradation. L'équipe de Londrina a pu montrer qu'il est beaucoup plus dégradant que la charrue à soc [RALISCH *et al.*, (1991 et 1993) ; GUIMARÄES *et al.*, (1993)]

En parallèle à la limitation des contraintes, le rôle de l'activité biologique est à prendre en compte. Nous avons vu aussi que plus le sol est tassé, plus la porosité biologique devient importante puisqu'elle est à l'origine de pores assurant l'infiltration de l'eau et l'aération. Plus d'attention doit donc être apportée aux restitutions organiques qui favorisent l'activité biologique et dont le rôle apparaît décisif pour la genèse d'une macroporosité tout en contribuant, sans doute, à maintenir la stabilité structurale des sols.

Enfin, une partie de la réponse aux questions d'ordre agronomique repose probablement aussi, dans ces sols en monoculture de blé ou de soja, sur la mise au point de systèmes de rotation des cultures comme ceux que développent actuellement l'équipe des agronomes de Londrina.

SYNTHESE ET

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire est consacré à l'étude de l'évolution de deux sols du Parana dont la mise en valeur s'est accélérée dans les années 70. Il s'inscrit dans une perspective de maintien à long terme de leur fertilité. Plus précisément, le but de ce travail est de relier les caractéristiques physico-chimiques et minéralogiques des sols à leurs propriétés physiques et mécaniques afin de comprendre leur évolution à court et à moyen terme.

Nos travaux reposent sur l'étude de deux sites, Cascavel et Palotina, dont le choix a au départ été fait en fonction de critères agronomiques. On disposait en effet de données sur les pratiques culturales à long terme et il était donc possible de suivre les changements induits par la mise en culture dans un contexte bien défini. Depuis la forêt, ces changements ont été étudiés en faisant intervenir un travail du sol à la charrue à soc ou en utilisant la technique du semis direct, pour des cultures de blé et de soja.

Pour chaque situation, des profils culturaux ont été effectués afin de raisonner l'échantillonnage. Des blocs à structure conservée ont été maintenus à leur humidité de départ en vue de l'étude des propriétés physiques. La voie suivie pour examiner les modifications intervenant à différentes échelles de l'organisation des sols a consisté à analyser le volume poral total, le spectre poral et à décrire l'arrangement des constituants de l'échelle décimétrique à l'échelle nanométrique. A cet effet, nous avons mené des études sur la nature des constituants des sols, sur l'évolution de leurs caractéristiques physiques en fonction de travaux culturaux, sur l'organisation de la phase solide. La caractérisation de l'espace poral a été effectuée avec différentes méthodes. Nous avons terminé nos travaux par une étude de la sensibilité à la compaction des sols en contrôlant les facteurs hydriques et les contraintes mécaniques.

NATURE ET COMPORTEMENT DES SOLS

Les sols ont été défini dans leur contexte général d'évolution, à la fois géographique, climatique, géologique et géomorphologique. Ils sont développés à partir de matériaux basaltiques peut différents et la mise en place plus ancienne qu'à Palotina. L'étude du basalte a montré qu'il contient des smectites. Un minéral 2:1 (vermiculite alumineuse) est toujours présent dans le sol même le plus altéré.

Les sols sont très argileux (en moyenne 80% d'argile) avec une faible teneur en sable et en limons. Ils sont riches en kaolinite, dont la teneur ne dépasse cependant pas 50 à 60%. Les oxydes de fer représentent respectivement 20 % et 14 % à Palotina et à Cascavel.

A Cascavel, on trouve 15 % de gibbsite alors qu'elle n'est que difficilement détectable à Palotina. Dans chaque site le minéral 2:1 (environ 20%) présente en diffraction des rayons X un comportement de vermiculite. Cette dernière est peu aluminisée à Palotina et plus fortement aluminisée à Cascavel. Les minéraux 2:1

présents confèrent aux sols des propriétés d'échange de l'ordre de ~10 méq/100g. Cette composition minéralogique va de pair avec une forte acidité et un taux de saturation en bases assez réduit (< de 10% en profondeur) à Cascavel tandis qu'à Palotina le pH est neutre et le taux de saturation en bases supérieur a 80%.

Le raisonnement sur la charge électrique de surface en fonction du pH permet de conclure qu'à Cascavel les kaolinites sont chargées négativement alors que les oxydes sont chargés positivement. A Palotina, comme le sol est moins acide, on se rapproche du domaine de pH où les oxydes ont une charge électrique neutre. Cette interprétation est cohérente avec la présente d'une structure à tendance instable à Palotina et beaucoup plus stable à Cascavel.

Nous avons conclu que les sols de Cascavel et de Palotina ont un développement pédologique très différent que traduisent bien la présence ou l'absence de gibbsite et l'aluminium échangeable.

CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES SOLS

Les profils sous forêt des deux sites apparaissent morphologiquement proches l'un de l'autre et présentent des structures micro agrégées (μ). L'étude détaillée de leur organisation indique que les sols sous forêt présentent à Cascavel une structure micro-agrégée, avec une porosité composée avant tout d'un assemblage d'agrégats de quelques dizaines de micromètres. A Palotina, la taille des agrégats est plus grossière. Cette observation est valable quel que soit l'horizon. La taille des agrégats, à Palotina, va de pair avec une plus grande continuité de la phase solide et l'individualisation d'une structure macroscopique à tendance polyédrique.

Dès lors que les sols sont mis en culture, on assiste toujours à une certaine compaction. Cette compaction affecte en premier lieu la porosité de drainage et d'aération. Mais l'effet de la compaction peut se manifester différemment. Les sols travaillés à la charrue à soc présentent une structure peu massive où les éléments structuraux (mottes des différentes tailles) sont encore individualisés. Avec la technique du semis direct la structure des sols tend à devenir massive et les éléments structuraux deviennent alors non identifiables.

Cette évolution macroscopique se traduit à différentes échelles par une évolution du volume et de la forme de chaque classe de pores. Sous forêt, l'analyse d'image de lames minces indique que les pores sont largement interconnectés en relation avec la porosité d'empilement des agrégats. Dans les sols cultivés de Cascavel ce type de pores est stable alors qu'à Palotina ils disparaissent largement, spécialement dans le cas du semis direct.

Une des clefs pour comprendre le comportement des sols en fonction des pratiques réside dans l'étude de leur microporosité. Tout d'abord à Cascavel toutes

les gammes de taille de pores sont représentées depuis le cm jusqu'au nm. A Palotina les pores compris entre 0,05 et 3 µm sont absents même sous forêt.

Ce type de spectre poral va de pair avec une porosité d'assemblage des particules argileuses plus fine à Cascavel qu'à Palotina. Ce résultat est confirmé par les mesures de surfaces spécifiques et par les observations faites au microscope électronique. Le fait que la texture des argiles diminue avec le degré d'évolution des sols apparaît cohérent si l'on se réfère aux autres travaux sur le sujet, notamment au Brésil et en Guyane.

Cette évolution de la texture se fait parallèlement à l'évolution de l'acidité. Le sol est d'autant plus stable qu'il est plus acide, plus finement divisé et qu'il contient une forte quantité d'aluminium dans la matrice argileuse. Une bonne partie des caractéristiques physiques est donc ici un héritage des conditions de genèse du sol.

MODALITES DE LA DEGRADATION DE LA STRUCTURE

A partir des résultats obtenus nous pouvons dire que la mise en culture des sols, quelle que soit la pratique, conduit à une compaction. L'effet peut cependant être très différent d'un sol à l'autre et il dépend à la fois du type de pratique et du type de sol. Il y a lieu aussi de distinguer la zone travaillée de la zone non travaillée.

Nous avons montré que la mise en culture provoque à Palotina et pour la technique de semis direct une réorganisation du sol en profondeur, même en dessous de la zone travaillée. L'implantation des cultures, par l'effet de dessèchement qu'elle induit, apparaît en mesure d'induire une consolidation du matériau. L'étude en laboratoire de matériaux soumis à des cycles de dessiccation-humectation permet de confirmer ce résultat. Nous avons conclu que la mise en culture est à l'origine d'une évolution importante et rapide de l'espace poral des sols par rapport à la forêt. En conséquence, un tassement du sol sur une forte épaisseur peut être attendu sans que par ailleurs des phénomènes d'érosion interviennent nécessairement.

Si le tassement induit par la dessiccation des sols sous cultures semble largement inévitable, les techniques culturales peuvent en orienter les effets. Nous avons été amené à distinguer un effet propre au labour à la charrue à soc, par rapport à la technique de semis direct (non travail du sol).

Lorsque le sol est stable et fortement agrégé comme à Cascavel, le semis direct est une technique satisfaisante de préservation de la structure du sol. Une évolution marquée dans le sens d'une augmentation des propriétés de gonflement se produit avec la charrue à soc. Nous avons interprété cette évolution comme étant le résultat d'une fragmentation du sol et à la coalescence des agrégats due à l'action de la charrue à soc.

Lorsque le sol est intrinsèquement instable, comme à Palotina, les pratiques agronomiques concourent toujours à une dégradation des propriétés physiques des sols telles que la porosité de drainage, l'aération et la réserve utile. Dans ce cas de figure c'est la technique du semis direct qui est la plus dégradante puisqu'elle tend à faire disparaître l'ensemble de la macroporosité.

Ce comportement a été confirmé par des études de tassement sur des massifs d'agrégats. A Cascavel et à Palotina, c'est aux potentiels de l'eau voisins de - 32 kPa (pF = 2,5) que le sol présente la plus forte sensibilité au tassement. Ce domaine de sensibilité particulier correspond en fait à des teneurs eau très différentes d'un sol à l'autre, même si par ailleurs leur teneur en argile est similaire.

Des dessiccations ultérieures peuvent concourir à densifier le matériau. Mais, plus le matériau est compact au départ (comme à Palotina), plus la dessiccation est dégradante. Un compactage suivi d'une dessiccation à l'air a donc des effets d'autant plus néfastes que le matériau est plus dense au départ.

****

Au total ce travail montre que la connaissance du mécanisme de l'évolution des propriétés physiques des sols tropicaux comme ceux du Parana exige de prendre en compte des données de nature variée. Cela va du suivi des pratiques culturales à long terme avec l'étude des profils culturaux correspondants, à l'étude de l'ambiance physico-chimique et la nature minéralogique des constituants. Une étude de l'ensemble des différents niveaux d'organisation de la phase solide et des pores est nécessaire si l'on veut réellement faire le point sur l'évolution des propriétés physiques des sols.

Les sols développés sur basaltes du Parana peuvent être à des stades très différents de leur pédogenèse. Tout se passe comme si le degré d'évolution des sols imposait un type d'organisation et des propriétés physiques et physico-chimiques spécifiques.

L'action anthropique contribue à faire évoluer ces organisations. Pour les contraintes mécaniques il y a lieu d'analyser le mode d'action spécifique des outils. Pour les contraintes climatiques, les transformations doivent prendre en compte l'action des végétaux, notamment par leur transpiration. Les effets à long terme dus à un dessèchement du sol ne doivent pas être sous estimés. La prise en compte de ces facteurs apparaît indispensable pour étudier l'évolution des propriétés physiques des sols, et contribuer ainsi à définir les conditions d'une agriculture plus conservatrice qui préserve la fertilité de ces sols.

BIBLIOGRAPHIE

ACTON C.J. ; RENNIE D.A. et PAUL E.A. (1963) - The relationship of polysaccharides to soil aggregation. Can. J. Soil Sci., 43 : 201 - 209.

AFNOR (1985) - Détermination de la capacité d'échange cationique et des cations échangeables. X 31 - 130. 12p.

AINA P.O. (1979) - Soil changes resulting from long-termmanagement practices in western Nigeria. S. Sci. Soc. of Am. Jour., Madison, 43 : 173 -177.

AMIR I. ; RAGAVAN G.S.V. ; McKYES E. et BROUGHTON R.S. (1976) - Soil compaction as a function of contact pressure and soil moisture content. Canadian Agr. Eng. 18(1):54-57.

AZEVEDO A. (1972) - Brasil : a terra e o homem. V.I - As Bases Fisicas. Comp. Ed. Nac. Sao Paulo, 619p.

AZZAOUI M. (1984) - Etude du gonflement d'une illite sodique D.E.A. de Pédologie. Univ. de Paris VII, 33p.

AZZAOUI M. (1988) - Comportement et organisation de matériaux argileux soumis à des contraintes hydriques et mécaniques. Rôle des différents types de forces d'hydratation. Thèse Univ. P.et M. Cu rie-Paris VI, 240p.

BAIZE D. (1988) - Guide des analyses courantes en pédologie. INRA , Paris. 172p.

BALBINO L.C. ; OLIVEIRA E.F. et BAIRRAO J.F.M. (1990) - Efeito do preparo e da rotaçao de culturas sobre caractéristicas fisicas de um Latossolo Roxo Eutrofico. In : 8° Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservaçao do Solo. Londrina, 22 - 29 / 07 / 1990.

BALBINO L.C. et OLIVEIRA E.F. (1990) - Avaliaçäo da alternancia de sistemas de preparo do solo na cultura de trigo e soja In : OCEPAR - Résultados de pesquisa. Cascavel. p. 1338 - 1345.

BALBINO L.C. et OLIVEIRA E.F. (1990) - Efeito do sistema de preparo de solo no rendimento de graos de trigo, soja e milho In : OCEPAR - Resultados de pesquisa. Cascavel. p. 1354 - 1361.

BARNISHEL R.I. (1977) - Chlorites and hydroxy Interlayered Vermiculite and smectite. In: Minerals in Soil Environments, DIXON J. B. et WEED S. B. (Ed), Soil Science Siciety of America, Madison Wisconsin, U.S.A., 331 356.

BARTOLI F. ; PHILIPPY R. ; DOIRISSE M. et NIQUET S. (1991) - Structure and self-similarity in silty and sandy soils : the fractal approche. J. Soil Sci., 42 : 167-185.

BAVER L.D. ; GARDNER W.H. et GARDNER W.R. (1972) - Soil physics 4th éd., Wiley & Sons, New York, 498p.

BELTRAME L.F.S. ; GONDIM L.A.P. et TAYLOR J.C. (1981) - Estrutura e compactaçao na permeabilidade solos do Rio Grande do Sul. R. Bras.Ci.Solo, 5(3):145 - 149.

Ben RAHIEM H. ; TESSIER D. et PONS C.H. (1986) - Comportement hydrique et évolution structurale des montmorillonites au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Partie I. Cas de montmorillonites calciques. Clays Minerals, 21, 9 - 19.

Ben OHOUD M. et Van DAMME H. (1990) - The fractal texture of swelling clay-organic aggregates. C. R. Acad. Sc. Paris, 311 (II) : 665-670.

BERTONI J. ; BENATTI Jr. et LOMBARDI NETO F. (1975) - Efeito de sistemas de preparo do solo - intensidade, profundidade e equipamento - na produçao de culturas. In : Congresso Brasileiro de Ciencia do Solo, 15, Campinas, 1976. Anais... Campinas Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 541 - 546.

BLAKE G.R. (1965) - Particle density. In : Black C. A. Methods of soil analysis, physical and mineralogical properties, including statistics of measurement and sampling. Madison, American Society of Agronomy. Pt.1, p. 371 -373.

BLOT A. (1980) - L'altération climatique des massifs de granite du Sénegal. Cah. ORSTOM Trav. et Doc. n°114, 434 p.

BOONE F.R. ; SLAGER S. ; MIEDEMA R. et ELEVELD R. (1976) - Some influence of zero tillage on the stucture and stability of a fine textured river levee soil. Neth. J. Agric.Sci. 24 : 105-119.

BOUMA J. JONGERIUS A. BOERSMA O. JAGER A. SCHOONDERBEEK D. (1977) - The function of different types of macropores during saturated flow through four swelling soil horizons. Soil Sci. Soc. Am. J., 41 : 945-950.

BOUMA J. JONGERIUS A. BOERSMA O. JAGER A. SCHOONDERBEEK D. (1979) - Calculation of saturated hydraulic conductivity of soil pedal clay soils soils using micromorphometric data. Soil Sci. Soc. Am. J., 43 : 261-264.

BRADFILD R. (1950) - Soil structure. Trens. 4th Int. Congr. Soil Sci., II, 9-19.

BRESSON L.M. et GUILLORE P. (1991) - Problème de périmètre. Maille carrée, maille hexagonale, pixel carré, pixel rectangulaire. La lettre du groupe Thématique. Taitement d'images n°2. INAPG, multigr. 2p.

BRINDLEY G.W. et BROWN G. (1980) - Crystal structures of clay minerals and their ray identification. Mineralogical Society Monograph N°5, 495p.

BRUAND A. (1985) - Contribution à l'étude de la dynamique de l'organisation de matériaux gonflants. Application à un matériau argileux d'un sol argilo-limoneux de l'Auxerrois. Thèse Dr.Spécialité Univ.Paris VII, 225p.

BRUAND A., (1986) - Contribution à l'étude de la dynamique de l'espace poral. Utilisation des courbes de retrait et des courbes de rétention d'eau. Science du Sol, 24 (4) : 351-362.

BRUAND A. et PROST R. (1987) - Effect of water content on the fabric of a soil material : an experimental approach. J. Soil Sci., 38 : 461-472.

BRUAND A. et TESSIER D. (1987) - Etude de l'organisation d'un matériau argileux en microscopie : modifications intervenant lors de la désydratation. Micromorphologie des sols/Soil Micromorphology; Fedoroff, Bresson et Courty Eds., AFES, 37 - 42.

BRUAND A. ; TESSIER D. et BAIZE D. (1988) - Contribution à l'étude des propriétés de rétention d'eau des sols argileux : importance de la prise en compte de l'organisation de la phase argileuse. C. R. Acad. Sc. Paris, t.307, série II, 1937 - 1941.

BRUAND A. ; BRAUDEAU E. et FRITSCH E. (1990) - Evolution de la géométrie de l'espace poral des sols lors du passage du domaine ferrallitique au domaine ferrugineux et hydromorphe. Exemple du bassin de Booro Borotou (Côte d'Ivoire). ORSTOM, Coll. Etudes et Thèses, Structure et foctionnement hydropédologique d'un petit bassin versant de savana humide : 137-145.

BUI E.N. ; MERMUT A.R. et SANTOS M.C.D. (1989) - Microscopic and ultramicroscopic porosity of an oxisol as determined by image analysis and water retention. Soil Soc. Am. J. 53, 661-665.

BULLOCK P. ; FEDOROFF N. ; JONGERIUS A. ; STOOPS G. ; TURSINA T. et BABEL U. (1985) - Handbook for soil thin section description. Waine Research Pub. (U.K.), 152p.

BULLOCK P., THOMASSON A. J. (1979) - Rothamsted studies of soil structure II. Measurement and characterisation of macroporosity by image analysis and comparison with data from water retention measurements. J. Soil Sci., 30 : 391-413.

CAILLERE S. ; HENIN S. et RAUTUREAU M. (1982) - Minéralogie des argiles (2 vol). Masson Paris.

CALLOT G. ; CHAMAYOU H. MAERTENS C. et SALSAC L. (1982) - Mieux comprendre les intéractions sol-racine. Incidence sur la nutrition minérale. Coll.INRA, 325p.

CAMARA L. (1982) - Comportement hydrique et propriétés de gonflement macroscopique de mélanges d'argiles. Thèse 3ème cycle, Univ.Paris VI, 155p.

CAMARGO O.A. (1983) - Compactaçao do solo e desenvolvimento de plantas. Campinas, Fundaçao Cargill, 44p.

CARTER D.L., HEILMAN M.D., GONZALEZ C.L., (1965) - Ethylene-glycol monoethyl-èther for determining area of silicate minerals. Soil Sci., 100(5), p.356-360.

CARTER M.R. (1988) -Temporal variability of soil macroporosity in a fine sandy loam under mould-board ploughing and dirct drilling. Soil Tillage Res.2:37-51.

CARTER M.R. (1990) - Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. Can. J. Soil Sci., 70 : 425 - 433.

CARTER M.R. (1991) - Influence of tillage on the proportion of organic carbon and nitrogen in the microbial biomass of medium textured soils in a humid climate. Biol. Fertil. Soils, 11 : 135 - 139.

CARVALHO S.R. (1990) - Tassement des sols ferralitiques mis en culture. Apport d'une analyse comportamentale de l'espace poral de sols "Podzolicos" (Etat de Pio de Janeiro, Brésil). Thèse Doctorat de l'Univ. Paris 6. 200p. + annexe.

CARVALHO S.R. ; BRUAND A. ; HARDY M. ; LEPRUN J.C. et JAMAGNE M. (1991) - Tassement des sols ferralitiques podzolicos vermelho amarelo sous culture de canne à sucre. (Etat de Rio de Janeiro, Brésil). Apport d'une analyse de la porosité associée à une connaissence détaillée de la phase minérale. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., vol. XXVI, n°3 : 195 - 212.

CASTRO O.M. ; VIEIRA S.. et MARIA I.C. (1987) - Sistemas de preparo do solo e disponibilidade de àgua. In : VIEGAS, G. P. ; Anais do simposio sobre o ,manejo de àgua na agricultura. Campinas, fundaçao Cargill, 1987. p.27-51.

CHAMAYOU H. et LEGROS J.P. (1989) - Les bases physiques, chimiques et minéralogiques de la Science du Sol. Presse Universitaire de France, Paris, 593p.

CHAUVEL A. ; PEDRO G. et TESSIER D. (1976) - Rôle du fer dans l'organisation des matériaux kaolinitiques. Etudes expérimentales. Science du Sol (2) 101-113.

CHAUVEL A. (1977) - Recherche sur le transformation des sols ferralitiques des Casamance (Sénégal). Travaux et documents de l'ORSTOM 62, Paris, 532p.

CHAUVEL A. et NOBREGA M.T. (1980) - Comportamento dos solos argilosos desenvolvidos sobre basaltos do Brasil meridional apos tratamento com cal. IV Reuniao aberta da industria da cal. ORSTOM / INSTITUTO DE GEOCIENCIAS - USP / ABPC. Boletim n°12 : 124 - 172.

CHAUVEL A., (1982) - Os latossolos amarelos àlicos argilosos dentro dos ecosistemas das bacias experimentais do INPA e da regiao vizinha. Acta Amazon., 123 : 47-60.

CHAUVEL A. ; LUCAS Y. et BOULET R. (1986) - On the genesis of the soil mantle in the region of Manaus, Central Amazonia. in "The dynamics of the Amazonia Terra Firme Forest", Experientia, 43 (3) : 285-299.

CHAUVEL A. ; GUILLAUMET J.L. et SCHUBART H.O.R. (1987) - Importance et distribution des racines et des êtres vivants dans un "latossol" argileux sous forêt amazonienne. Rev. Ecol. Biol. Sol, 24 (1) :19-48.

CHAUVEL A. ; GRIMALDI M. et TESSIER D. (1991) - Changes in porespace distribution following deforestation and revegetation. An example from the central Amazon basin, Brazil. Forest Ecology and Management. 38 : 259-271.

CHENU C. et GUERIF J. (1991) - Mechanical strength of clay minerals as influenced by an adsorbed polysaccharide. Soil Sci. Soc. Am. 55 : 1076-1080.

CHRETIEN J. (1986) - Rôle du squelette dans l'organisation des sols. Thèse Université de Dijon, 367p.

CHRETIEN J. et PEDRO J. (1987) - Granulométrie, porosité et spectre poral de sols développés sur formations détritiques. Cas des terrasses alluviales de la Saône. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., Vol XXIII, n°1, p.43-54.

COLLEUILLE H. (1993) - Approches physique et morphologique de la dynamique structurale des sols. Application à létude de deux séquences pédologiques tropicales. Thèse Doctorat de l'Univ. Peris VI, spécialité : Pédologie. 353p.

COMISSAO DE SOLOS DO CNEPA (1960) - Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado Sao Paulo. Serviço Nacional de Pesquisas Agronômicas. Bol. n°12, Rio de Janeiro, Brasil.

CORDANI U.G. et VANDOROS P. (1967) - Basaltic rocks of the Parana basin, in "Problems in Brazilian Gondwana Geology". I International Synposium on the Gondwana Stratigraphy and Palaeontologyy, Parana, Brazil. p. 207 - 231.

CORDIER Y. (1983) - Etude de l'influence des travaux culturaux sur les propriétés mécaniques et physiques d'un sol limoneux. Thèse Docteur Siences Agronomique. Université de Gembloux, Belgique, 249p.

COSTER M. et CHERMANT J.L. (1989) - Précis d'analyse d'image. Presses du CNRS. 560p.

COULOMB I. ; MANICHON H. et ROGER-ESTRADE J. (1990) - Evolution de l'état structural sous l'action des systèmes de culture. In Actes du colloque "La structure des sols et son évolution". Eds.Boiffin J; et Marin-Laflèche A., INRA Laon, 137-155.

COULOMB I. (1991) - Analyse Quantitative du Comportement du Sol au Labour : Role de L'Etat Structural Initial. Thèse INgénieur Agronome INA-PG. 230p. + annexes.

COULON E. (1988) - Conséquence du tassement sur l'organisation des sols sableux. Thèse Doctorat Univ. d'Orléans, 242p.

CURI N. (1975) - Relacçoes genéticas e geomorficas en solos das encostas interior e superior de nordeste, no Rio Grande do Sul. M.S. Thesis UFRGS, Faculdade de Agronomia, Porto Alegre.

CURMI P. ; KERTZMAN F.F. et QUEIROZ NETO J.P. (1992) - Degradation of structure and hydraulic properties in an Oxisol under cultivation (Brazil). In : SOIL MICROMORPHOLOGY : STUDIES IN MANAGEMENT AND GENESIS. Ed. by A.J.Ringrose-Voase. Develepment in Soil Science, 22 : 569-579.

CURMI P. (1990) - Profil cultural sur les "Latosolo Roxo" du Parana. Compte rendu de mission au Brésil dans le cadre de l'accord CAPES / COFECUB - 35/87.

D'ACQUI L.P. ; BRUAND A. et PAGLIAI M. (1994) - Study of soil porosity with mercury porosimetry and image analysis on backscattered electron scanning images (BESI). Aplication to tilled "crusting soils" in Zimbabwe. In : SOIL MICROMORPHOLOGY : STUDIES IN MANAGEMENT AND GENESIS. Ed. by A.J.Ringrose-Voase. Develepment in Soil Science, 22 : 581-590.

DAGNELIE P. (1969) - Théorie et méthodes statistiques. Applications agronomiques. Ed. Les Presses Agronomiques de Gembloux A.S.B.L. Volumes I et II, 822p..

DALLA ROSA A. (1981) - Pràticas mecânicas e culturais na recuperaçao de caracteristicas fisicas de solos degradados pelo cultivo - solo Santo Angelo (Latossolo roxo distrofico). Tese de M. SC.. Porto Alegre, UFRGS, 136p.

DELVAUX B. ; HERBILLON A. J. et VIELVOYE L. (1989) - Characterization of a weathering sequence of soils derived from volcanic ash in Cameroon. Taxonomic, mineralogical and agronomic implications : Geoderma 45, 375-388.

DERDOUR H. ; ANGERS D.A. et LAVERDIERE M.R. (1993) - Caractérisation de l'espace poral d'un sol argileux : effets de ses constituants et du travail du sol. Can. J. Soil Sci. 73 : 299-307.

DERPESCH R. ; ROTH C.H. ; SIDIRAS N. et KÖPKE U. (1991) - Controle de erosao no Paranà, Brasil : Sistema de cultura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. 272p.

DERPESCH R. ; SIDIRAS N. et ROTH C.H. (1986) - Results of studies made from 1977 to 1984 to control erosion by cover crops and notillage técniques in Paranà, Brazil. Soil Tillage Research. Amsterdam, 8 : 253 - 263.

DERSIGNY C. ; GUIMARAES M.F. et VISINTIN T.M.R. (1990) - Observaçao do estado estrutural e da repartiçao espacial do sistema radicular do milho cultivado num Latosolo roxo. Resumos, Londrina, 1990.

DIAMOND S. (1970) - Pore size distributions in clays. Clays and Clay Min.,18 : 7-23.

DUCHAUFOUR Ph. (1977) - In : Pédologie. 1 - Pédogenèse et Classification. Masson, Paris, 477p.

DUFEY J.E. et BANIN A. (1979) - Particle shape and size of two sodium-calcium montmorillonite clays. Soil Sci. Am. J., 43, 782 - 785.

EDWARDS W.M. ; NORTON L.D. et REDMOND C.E. (1988) - Characterizing macropores that affect infiltration into nontilled soil. Soil Sci. Am.J. 52, 483-487.

EL-SWAIFY S.A. (1976) - Changes in the physical properties of soil clays due to precipitated aluminium and iron hydroxides : II. Colloidal Interactions in the absence of drying. Soil Sci. Soc. Am. J., 40 : 516 - 520.

ELTZ F.L.F. ; PEIXOTO R.T.G. et JASTER F. (1989) - Efeitos de sistemas de preparo do solo nas propriedades fisicas e quimicas de um Latossolo bruno àlico. R. Bras. Ci. Solo, Campinas 13(2) : 259-267, maio.

EMBRAPA (1972) - Serviço de levantamento de solos : Levantamento de reconhecimento dos solos do oeste do Estado do Paranà. Curitiba, EMPRAPA - SNLCS / DNPEA / DPP / CERENA / IBC (Boletim Técnico, 39).

EMBRAPA (1984) - Serviço de levantamento de solos : Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado do Paranà. Curitiba, EMPRAPA - SNLCS / SUDESUL / IAPAR, 2.V (Boletim Técnico, 57).

ESCHENBRENNER V. (1987) - Contribution des termites à la micro-agrégation des sols tropicaux. Cah. ORSTOM, Sér. Pédol., 22 (4) : 394 - 408.

ESCHENBRENNER V. (1987) - Les glébules des sols de Côte d'Ivoire. Nature et origine en milieu ferralitique. Modalités de leur concentration. Rôle des termites. Thèse ès Sci. Univ. Dijon.

FASOLO P.J. (1978) - Mineralogical identification of four igneous extrusive rock derived Oxisols from State of Parana, Brazil. M.S. thesis, Pordue University.

FAURE A. (1971) - Contribution à l'étude du mécanisme du compactage des sols. Notion de potentiel de lubrification. Ann.Agro., 22(5) : 487-513.

FAURE A. et FIES J.C. (1972) - Etude expérimentale de la sensibilité au compactage des matériaux meubles en fonction de leur composition granulométrique. Ann.Agron., 23(3) : 317-322.

FAURE A. (1978) - Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Univ. Scientifique et Médicale de Grenoble, 137p.

FERREIRA M.M. (1988) - Influencia da mineralogia da fraçao argila nas propriedades fisicas de latossolos brasileiros. Tèse UFV, Viçosa. 79 p.

FERREIRA M.M. et MARCOS Z.Z. (1983) - Estimativa da capacidade de campo de Latossolo Roxo Distrofico e Regossolo através do ponto de inflexäo da curva caracteristica de umidade. Cienc.Prat.Lavras, 7 (1) : 96-101.

FIES J.C. (1984) - Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelette : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données four,ies par la porosimètrie à mercure. Agronomie, 4 (9) : 891-899.

FITZPATRICK E.A. (1984) - Micromorphology of soils. Chapman and Hill Pub., USA, 433p.

FRANZMEIER D.P. et KROSSA Jr.S.J. (1968) - Soil swelling. Laboratory measurements and relation to other soil properties. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 21 : 491 - 494.

GANTZER C.J. et BLAKE G.R. (1978) - Physical characteristics of Le Sueur clay loam soil following no-till and conventional tillage. Agron. J. 70 : 835-857.

GERMANN P. et BEVEN K. (1981) - Water flow in soil macropores. I. An. experimental approach. J. Soil Sci. 32, 1-13.

GILLMAN G.P. (1984) - Using variable charge characteristics to understand the exchangeable cation status of oxid soils. Aust. J. Soil Res., 22 : 71 - 80.

GRIMALDI M. (1981) - Contribution à l'étude du tassement des sols : évolution de la structure d'un matériau limoneux soumis à des contraintes mécaniques et hydriques. Thèse ENSA Rennes, 220p.

GRIMALDI M. et TESSIER D. (1986) - Changements de propriétés de retrait, de gonflement et de rétention d'eau d'un matériau limoneux soumis à un compactage dynamique. Science du sol, 24 : 319-336.

GRIMALDI M. (1989) - Contribution à l'étude d'une couverture pédologique sur formation sédimentaire de la région de Manaus. Analyse de l'espace poral et des propriétés de rétention d'eau ; effets du défrichement et de la culture de Pueraria. Rapport de travail consécutif à la mission à l'INPA (Manaus) du 20 au 31 Octobre 1987. 20p., 15 fig.GRI.

GRIMALDI M. ; SARRAZIN M. ; CHAUVEL A. ; LUIZAO F. ; NUNES N ; RODRIGUEZ M.R.L. ; AMBLARD P. et TESSIER D. (1993) - Effets de la déforestation et des cultures sur la structure des sols argileux d'Amazonie brésilienne. Cah.Agric. 2 : 36-47.

GRIMALDI M. et BOULET R. (1990) - Relation entre l'espace poral et le fonctionnement hydrodynamique d'une couverture pédologique sur socle de Guyanne française. Cah. ORSTOM, sér.Pédol., XXV, 3 : 263-275.

GROHMANN F. (1960) - Distribuiçao e tamanho de poros em tres tipos de solos do estado de Sao Paulo. Bol. Tec. I.A.C., Campinas, 19 (21) : 319 - 328.

GROHMANN F. et QUEIROZ NETO J.P. (1966) - Efeito da compactaçao artificial de dois solos limo-argilosos sobre a penetraçao das raizes do arroz. Bragantia, Campinas (SP), 25 (38) : 421 - 431.

GUERIF J. et FAURE A. (1979) - Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage. Etude statistique. Ann. Agron., 30(5) : 387-399.

GUERIF J. (1982) - Compactage d'un massif d'agrégats : effet de la teneur en eau et de la pression appliquée. Agronomie, 2 (3) : 287-294.

GUIMARAES M.F. ; RALISCH R. et MEDINA C.C. (1993) - O perfil cultural e as modificaçoes da estrutura do solo. In : XXIV Congesso Brasileiro de Ciência do Solo. Cerrados : Fronteira agricola no século XXI. RESUMOS, Volume I. Goiania (GO). Pags.23-25.

HALITIM A. ; ROBERT M. ; TESSIER D. et PROST R. (1984) - Influence des cations échangeables (Na^+, Ca^{++}, Mg^{++}) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétantion en eau, conductivité hydraulique) de la montmorillonite. Agonomie, 4 (5) : 451 - 459.

HALITIM A. ; ROBERT M. ; TESSIER D. et PROST R. (1984) - Influence des cations échangeables (Na^+, Ca^{++}, Mg^{++}) et de la concentration saline sur le comportement physique (rétantion en eau, conductivité hydraulique) de la montmorillonite. Agonomie, 4 (5) : 451 - 459.

HALL D.G.M. ; REEVE M.J. ; THOMASSON A.J. et WRIGHT V.F. (1977) - Water retention, porosity and density of field soils. Soil Survey Tech. Monogr. n°9, Rothamsted Experimental Station, Harpenden, 75p.

HALLAIRE V. (1991) - Un mèthode d'analyse bidimensionnelle du retrait d'échantillons naturels de sol. Science du sol. 29.

HALLAIRE V. et COINTEPAS J.P. (1993) - Caractérisation de la macroporosité d'un sol de verger par analyse d'image. Agronomie, 13, 155-164.

HALLAIRE V. et CURMI P. (1991) - Image analysis of pore space morphology in soil sections, in relation to water movement. In : SOIL MICROMORPHOLOGY : STUDIES IN MANAGEMENT AND GENESIS. Ed. by A.J.Ringrose-Voase. Develepment in Soil Science, 22 : 559-567.

HARTMANN C. (1991) - Evolution et comportement de sols sablo-argileux ferralitiques sous culture de palmiers à huile. Cas de la plantation R.Michaux à Dabou (Côte d'Ivoire). Thèse Doctorat de l'Univ. Paris 6. 201p.

HARTMANN C. ; TESSIER D. et WILDING L.P. (1992) - Simultaneous use of tranmitted and incident ultraviolet light in describing soil microfabrics. Soil Sci. Soc. Am. J., 56 : 1867-1870.

HARTMANN C. ; TESSIER D. etPEDRO J. (1994) - .Rôle des conditions pédoclimatiques sur la présence d'une savane en milieu forestier tropical africain. Cas de la savane de Dabou (Côte-d'Ivoire). C. R. Acad. Sci. Paris, t.319, série II, 1525-1533.

HENIN S. ; FEODOROFF A. ; GRAS R. et MONNIER G. (1960) - Le profil cultural. 1ére éd., Masson, Paris, 320p.

HENIN S. ; FEODOROFF A. ; GRAS R. et MONNIER G. (1969) - Amélioration du profil cultural. II - Le travail du sol (chapitre IV). In : "Le profil cultural". 2éme éd., Masson, Paris, pags 173 - 198.

HERBILLON A. (1989) - A chemical estimation of weatherable minerals present in the diagnostic horizon of the low activity clay soils. 8th. Int. Soil classification workshop, Rio de Janeiro, Brazil.

HILLEL D. (1971) - Soil and water. Physical principles and processes. Academic Press. New-York, 288p.

IAPAR (1978) - Manual agropecuàrio para o Paranà. Londrina, IAPAR, V.2.

ISMAIL S.N.A. (1975) - Micromorphometric soil porosity characteristics by means of electo-optical image analysis (Quantimet 720). Soil Surv. Pap., 9.

JONGERIUS A. ; SCHOONDERBEEK D. ; JAGER A. et KOWALINSKI S. (1972) - Electro-optical soil porosity investigation by means of Quantiment-B equipament. Geoderma 7, 177-198.

KAY B.D. (1990) - Rates of change of soil structure under different cropping systems. Adv.Soil Sci., 12 : 1 -52.

KEMPER B. (1979) - Estudos edafologicos. In : IAPAR / GTZ. Convênio de cooperaçao técnica. Londrina (PR), 127p.

KENG J.C. et UEHARA G. (1974) - Chemistry mineralogy and toxonomy of oxisols and ultisols. Soil Grop Sci. Soc., Floride, Proc., 33 : 119 - 126.

KILASARA M. (1989) - Evolution actuelle des sols de la couverture ferralitique du secteur de Muheza (Tanzanie). Origine et conséquences. Thèse Docteur de l'Univ. de Paris VI. 345p.

KILASARA M. et TESSIER D. (1991) - Intérêt de meseres physiques sur échantillons non remaniés dans la caractérisation des sols ferralitiques. Application à la couverture ferralitique du district de Muhesa (Tanzanie). Cah. ORSTOM, sér. Pédolog., vol. XXVI, n°2 : 91-103.

LAL R. (1979) - The role of physical properties in maintaining productivity,of soils in the tropics. In : LAL R. ; GREENLAND D. J. Soil physical properties and crop production in the tropics. New York, John Wileys and Sons, 1979. p. 3 - 5.

LAMERS J.G. ; PERDOCK U.D. ; LUMKES L.M. et KLOOSTER J.J. (1986) - Controlled trafic farming systems in the Netherlands. Soil and Tillage Research, 8 : 65-76.

LARSON W.E. et OSBORNE G.J. (1982) - Tillage accomphisment and potencial. In : Predicting tillega effects on soil physical properties and processus. ASEA Spacial Publication, V;44, p. 1 -12.

LASSAUSSE C. (1991) - Organisation et comportement physico-hydrique compares de deux sols a structure microagregée de l'aubrac (Massif Central, France) : Sols Andiques et sols Bruns Acides. Thèse Docteur de l'Université de Paris 6. 191p. + annexes.

LAWRENCE G.P. (1977) - Measurement of pore sizes in fine - textured soils : A review of existing techiniques. J. Soil Sci., 28 : 527-540.

LAWRENCE G.P. (1978) - Stability of soil pores during mercury intrusion porosimetry. J. Soil Sci., 29 : 299-304.

LEPRUN J.C. (1994) - Effets de la mise en culture sur la dégradation physique des sols. Bilan du ruissellement et de l'erosion de quelques grands écosystèmes brésiliens. In: Etude et gestion des sols. AFES, 1(1) : 45-65.

LEVEQUE A. (1967) - Les sols ferralitiques de Guyane française. Mémoire ORSTOM n°3, Chapitre III, 126 - 150.

LOUGHMAN F.C. (1969) - Chemical weathering of the silicate minerals. American Elsevier Publishing Company, Inc., New York. 154p.

LUCAS Y. ; CHAUVEL A. ; BOULET R. ; RANZANI G. et SCATOLINI (1984) - Transiçao "Latossolo-podzois" sobre a Formaçao Barreiras na regiao de Manaus, Amazonia. Rev.Bras.Ciên.Solo, 8 : 325-335.

LUCAS Y. ; CHAUVEL A. et AMBROSI J.P. (1986) - Process of aluminium and iron accumulation in Latosols developed on quartz rich sediments from central Amazonia (Manaus, Brasil). Proc. int Symp. on Geoch. of the Earth Surface, Granada (Spain).

LUCAS Y. (1989) - Systèmes pédologiques en Amazonie brésilienne. Equilibres, déséquilibres et transformations. Thèse Univ.Poitiers, 177p.

LUCAS Y. ; LUIZAO F. J. ; CHAUVEL A. ; ROUILLER J. & NAHON D. (1993) - The relation between biological activity of the rain forest and mineral composition of soils. Science / original / 418a4113.

MAACK R. (1968) - Geografia fisica do Estado do Parana. Banco do desenvolvimento do Parana. Curitiba.

MACHADO J.A. et BRUM A.C.R. (1978) - Efeitos do sistemes de cultivo reduzido e convencional na capacidade de infiltraçao da àgua no solo. In : Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservaçao do Solo, 2, Passo Fundo, 1978. Anais...Passo Fundo, EMBRAPA-CNPTrigo, 1978. p.331-339.

MACKIE-DAWSON L.A. ; MULLINS C.E. ; GOSS M.J. ; COURT M.N. et FITZPATRICK E.A. (1989) - Seasonal changes in the structure of clay soils in relation to soil management and crop type : 2.Effects of cultivation and cropping at Compton Beauchamp. J. Soil. Sci. 40 : 283-292.

MANICHON H. ; ROGER-ESTRADE J. et LETERME Ph. (1988) - Analyse des profils culturaux et des itinéraires techiniques. Conséquences pour le blé. Doc. Mult. INA-PG, Chaire d'Agronomie. Convention INRA/ONIC, volet 2, RCI.

MANICHON H. (1982) - Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : Elaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse Docteur Ingénieur INA-PG, 241p. + annexes.

MANICHON H. (1987) - Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'efféts de compactage des horizons travaillés. In : Soil compaction and Regeneration, Ed. G. Monnier et M. J. Gosse, Balkema, Rotterdam, Boston, 39-52.

MANICHON H. et GAUTRONNEAU Y. (1987) - Guide méthodologique du profil cultural. CEREF / GEARA, Lyon, 71p.

MANICHON H. et ROGER-ESTRADE J. (1990) - Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. In : Les systèmes de culture, Eds. Combes et Picard, INRA, 27-55.

MAPANGUI A. (1992) - Etude de l'organisation et du comportement de sols ferralitiques argileux de la valée du Niari (Gongo) : Conséquences sur l'évolution physique sous culture de manioc en mécanisé depuis 15 ans. Thèse Docteur de L'Université de P.et M.Curie (Pédologie). 218p. + annexes.

MARSHAL R.M. et RANEY W.A. (1960) - Modifying soiul profiles. In : Power to produce. The year of agriculture soil. Washington. The United States Government Priting Office. p. 123-128.

Mc NEAL B.L. ; NOWELL W.A. et COLEMAN N.T. (1966) - Effect of soluction composition on the swelling of extrcted soil clays. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 30, 313 - 317.

Mc NEAL B.L. et COLEMAN N.T. (1966) - Effect of soluction composition on soil hydraulic conductivity. Soil Sci. Soc. Am. Proc., 30, 308 - 312.

McBride (1989) - Minerals in Soil Environments. Second Edition. Soil Sci. Soc. of Am., Madisons, Wisconsin. 1244p.

MEHRA O. P. et JACKSON M. L. (1960) - Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. Clays and Clay Miner., 7 : 317 - 327.

MEKARU T. et UEHARA G. (1972) - Anion adsorption in ferruginous tropical soils. Proc. Soil Sci. Soc. Am., 36 : 296 - 300.

MELFI A.J. et LEVI F. (1971) - Geochemical and mineralogical study on the first stages of weathering of basic and related rocks. Part 1 - Mineralogical study. Rev. Bras. Geociencias. 1 : 22 - 28.

MIEUSSENS C. ; MAGNAN J.P. et SOYEZ B. (1985) - Essais de compressibilité à l'odomètre - Procédures recommandées par les laborayoires de Ponts et Chaussées. Bull. liaison labo. P.et Ch., 139. p. 5-18.

MONNIER G. et GUERIF J. (1988) - Conséquences physiques et agronomiques du tassement des sols. CR. Acad. Agric. Fr. 74, n°1, p. 29-42.

MONNIER G. STENGEL P. et FIES J.-C. (1973) - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron., 24 (5) : 533-545.

MORDRY J. ; SVATA M. et VAN BRAKEL J. (1981) - Thematic bibliography of mercure porosimetry. Powder Tech., 29 : 13-43.

MOURA FILHO W. (1970) - Studies of a Latosol Roxo (Eutrustox) in Brazil : Clay mineralogy, micromorphology effect of ion release, and phosphate reactions. Agricultura, Soil Science. North Caroline University, 64p.

MURPHY C.P. ; BULLOCK P. et TURNER R.H. (1977) - The measurement and characterization of voids in soil thin section by image analysis. Part I : principales and techniques. J. Soil Sci., 28 (3) : 498 - 508.

MURPHY C.P. et KEMP R.A. (1984) - The over-estimation of clay and the underestimation of pores in soil thin sections. J. Soil Sci., 35 : 481-495.

MURRAY R.S. ; COUGHLAN K.J. et QUIRK J.P. (1985) - Nitrogen Sorption Isotherms and the Microstructure of Vertisols. Aust. J. Soil Res., 23 : 137-149.

MUZILLI O. (1981) - Manejo da fertilidade do solo. In : IAPAR - Plantio direto no Estado do Paranà. Londrina (PR), p. 43 - 57 (Circular, 23).

NIMER E. (1979) - Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro, IBGE 422p.

OLIVEIRA E.F. ; BAIRRAO J.F.M. ; SANTANA M. ; GOELZER L.F.D. et BONFIM C.F. (1986) - Avaliaçao de diferentes sistemas de preparo de solo sobre o rendimento de graos de soja. In : OCEPAR - Resultados de Pesquisa na Safra de Verao 1985 / 1986. Cascavel, p. 104 - 105.

OLIVEIRA E.F. ; BAIRRAO J.F.M. ; SANTANA M. ; GOELZER L.F.D. ; BONFIM C.F. ; SILVA J. et BEGO A. (1987) - Efeito do sistema de preparo do solo na sucessao trigo / soja. In : OCEPAR - Resultados de Pesquisa na Safra de Inverno. Cascavel, p. 151 - 152.

OLIVEIRA E.F. ; BAIRRAO J.F.M. ; CARRARO I.M. ; GOELZER L.F.D. ; BONFIM C.F. ; SILVA J. ; ADERALDO G.S. et DAMBROS A. (1988) - Efeito do sistema de preparo do solo sobre o rendimento des graos de soja. In : OCEPAR - Resultados de Pesquisa da Safra de Verao 1986 / 1987. Cascavel, p. 131 - 132. (Resultados de Pesquisa, 01).

OLIVEIRA E.F. ; BAIRRAO J.F.M. ; CARRARO I.M. ; OLIVEIRA H. et BALBINO L. C. (1989) - Efeito do sistema de preparo do solo sobre algumas caracteristicas fisicas e rendimento de graos de soja e milho. In : OCEPAR - Resultados de Pesquisa de Verao 1987 / 1988. Cascavel, p. 233 - 237. (Resultados de Pesquisa, 03).

OLIVEIRA E.F. ; BAIRRAO J.F.M. ; CARRARO I.M. et BALBINO L.C. (1990a) - Efeito do sistema de preparo do solo nas suas caractéristicas fisicas e quimicas no rendimento de trigo e soja em Latosolo Roxo. In : OCEPAR - Resultados obtidos de 1982 à 1988. Cascavel, 54p. (Resultados de Pesquisa, 4).

OLIVEIRA E.F. ; BAIRRAO J.F.M. ; BALBINO L.C. et OLIVEIRA H. (1990b) - Efeito do sistema de preparo do solo na cultura do trigo (Triticum aestivum L.) . In : OCEPAR - Resultados de Pesquisa de Inverno. Cascavel, 53p.

OLIVEIRA E.F. ; BAIRRAO J.F.M. ; BALBINO L.C. et GAUDENCIO C.A. (1990c) - Efeito da rotaçao de culturas em plantio direto nas caractéristicas fisicas de um Latossolo Roxo distrofico. In : 8° Congresso Brasileiro e Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservaçao do Solo. Londrina 22 - 29 / 07 / 1990.

OLIVEIRA E.F. (1985) - Efeito do preparo do solo com e sem queima de residuos de trigo (triticum aestivum) sobre as condicoes fisicas de um Latosolo. Porto Alegre, UFRGS. 142 p. (Tèse M.Sc.).

OLIVEIRA E.F. et BALBINO L.C. (1991) - Infiltraçao de àgua no solo submetido à diferentes sistemas de preparo. OCEPAR, Cascavel. p. 1346 - 1356.

OLIVEIRA E.F. et BALBINO L.C. (1992) - Contribuiçao do manejo do solo no controle da erosao. In : 1° Reuniao Paranaense sobre Erosao e Sedimentaçao. Ponta Grossa, 25 - 26/ 06 / 1992.

OLIVEIRA J.B. ; JACOMINE P.K.T. et CAMARGO M.N. (1992) - Classes gerais de solos do Brasil : guia auxiliar para seu reconhecimento. Jaboticabal (SP), FUNEP, 201p.

OLIVEIRA L.B. ; DANTAS H.S. ; CAMPELO A.B. ; GALVAO S.V. et GOMES I.F. (1968) - Caracterizaçao de adensamento no sub-solo de uma area de "TABULEIRO" de Estaçao Experimental do Curado, Recife. Pesq.Agrop.Bras., 3 : 207-214.

ONI K.C. et ADEOTI J.S. (1986) - Tillage effects on differently compcted soil and cotton yeld in Nigeria. Soil and Tillage Research, 8 : 89-100.

PAGLIAI M. ; La MARCA M. et LUCAMANTE G. (1983) - Micromorphometric and micromorphological investigations of clay loam soil in viticulture under zero and conventional tillage. J. Soil Sci. 34 : 391-403.

PAPY F. (1984) - Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour au printemps. Effet des conditions climatiques et de l'état structural. Thèse Docteur Ingénieur INA-PG, 232 p. + annexes.

PAPY F. (1986) - Effet de l'état structural d'une couche labourée sur la rétantion d'eau. Agronomie, 6(6):555-565.

PAPY F. (1987) - Comportement d'une couche labourée sous des actions de compactage en fonction de son état hydrique et structural. Agronomie, 7(2):111-121.

PARFITT R.L. (1980) - Chemical properties of variable change soils. In : B. K. G. Theng (Ed.). Soils with variable charge. New Zealand Soc. Soil Sci. 448 p.

PARKS G.A. et de BRUGN P.L. (1962) - The zero point of charge of oxides. J. Phys. Chem., 66 : 967 - 973.

PEBAYLE R. (1992) - Le Brésil. 1ère Ed. Presse Universitaire de France, Paris, 125p.

PEDRO G. ; CHAUVEL A. et MELFI A.J. (1976) - Recherches sur la constitution et la genèse des Terras Roxa Estruturada du Brésil. Introduction à une étude de la pédogénèse ferrallitiques. Ann. Agron. 27(3) : 265 - 294.

PEDRO G. (1964) - Contribuition à l'étude expérimentale de l'altération géochimique des roches cristallines. Thèse, Paris, 344p.

PEDRO G. (1966) - Intérêt géochimique et signification minéralogique du paraètre moléculaire Ki = SiO_2/Al_2O_3 dans l'étude des latérites et bauxites. Bull.Gr.Franç.Argiles, XVIII, 13 : 19-31.

PEDRO G. (1984) - La pédologie cent ans après la parution du "Tchernozem russe" de B. B. Dokouchaev (1883 - 1983). Sci. Sol Bull. A.F.E.S., 2 : 81 - 92.

PELLERIN F.M. (1980) - La porosimétrie au mercure appliquée à l'étude géochimique des sols et des roches. Bull. Liais.Lab.Ponts et Chaussées, 106 : 105-116.

PERRET S. (1992) - Propriétés physiques, hydriques et mécaniques de sols andiques de la Réunion. Facteurs d'évolution des horizons culturaux, implications agronomiques et écologiques. Thèse de Doctorat en Sciences Agronomiques. CIRAD. 278 p. + annexes.

PHILLIPS R. et KIRKHAM D. (1962) - Soil compaction in the field and corn growth. Agronomy Journal, Madison, 54 : 29-34.

PICCIRILLO E.M. et MELFI A.J. (1988) - The mesozoic flood volcanism of Paranà basin : petrogenetic and geophysical aspects. Sao Paulo, USP, Instituto Astronomico e Geofisico. 600p.

PIDGEON J.D. et SOANE B.D. (1977) - Effects of tillage and direct drilling on soil properties during the growing season in long-term barley mono-culture system. J. Agric. Sci. 88 : 431-442.

PION J.C. (1979) - L'allteration des massifs cristallins basiques en zone tropicale sèche. Etude de quelques toposéquences en Haute Volta. Thèse Sci. Strasbourg, Mémoire Sciences Géologiques. N°57, 220 p.

PROST R. (1975) - Etude de l'hydratation des argiles : interactions eau-minéral et mécanisme de la rétention de l'eau. Thèse d'Etat. Univ. P. et M. Curie, Paris, 135p.

RALISCH R. ; MEDINA C.C. ; GUIMARAES M.F. ; TAVARES FILHO J. ; DERSIGNY C.G. et VISINTIN L.M.B. (1991) - O metodo do perfil cultural para auxilir na avaliacao dos efeitos do preparo sobre a estrutura do solo. In : XX Congesso Brasileiro de Engenharia Agricola. RESUMOS, 58. Londrina (PR). Pag. 68.

RALISCH R. ; GUIMARAES M.F. ; BALBINO L.C. ; MEDINA C.C. ; TAVARES FILHO J. ; DERSIGNY C.G. et VISINTIN L.M.B. (1993) - Estudos dos efeitos da realisaçao sucessiva de um mesmo tipo de manejo, sobre perfil cultural e o e Engenharia Agricola. ANAIS, V.III, Ilheus (BA), pags 2122-2135.

RALISCH R. et GUIMARAES M.F. (1994) - Avaliaçao do comportamento do solo através do perfil cultural. In : II Seminario sobre a cultura do milho "safrinha". RESUMOS, 59. Assis (SP). Pags. 9 - 15.

RAUEN M.J. (1980) - Mneralogical identification of a toposequence of soils from basaltic rocks in the State of Parana, Brazil. M.S. Thesis, Pordue University. 141p.

RESENDE M. ; CURI N. et SANTANA D.P. (1988) - Pedologia e fertilidade do solo. Interaçoes e aplicaçoes. ESAL - Lavras, POTAFOS - Piracicaba. 81p.

RESENDE M. (1976) - Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of Central Plateau of Brazil. Ph.D. Thesis, Pordue University. 273p.

RICHARDS L.A., (1947) - Pressure membrane apparatus - construction and use. Agric.Eng., 28 : 451-454.

RINGROSE-VOASE A.J. (1987) - A scheme for the quantitative description of soil macrostructure by image analysis. J.Soil Sci., 38, 343-356.

RINGROSE-VOASE A.J. (1990a) - One dimensional image analysis of soil. I. Principes. J.Soil Sci., 41 : 499-512.

RINGROSE-VOASE A.J. (1990b) - One dimensional image analysis of soil. II. Interpretation of parameters with respect to four forest soil profiles. J.Soil Sci., 41 : 513-527.

ROBAIN H. (1989) - Organisation et transformation dans une couverture ferrallitique de Guyane française. Thèse Univ. Paris VI, 189p.

ROBAIN H. ; TESSIER D. ; GRIMALDI M. et ELSASS F. (1990) - Importance de la texture des kaolinites dans la caractérisation des couvertures ferallitiques. Conséquences sur l'organisation et la stabilité physique des sols. C.R.Acad. Sci. Paris, t.311, série II, 239 - 246.

ROBERT M. (1968) - Etude expérimentale sur les processus de vermiculitisation des micas trioctaédriques ; bilan de l'évolution et conditions de genèse des vermiculites. Bull. Gr. Fr. Argiles, 20., p. 153 - 171.

ROBERT M. et TESSIER D. (1974) - Méthode de préparation des argiles de sols pour les études minéralogiques. Ann. Agron., 25 (6) : 859 - 882.

ROO H. C. (1960) - Root developement on coarse textured soil as related to tillage practiques and soil compaction. In : INTERN - Congress of Soil Science, 7, Madison, Wisc, Anais... VI. 28 : 622 - 628.

SALA G.H., (1991) - Comportement des massifs d'agrégats sous contrainte hydrique, puis oedométrique. Application à la Kaolinite de Saint-Austell et à l'horizon B du sol de Versailles. Mémoire de D.E.A. de Pédologie - I.N.R.A.-Versailles, 61p.

SALA G.H. et TESSIER D., (1992) - Importance de l'état energetique de l'eau sur l'aptitude au tassement de matériaux argileux non satures. Note présentée à revue Pédologie.

SCHNEIDER A. W. (1964) - Contribuiçao a petrologia dos derrames basalticos da Bacia do Parana. Escola de Engenharia da UFRGS. Publicaçao avulsa no 1. Porto Alegre.

SCHOFIELD R.K. (1935) - The pF of water in soil. Trans. 3rd Int. Cong. Soil Sci. (2) 37-48.

SILVA I.F. ; KLAMT E. et SCHNEIDER P. (1981) - Efeitos do sistema de manejo e tempo de cultivo sobre propriedades fisicas de um Latosolo. In : Encontro Nacional de Pesquisa sobre Conservaçao do Solo, 3, Recife (PE). ANAIS...Recife, UFRPE, p. 322 -342.

SOIL CONSERVATION SERVICE (1975) - Soil Taxonomy. A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys. U. S. Dept. Agr. Hand book n°436, 754 p.

SORANI V. (1985) - Contribution à l'étude du comportement hydrodynamique des sols développés sur les argiles de Lignières (Région Centre). D.E.A. INAPG, 84 p.

SORANI V., BRUAND A., FOURNIER B. & TESSIER D., (1987) - Comportement des horizon d'un sol argileux en fonction de l'état hydrique : Etude d'échantillons à structure conservée. Science du Sol, 25 (3) : 133-144.

STANFORD G. ; BENNETT D. L. et POWER J.L. (1973) - Conservation tillage practices and nutrient avaibility. In : National Conservation Tillage Conference, Ankeny, 1973. Proceedings... Ankeny, Soil Conservation America Socity. p. 54-62.

STENGEL P. (1976) - Incidence de la simplification du travail du sol sur la porosité de la couche arable. C. R. du colloque : Simplification du travail du sol en production céréalière. Paris, ed. I. T. C. F., 150-165.

STENGEL P. (1990) - La caractérisation de l'état structural du sol - objectifs et méthodes. In : La structure du sol et son évolution. Laon (France), 9 janvier 1990 Ed INRA Paris 1990 (Les colloques de l'INRA, n°53).

STOOPS (1986) - Multilingual translation of the terminology used in the "Handbook" for soil thin section description. Pédologie, Gand, 3 :337 - 348.

TANDY J.C. (1987) - Contribution a l'étude d'une couverture pédologique sur socle en Guyane Française. Relation entre la nature minéralogique, l'organisation des particules et le comportement hydrique. Mémoire de D.E.A. de Pédologie - I.N.R.A. - Versailles, 61p.

TANDY J.C. ; GRIMALDI M. ; GRIMALDI C. et TESSIER D. (1990) - Mineralogical and textural changess in French Guyana oxisol and their relation with relation with microaggregation. Developments in Sol Science, 19 : 1971-198.

TAVARES FILHO J. ; GUIMARAES M.F. ; RALISCH R. ; MEDINA C.C. ; DERSIGNY C.G. et VISINTIN L.M.B. (1991) - Utilisaçao do método do perfil cultural para avaliaçao do desenvolvimento de uma cultura. In : XXIII Congesso Brasileiro de Ciência do Solo. RESUMOS (157). Porto Alegre (RS). Pag.142.

TAVARES FILHO J. (1992) - Comportement physique d'un sol argileux d'Amazonie. Etude du tassement et influence de l'histoire hydrique. D.E.A. Geosciences / Pédologie. 53p.

TAVARES FILHO J. ; GRIMALDI M. et TESSIER D. (1994) - Sensitivity to compction of central amazonian basin soils : Role of mechanical and water stress. In : 15th World Congress of Soil Science. Volume 2b, p. 98 - 99.

TAYLOR H.M. et BURNETT E. (1963) - Influence of soil strength on the root-growth habits of plants. Soil Science, V.98, p. 174 - 180.

TESSIER D. (1975) - Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. Thèse Ing. CNAM, Paris, 230p.

TESSIER D. et PEDRO G. (1976) - Les modalités de l'organisation des particules dans les matériaux argileux. Evolution des principales argiles Ca au cours du phénomène de retrait. Bull. AFES, 2 : 85-99.

TESSIER D. (1978) - Etude de l'organisation des argiles calciques. Evolution au cours de la dessication. Ann. agron., 29 (4) : 319-355.

TESSIER D. et BERRIER J. (1979) - Utilisation de la microscopie électronique à balayage dans l'étude du sol. Observation de sols humides soumis à différents pF. Science du Sol, (1) : 67-82.

TESSIER D. et QUIRK J.P. (1979) - Sur l'apport de la microscopie életronique dans la connaissance du gonflement des matériaux argileux. C. R. Acad. Sci., Paris, t 288, Sér. D. : 1375-1378.

TESSIER D. (1980) - Sur la signification de la limite du retrait dans les argiles. C. R. Acad. Sci., Paris, t. 291, Série D, pp 377-380.

TESSIER D. et PEDRO G. (1980) - Sur les propriétes de gonflement des argiles dans les sols. C. R. Acad. Sci., Paris, t. 291, sér. D : 461-464.

TESSIER D. et PEDRO G. (1981) - Eletronic microscopy study of Na smectite fabric. Role of layer charge, salt concentration and suction parameters. VII th Int. Clay Conf., 165 - 176.

TESSIER D. PEDRO G. et CAMARA L. (1980) - Sur le comportement hydrique de l'organisation des argiles (Kaolinites et Smectites) au cours de la dessication et de la réhumectation. C. R. Acad. Sci., Paris t. 290, série D, pp 1169-1172.

TESSIER D. (1981) - Hydric behaviour and fabric of Ca and Na smectites. Conference argiles, étatq de l'eau. Versailles, 7p.

TESSIER D. (1984) - Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse Dr.ès-Sciences, Univ. Paris VII, 361p., INRA Versailles Ed.

TESSIER D. et BRUAND A. (1988) - Comportement et organisation des matériaux argileux. Application à l'étude de l'engorgement des sols. Colloque INRA Excès d'eau en Agriculture, 51 - 57.

TESSIER D. (1990) - Comportement et Organisation des matériaux argileux. In : Matériaux argileux. Structure, propriétés et applications. A. Decarreau ed., Soc. Franç. de Minéralogie et Cristallographie. Groupe Français des Argiles, 387 - 445.

TESSIER D. LAJUDIE A. et PETIT J.-C. (1992) - Relation between macroscopic behavior of clays and their microstructural properties applied Geochemestry, Suppl. Issue n°1 pp. 151-161.

TESSIER D. et GRIMALDI M. (1992) - Comportement et organisation des pâtes d'argiles. Importance des cycles de dessiccation-humectation. Chapitre du livre Matériaux finement divisés, J. Yvon Ed. Société Française Minéralogie Cristallographie.

TESSIER D. (1993) - Propriétés des argiles : hydratation, gonflement en relation avec leur texture. Importance pour les sols. In : Les argiles : microstructure et lois de comportement. Groupe d'études et de Recherches Géométériaux (Sols, Bétons Roches) Ed., 93 - 100.

UEHARA G. et GILLMAN G. (1980) - The mineralogy chemistry and physics of tropical soils with variable charge clays. Westview Press, Boulder Colorado 170p.

UEHARA G. et KENG J. (1975) - Management implications of soil mineraloy in Latin America. In : E. Bornemisza & A. Alvarado (Editors), Soil management in tropical America. N. Carolina State University, Rabigh, N. C., 351 - 362.

VACHIER P., CAMBIER P., PROST R. (1979) - Structure d'un milieu poreux : la craie. Ann.Agron., 30 (3) : 247-253.

VAN BRAKEL J. ; MORDRY J. et SVATA M. (1981) - Mercure porosimetry : State of the art. Powder Tech., 29 : 1-12.

VARNER G.S. ; NIEBER J.L. ; MOORE I.D. ; GEISE R.A. (1989) - Characterizing macropores in soil by computed tomography. Soil Sci. Soc. Am. J. 53, 653-660.

Van OORT (1988) - Présence et évolution des minéraux argileux accessoires de type 2:1 dans les sols ferralitiques d'origine volcanique de la Guadeloupe. Conséquences physico-chimiques. C. R. Acad. Sci. Paris, t. 307, Série II, p. 1297-1302.

VIEIRA M.J. (1978) - Propriedades fisicas do solo que afetam a produtividade agricola. In : IAPAR. Manual Agropecuàrio para o Paranà. Londrina (PR), 2:37 - 44.

VIEIRA M.J. et MUZILLI O. (1984) - Caracteristicas fisicas de um Latossolo vermelho escuro sob diferentes sistemas de manejo. Pesq. Agropec. Bras., Brasilia, 19(7) : 873-882, jul. 1984.

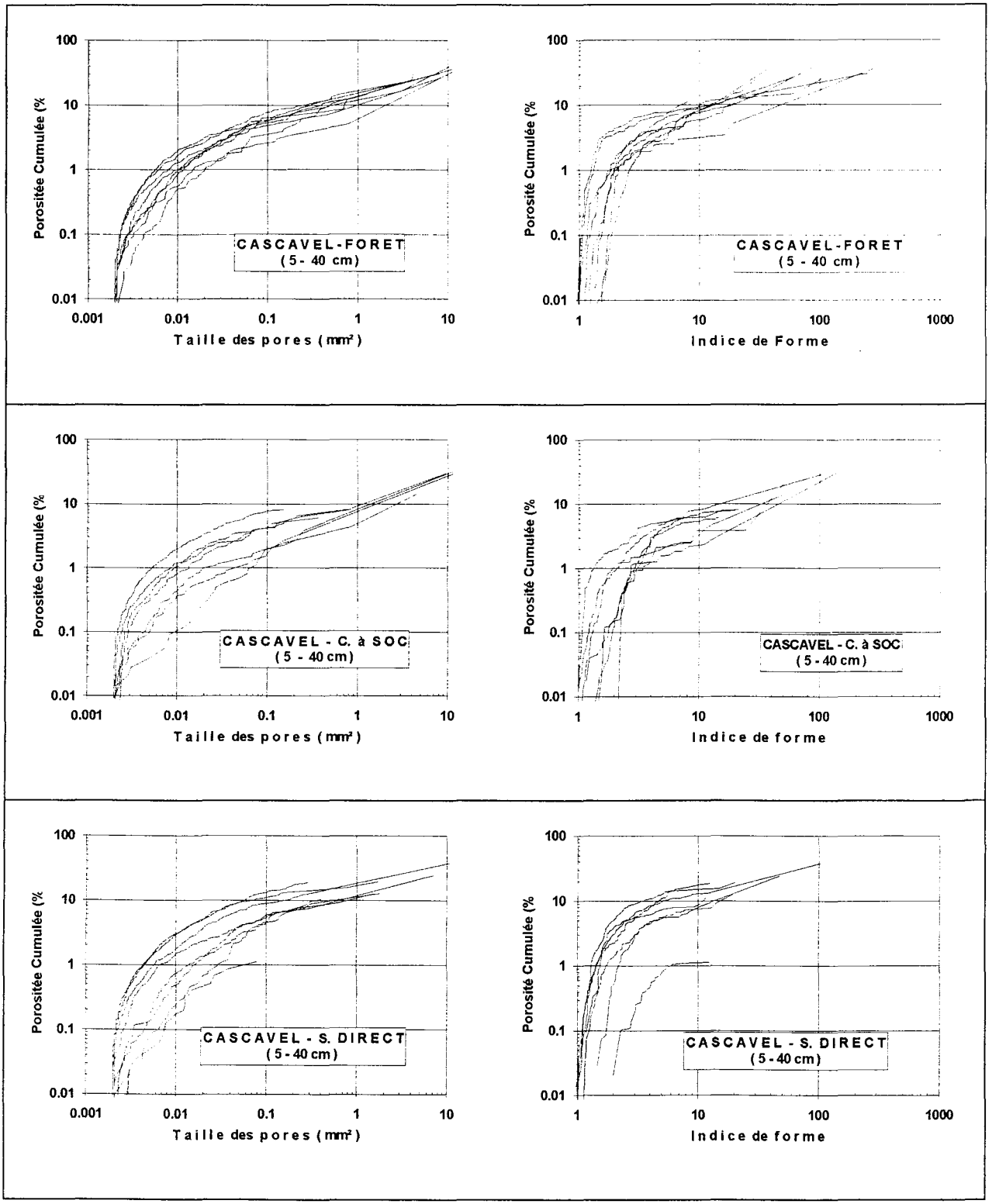
VINCENTE M. ; RAZZAGUE-KARIMI M. et ROBERT M. (1977) - Formation of Aluminium hydroxyvermiculite (intergrade) and smectite from mica under acidic conditions. Clay Minerals, 12 : 101 - 112.

VOLKOFF B. (1985) - Organisations régionales de la couverture pédologique du Brésil. Chronologie des différenciations. Cah. ORSTOM, sér. Pédol., V. XXI (4) : 225 - 236.

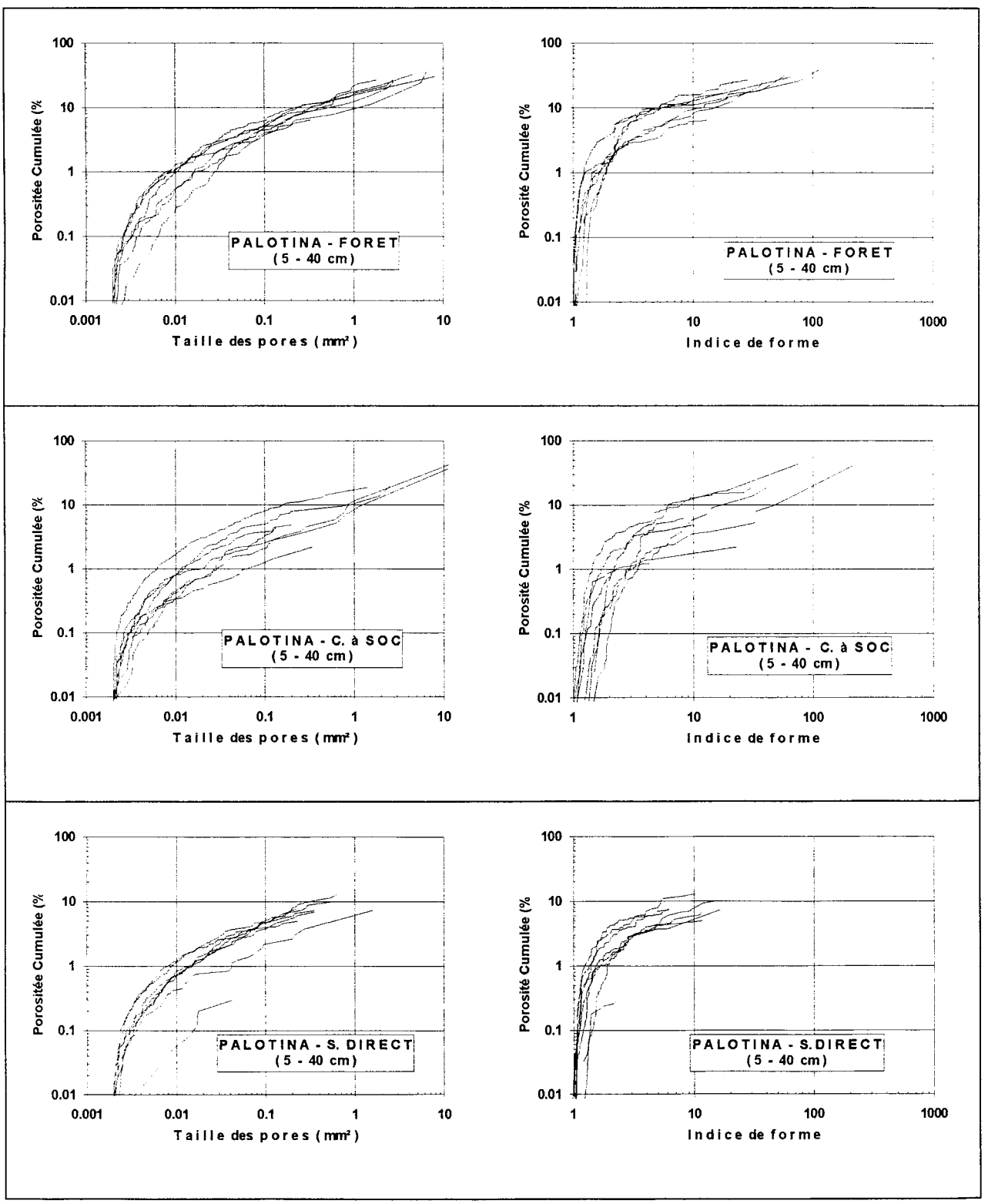
ZIMMER D. (1981) - Etude expérimentale des modifications de certaines caractéristiques de l'espace poral d'un matériau sablo-argileux sous l'effet de contraites. DEA de Pédologie. Université Paris VII. 43p.

ANNEXES

ANALYSE D'IMAGE - courbes cumulée de la taille des pores et de la forme des pores pour le site de CASCAVEL.



ANALYSE D'IMAGE - courbes cumulée de la taille des pores et de la forme des pores pour le site de PALOTINA.



Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) du profil FORET à CASCAVEL.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)		Indice d'air (a)
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)	-------
1	1,476	15,04	1,183	2,96	0,293
1,5	1,418	19,046	1,153	15,70	0,265
2	1,403	22,24	0,990	13,64	0,413
2,5	1,396	16,19	0,901	15,87	0,495
3	1,395	16,56	0,831	14,44	0,564
3,5	1,382	15,70	0,822	12,29	0,560
4	1,383	14,97	0,832	11,30	0,551
4,2	1,343	16,83	0,736	5,30	0,607
4,45	1,337	20,34	0,732	10,25	0,605
4,84	1,327	4,75	0,716	14,11	0,611
5,18	1,094	13,80	0,567	25,22	0,527
5,42	1,069	12,44	0,704	19,80	0,665
5,52	1,059	17,85	0,308	25,65	0,751
5,75	1,048	16,60	0,132	21,21	0,916
6,03	0,960	14,69	0,097	12,37	0,863
7	0,876	9,03	0,000	0,000	0,897

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) du profil CHARRUE à SOC à CASCAVEL.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)		Indice d'air (a)
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)	-------
1	1,386	8,15	1,128	7,27	0,258
1,5	1,237	6,79	1,004	3,88	0,233
2	1,126	6,66	0,900	7,89	0,226
2,5	1,114	4,67	0,841	11,06	0,273
3	1,104	7,97	0,777	15,57	0,327
3,5	1,018	6,974	0,701	12,27	0,317
4	1,007	12,91	0,695	10,79	0,312
4,2	0,971	9,99	0,678	7,67	0,293
4,45	0,966	12,01	0,642	7,94	0,324
4,84	0,912	7,90	0,616	9,58	0,296
5,18	0,852	11,74	0,600	13,83	0,252
5,42	0,817	7,83	0,255	15,29	0,562
5,52	0,808	8,17	0,254	5,12	0,554
5,75	0,764	10,60	0,126	15,87	0,638
6,03	0,743	7,94	0,091	14,29	0,652
7	0,729	10,84	0,000	0,00	0,729

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air(a) du profil SEMIS DIRECT à CASCAVEL.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)		Indice d'air (a)
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)	-------
1	1,334	3,82	1,284	4,050	0,050
1,5	1,314	3,65	1,216	4,85	0,098
2	1,304	4,68	1,116	8,15	0,188
2,5	1,300	6,54	0,946	5,92	0,354
3	1,300	6,77	0,923	7,37	0,377
3,5	1,297	3,624	0,818	13,69	0,479
4	1,285	5,06	0,800	12,00	0,485
4,2	1,281	6,48	0,792	7,45	0,489
4,45	1,279	6,72	0,736	11,06	0,543
4,84	1,262	7,29	0,648	5,56	0,614
5,18	1,148	6,62	0,514	7,39	0,634
5,42	1,142	3,50	0,249	3,61	0,893
5,52	1,136	7,66	0,239	6,70	0,897
5,75	1,112	4,59	0,120	5,83	0,992
6,03	1,018	14,64	0,105	13,33	0,913
7	0,80	8,13	0,000	0,00	0,800

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) du profil FORET à PALOTINA.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)		Indice d'air (a)
	Moy.	C.V (.%)	Moy.	C.V. (%)	-------
1	1,491	5,90	1,089	5,51	0,402
1,5	1,362	4,55	0,975	7,08	0,387
2	1,333	2,70	0,882	10,09	0,451
2,5	1,302	7,30	0,870	8,16	0,432
3	1,201	3,91	0,790	6,08	0,411
3,5	1,142	1,49	0,739	2,84	0,403
4	1,135	3,97	0,712	9,13	0,423
4,2	1,131	6,10	0,701	4,99	0,430
4,45	1,128	7,80	0,653	3,52	0,475
4,84	1,077	4,09	0,605	9,42	0,472
5,18	0,997	8,93	0,346	22,25	0,651
5,42	0,996	2,81	0,226	17,26	0,770
5,52	0,977	9,01	0,224	16,07	0,753
5,75	0,929	2,91	0,126	14,29	0,803
6,03	0,959	8,03	0,089	15,73	0,870
7	0,943	4,24	0,000	0,00	0,943

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) du profil CHARRUE à SOC à PALOTINA.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)		Indice d'air (a)
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)	-------
1	1,143	6,91	0,989	9,71	0,154
1,5	1,113	6,02	0,894	8,05	0,219
2	1,061	5,47	0,759	9,62	0,302
2,5	1,054	5,22	0,696	2,17	0,358
3	1,024	8,89	0,691	11,58	0,333
3,5	0,916	9,28	0,642	6,85	0,274
4	0,895	6,26	0,599	6,85	0,296
4,2	0,882	8,28	0,584	6,68	0,298
4,45	0,782	3,96	0,574	5,40	0,208
4,84	0,724	2,90	0,560	5,18	0,164
5,18	0,714	7,14	0,447	17,90	0267
5,42	0,687	4,80	0,173	11,56	0,514
5,52	0,623	17,50	0,160	18,13	0,463
5,75	0,585	16,07	0,094	8,51	0,491
6,03	0,580	17,76	0,075	22,67	0,505
7	0,533	2,63	0,000	0,00	0,533

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) du profil SEMIS DIRECT à PALOTINA.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)		Indice d'air (a)
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)	-------
1	0,979	4,39	0,972	7,92	0,007
1,5	0,893	5,94	0,868	8,99	0,025
2	0,891	7,97	0,815	4,79	0,076
2,5	0,885	6,89	0,769	3,25	0,116
3	0,876	7,31	0,761	3,42	0,115
3,5	0,780	4,10	0,672	8,93	0,108
4	0,773	9,57	0,611	5,89	0,162
4,2	0,724	9,39	0,590	5,59	0,134
4,45	0,694	1,73	0,564	5,32	0,130
4,84	0,676	7,40	0,513	3,70	0,163
5,18	0,626	9,59	0,404	15,10	0,222
5,42	0,625	3,84	0,212	10,85	0,413
5,52	0,591	11,51	0,198	6,57	0,393
5,75	0,545	13,95	0,106	15,09	0,439
6,03	0,534	5,06	0,071	15,49	0,463
7	0,430	7,67	0,000	0,00	0,430

Indices de vide (e) du massif d'agrégats en fonction de la pression mécanique (P,M,) appliquée pour différents valeurs de potentiel de l'eau (exprimé en pF) et teneur en eau massique (W) du massif après compactage à 1000 kPa.

P.M.	pF											
	1		1,5		2		**2,5**		3		4	
(kPa)	e	C.V. (%)	e	C.V. (%)	e	C.V. (%)	**e**	C.V. (%)	e	C.V. (%)	e	C.V. (%)
Site de Cascavel												
0	3,95	15,3	4,05	1,5	3,79	16,6	**4,03**	3,0	4,01	6,0	4,06	2,0
50	2,40	11,4	2,59	9,9	2,88	18,0	**3,13**	3,0	3,06	6,0	2,79	8,9
100	1,98	8,9	2,07	4,5	2,37	17,7	**2,63**	1,4	2,55	7,6	2,30	7,7
150	1,76	5,0	1,85	4,4	2,08	19,8	**2,26**	1,8	2,29	6,9	2,06	7,7
200	1,59	3,4	1,65	4,9	1,87	23,1	**2,02**	2,1	2,09	7,6	1,88	9,0
250	1,50	2,0	1,57	6,0	1,72	21,7	**1,83**	3,6	1,89	10,3	1,76	8,7
300	1,48	2,9	1,51	8,1	1,60	18,3	**1,69**	2,3	1,76	9,5	1,66	7,7
400	1,39	1,4	1,45	6,4	1,48	14,0	**1,54**	6,0	1,60	8,1	1,54	8,5
500	1,34	3,1	1,38	6,1	1,37	11,1	**1,44**	6,4	1,50	8,7	1,44	7,9
600	1,30	4,5	1,31	3,4	1,32	7,5	**1,33**	5,6	1,39	8,7	1,37	6,5
800	1,25	1,7	1,28	5,0	1,25	5,8	**1,24**	6,2	1,33	6,8	1,35	6,9
1000	1,25	1,7	1,24	2,0	1,22	2,5	**1,19**	1,9	1,26	4,5	1,35	6,9
W(%)	42,11		40,30		37,30		**35,85**		34,92		33,57	
Site de Palotina												
0	3,98	1,0	4,05	13,2	4,07	1,0	**4,04**	2,0	4,08	2,5	3,97	4,5
50	2,38	6,2	2,59	11,7	2,65	4,0	**2,76**	2,2	2,73	9,1	2,62	7,7
100	1,98	1,0	2,05	8,5	1,95	5,0	**2,12**	1,9	2,17	11,8	2,3	10,3
150	1,80	2,2	1,66	2,2	1,57	2,9	**1,84**	6,0	1,95	14,4	2,04	14,7
200	1,66	5,0	1,48	5,3	1,39	3,1	**1,61**	11,7	1,77	16,4	1,85	19,7
250	1,57	6,7	1,37	6,4	1,28	2,1	**1,43**	9,3	1,67	17,4	1,70	19,7
300	1,47	7,3	1,32	8,9	1,25	4,7	**1,34**	10,0	1,55	16,0	1,59	20,7
400	1,40	9,5	1,27	7,1	1,18	2,3	**1,12**	5,2	1,43	12,3	1,52	18,0
500	1,32	8,9	1,22	9,7	1,16	5,0	**1,04**	8,4	1,31	11,7	1,42	17,0
600	1,24	11,0	1,16	7,5	1,08	2,4	**0,98**	6,3	1,25	10,5	1,33	14,1
800	1,18	8,6	1,13	10,6	1,06	5,4	**0,92**	4,6	1,20	8,7	1,26	10,4
1000	1,16	6,7	1,14	3,4	1,03	5,8	**0,89**	2,0	1,16	6,1	1,21	6,8
W(%)	35,64		30,81		29,78		**28,53**		28,32		27,73	

DESSICCATION

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) des mottes naturel, du profil sous FORET (120 - 150 cm), à CASCAVEL.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)	
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)
1	2,013	2,534	1,736	2,765
1,5	1,966	1,679	1,564	3,772
2	1,959	3,318	1,276	1,646
2,5	1,937	3,459	1,123	5,610
3	1,858	1,938	1,031	1,746
3,5	1,869	5,350	0,996	3,916
4	1,853	5,181	0,960	1,667
4,2	1,745	3,553	0,921	8,360
4,45	1,542	0,973	0,836	11,124
4,84	1,429	5,948	0,721	1,387
5,18	1,420	3,451	0,439	5,011
5,42	1,415	3,675	0,198	6,061
5,52	1,372	4,810	0,169	6,509
5,75	1,370	4,672	0,137	27,737
6,03	1,318	3,794	0,090	15,556
7	1,318	0,759	0,000	0,000

REHUMECTATION

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) des mottes naturel du profil sous FORET (120 - 150 cm), à CASCAVEL.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)	
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)
1	1,811	4,197	1,690	6,509
1,5	1,723	3,947	1,273	6,991
2	1,644	4,805	1,077	5,757
2,5	1,643	7,425	0,926	3,456
3	1,628	4,238	0,810	16,914
3,5	1,538	5,072	0,749	3,605
4	1,536	5,469	0,716	3,212
4,2	1,536	4,622	0,681	3,231
4,45	1,536	5,990	0,607	3,789
4,84	1,536	2,344	0,442	5,656
5,18	1,536	1,888	0,305	1,967
5,42	1,526	1,704	0,263	11,027
5,52	1,526	5,308	0,257	28,793
5,75	1,526	6,356	0,119	7,563
6,03	1,523	3,349	0,087	9,195
7	1,318	0,759	0,000	0,000

DESSICCATION,

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) des agrégats du profil sous FORET (120 - 150 cm), à CASCAVEL, tassées à pF=2,5 et à 10 bars.

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)	
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)
1	1,263	0,238	1,230	2,033
1,5	1,239	0,888	1,232	2,354
2	1,225	0,653	1,149	2,350
2,5	1,220	0,656	1,088	1,379
3	1,216	0,905	1,044	1,724
3,5	1,195	1,674	0,973	0,514
4	1,145	1,921	0,926	0,540
4,2	1,106	0,723	0,882	0,567
4,45	0,915	1,311	0,717	2,092
4,84	0,873	2,864	0,674	4,303
5,18	0,862	3,480	0,520	1,346
5,42	0,856	2,103	0,372	13,441
5,52	0,846	0,946	0,237	2,954
5,75	0,847	3,188	0,126	7,937
6,03	0,826	1,816	0,047	8,511
7	0,808	0,495	0,000	0,000

REHUMECTATION,

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) des agrégats du profil sous FORET (120 - 150 cm), à CASCAVEL,

tassées à pF=2,5 et à 10 bars

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)	
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)
1	1,047	4,967	1,047	3,343
1,5	1,011	0,297	0,977	1,535
2	1,008	0,992	0,926	0,540
2,5	0,988	0,304	0,852	0,822
3	0,979	0,613	0,786	0,636
3,5	0,946	0,529	0,719	0,417
4	0,928	0,216	0,713	0,842
4,2	0,860	0,581	0,612	0,654
4,45	0,855	3,392	0,572	2,273
4,84	0,846	0,827	0,471	17,197
5,18	0,839	0,954	0,358	17,598
5,42	0,837	1,075	0,232	18,103
5,52	0,837	0,358	0,209	2,392
5,75	0,824	0,607	0,103	0,971
6,03	0,,826	0,605	0,047	8,511
7	0,808	0,495	0,000	0,000

DESSICCATION

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) des mottes naturelles du profil sous FORET (120 - 150 cm), à PALOTINA tassées à pF=2,5 et à 10 bars

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)	
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)
1	1,345	1,487	1,145	4,716
1,5	1,320	2,727	1,113	3,145
2	1,313	2,894	0,985	1,320
2,5	1,310	1,985	0,837	4,540
3	1,303	1,151	0,805	5,217
3,5	1,298	2,542	0,773	1,940
4	1,297	2,005	0,754	2,520
4,2	1,290	1,938	0,727	2,063
4,45	1,288	3,804	0,662	3,323
4,84	1,289	4,267	0,625	3,520
5,18	1,281	5,074	0,262	2,290
5,42	1,214	4,695	0,137	6,569
5,52	1,190	5,882	0,122	5,738
5,75	1,169	5,218	0,089	8,989
6,03	1,119	5,004	0,071	16,901
7	1,117	5,551	0,000	0,000

REHUMECTATION,

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) des mottes du profil sous FORET (120 - 150 cm), à PALOTINA

tassées à pF=2,5 et à 10 bars

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)	
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)
1	1,265	3,874	1,157	3,803
1,5	1,262	1,506	1,046	9,751
2	1,261	4,044	0,843	13,642
2,5	1,262	4,279	0,808	4,579
3	1,244	3,778	0,695	8,921
3,5	1,231	3,574	0,695	1,583
4	1,211	4,955	0,686	2,915
4,2	1,194	2,261	0,650	1,846
4,45	1,189	3,701	0,526	5,133
4,84	1,187	1,348	0,365	14,521
5,18	1,166	2,916	0,227	4,405
5,42	1,154	2,860	0,142	0,704
5,52	1,151	5,300	0,149	16,107
5,75	1,130	4,159	0,106	17,925
6,03	1,116	4,032	0,078	2,564
7	1,117	2,954	0,000	0,000

DESSICCATION

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) des agrégats du profil sous FORET (120 - 150 cm), à PALOTINA

tassées à pF=2,5 et à 10 bars

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)	
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)
1	0,956	0,941	0,961	2,914
1,5	0,957	1,045	0,928	0,108
2	0,945	1,164	0,895	4,358
2,5	0,943	2,227	0,844	8,294
3	0,944	1,483	0,822	0,243
3,5	0,917	0,218	0,795	1,006
4	0,882	0,454	0,759	0,527
4,2	0,876	1,598	0,734	0,272
4,45	0,775	2,194	0,649	1,849
4,84	0,743	0,269	0,574	4,007
5,18	0,742	1,078	0,341	9,677
5,42	0,741	0,675	0,198	25,253
5,52	0,742	1,617	0,193	11,399
5,75	0,740	1,622	0,108	5,556
6,03	0,738	1,355	0,045	4,444
7	0,737	0,950	0,000	0,000

REHUMECTATION,

Evolution des indices de vides (e), d'eau (Θ) et d'air (a) des agrégats du profil sous FORET (120 - 150 cm), à PALOTINA.

tassées à pF=2,5 et à 10 bars

pF	Indice de vides (e)		Indice d'eau (Θ)	
	Moy.	C.V. (%)	Moy.	C.V. (%)
1	0,886	1,129	0,886	0,790
1,5	0,882	2,721	0,852	1,761
2	0,878	1,253	0,811	0,863
2,5	0,873	3,895	0,749	0,401
3	0,848	2,005	0,719	2,782
3,5	0,826	1,937	0,677	0,739
4	0,824	2,549	0,683	0,293
4,2	0,753	3,187	0,578	3,806
4,45	0,749	0,801	0,474	2,532
4,84	0,749	0,401	0,395	16,709
5,18	0,748	0,267	0,393	31,043
5,42	0,747	0,402	0,244	36,475
5,52	0,747	1,339	0,148	3,378
5,75	0,747	1,339	0,101	39,604
6,03	0,738	1,355	0,045	4,444
7	0,737	0,950	0,000	0,000

Nom : **TAVARES FILHO**

Prénom : **João**

DOCTORAT de l'UNIVERSITE HENRI POINCARE, NANCY-I

en PÉDOLOGIE

VU, APPROUVÉ ET PERMIS D'IMPRIMER

Nancy, le - 3 JUIL. 1995 n°254

Le Président de l'Université

UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ, NANCY 1 * LE PRESIDENT

P. FINANCE

UNIVERSITÉ * NANCY 1 * BIBLIOTHÈQUE SCIENCES

C-F9

UNIVERSITÉ HENRI POINCARÉ · NANCY 1
24-30, rue Lionnois B.P.3069 54013 Nancy cedex
Tél : 83 32 81 81 Fax : 83 32 95 90
Adresse électronique : _____ @presn1.u-nancy.fr

Organisation et Comportement de Latosols du Parana (Brésil).
Influence de leur mise en culture.

Ce mémoire est consacré à l'étude de l'évolution des Latosols du Paranà mise en culture de façon très intensive depuis une vingtaine d'années. Des études reposant sur l'approche du profil cultural ont montré une dégradation des propriétés physiques (densification) dans l'ensemble du profil parfois jusqu'à 50 cm. L'objectif de ce mémoire était donc de préciser les mécanismes d'évolution des propriétés des sols en faisant intervenir la nature des constituants, l'environnement géochimique et les pratiques culturales par l'intermédiaire de contraintes exercées sur les sols.

Deux sites se prêtaient bien à ce genre d'étude, Cascavel (sols peu dégradés) et Palotina (sols fortement dégradés). Pour chaque site, une zone de forêt a pu servir de témoins de façon à obtenir des éléments de comparaison avec le sol cultivé. Outre la référence sous forêt, il a été décidé de prendre en compte deux pratiques culturales, l'une où le sol est cultivé avec la charrue à soc, l'autre où les cultures sont réalisées avec le minimum de travail du sol (semis direct). Au total six profils ont été étudiés et des échantillons à structure préservée ont été prélevés dans les horizons culturaux et pédologiques jusqu'à une profondeur de 1,50 cm.

La démarche que nous avons suivie dans ce mémoire nous a amené à envisager les sols sous deux aspects :

- le premier à traité de la relation entre les comportements physiques et mécaniques des sols et leur degré d'évolution pédogénétique. Cette démarche nous a permit de conclure que les sols des sites de Cascavel et Palotina ont subi des évolutions différents. A Cascavel le sol est plus évolué, c'est-à-dire plus acide, plus finement divisé et contient une forte quantité d'aluminium sous différentes formes (gibbsite par exemple) dans la matrice argileuse. Ceci montre qu'une bonne partie des caractéristiques physiques des sols semble donc être un héritage des conditions de genèse du sol.
- le deuxième aspect a traité de l'action spécifique des pratiques et des sollicitations auxquelles sont soumis les sols depuis leur mise en valeur. Cette démarche nous a permis de conclure que la mise en culture provoque une compactation, c'est-à-dire une diminution importante et rapide de l'espace poral des sols par rapport à la forêt. Ces effets sont très différents d'un sol à l'autre en fonction des pratiques culturales. Il apparait qu'à Cascavel, le sol plus évolué, la technique du semis direct se montre bien appropriée ; par contre pour le site de Palotina, le sol moins évolué, c'est la charrue à soc qui est la moins dégradante pour le sol. L'action de la plante est aussi un facteur rapide d'évolution des propriétés des sols. Les cultures en extrayant de l'eau peuvent consolider un sol dès lors que celui est fortement desséché.

On a pu aussi mettre en évidence que les deux sols ont une forte sensibilité au tassement aux voisinage de pF=2,5 (-32 kPa). Un compactage suivie d'une dessiccation à l'air à des effets d'autant plus marqués que le matériau est plus dense au départ.

Au total ce travail montre que la connaissance du mécanisme de l'évolution des propriétés physiques des sols tropicaux exige de prendre en compte des données de nature variée. Cela va du suivi des pratiques culturales à long terme avec l'étude des profils culturaux correspondants, à l'étude de l'ambiance physico-chimique et la nature minéralogique des constituants. Une étude de l'ensemble des différents niveaux d'organisation de la phase solide et des pores est nécessaire si l'on veut réellement faire le point sur l'évolution des propriétés physiques des sols.

Les sols développés sur basaltes du Parana peuvent être à des stades différents de leur pédogenèse. Tout se passe comme si le degré d'évolution des sols imposait un type d'organisation et des propriétés physiques et physico-chimiques spécifiques. L'action anthropique contribue à faire évoluer ces organisations.

Pour les contraintes mécaniques il y a lieu d'analyser le mode d'action spécifique des outils. Pour les contraintes climatiques, les transformations doivent prendre en compte l'action des végétaux, notamment par leur transpiration. Les effets à long terme dus à un dessèchement du sol ne doivent pas être sous estimés. La prise en compte de ces facteurs apparaît indispensable pour étudier l'évolution des propriétés physiques des sols et contribuer ainsi à définir les conditions d'une agriculture plus conservatrice qui préserve la fertilité de ces sols.