



HAL
open science

Influence des variations de teneurs en matières organiques sur quelques propriétés physiques des sols agricoles

Jérôme Guerif

► **To cite this version:**

Jérôme Guerif. Influence des variations de teneurs en matières organiques sur quelques propriétés physiques des sols agricoles. 40 p., 1986. hal-02853267

HAL Id: hal-02853267

<https://hal.inrae.fr/hal-02853267>

Submitted on 7 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

195

INRA
STATION DE SCIENCE (X) DL
9. JAN. 198
MONTPELLIER

Influence des variations de
teneurs en matières organiques
sur quelques propriétés physi-
ques des sols agricoles

J. GUERIF

Matières organiques dans les sols
ATP n:1059. CNRS-INRA-MER/MECV
Coordination PIREN/CNRS

INFLUENCE DES VARIATIONS DE TENEURS EN MATIERES
ORGANIQUES SUR QUELQUES PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS AGRICOLES

Inter-relations Teneur en eau - Potentiel de l'eau - Masse volumique :
Conséquences sur quelques comportements mécaniques

Jérôme GUERIF

Compte-rendu d'ATP Tripartite : CNRS-INRA-MER/MECV
Coordination PIREN/CNRS

ATP Numéro 1059 "MATIERES ORGANIQUES DANS LES SOLS"
du 28 Juin 1984

Edition Janvier 1987

INTRODUCTION

Les matières organiques sont considérées comme un des facteurs importants de la fertilité des sols et on admet généralement une influence bénéfique globale de la présence de matières organiques sur la production agricole.

Mais cette influence n'est que la résultante des nombreux effets variés directs ou indirects, positifs ou négatifs, de la présence de M.O dans le sol.

Ainsi, par exemple,

- ils peuvent être d'ordre biochimique : l'évolution des matières organiques sous l'action des microorganismes est source d'éléments nutritifs pour la plante, mais la consommation d'oxygène qu'elle nécessite peut être à l'origine d'anoxies locales.
- ils peuvent être d'ordre physico-chimique, physique ou mécanique : la présence de matières organiques, associées ou non au minéral modifie les propriétés et les comportements physiques et mécaniques des matériaux terreux, mais quel en est le sens d'action et surtout quelle est l'amplitude de variation des phénomènes mise en jeu lors de variations du stock consécutives à des modifications du système de culture et ou des techniques de travail du sol ?

Les travaux faisant état des relations entre les propriétés physiques des sols et les matières organiques peuvent se classer en trois grands groupes :

- des études concernant les associations produit organique-support minéral, leurs natures et leurs propriétés physicochimiques dont les papiers de CALVET et CHASSIN (1977) et plus récemment de HAYES ET SWIFT (1981) résument bien le type d'approches ainsi que la tendance actuelle.

- de nombreux essais de plein champ où la différenciation des traitements (enfouissement des résidus de récoltes ou d'amendements organiques, diversification des rotations ...) induit une différenciation des teneurs en matières organiques. Le plus souvent ces études restent comparatives et se limitent à un constat de l'incidence du ou des traitements sur divers comportements.

- des études visant à analyser les relations matières organiques-comportements ou propriétés physiques des matériaux terreux (GUERIF, 1984). Il s'agit pour une grande part de la résistance à la désagrégation et à la dispersion (stabilité structurale) et dans une moindre mesure des propriétés de transferts hydriques et du comportement au compactage.

En fait, ces comportements et propriétés sont régis par des variables plus élémentaires telles que le gonflement-retrait, la cohésion, la perméabilité, etc... elles-mêmes fonction de variables d'état interdépendantes : teneur en eau, potentiel hydrique et masse volumique du matériau.

L'originalité du travail qui va suivre consiste en l'étude simultanée de ces variables sur les mêmes échantillons de manière à avoir une approche synthétique de l'influence des matières organiques sur quelques propriétés physiques de base.

1. MATERIELS ET METHODES

1.1. Echelle de travail

Les couches de surface des sols cultivés ne satisfont généralement pas aux hypothèses d'homogénéité et de continuité, habituellement admises en physique des matériaux. De ce fait, l'échelle de mesure conditionne le résultat.

Ainsi pour s'affranchir de l'aspect contingent de l'organisation structurale, issue pour une grande part du travail du sol et de l'action du climat, on se limitera, pour l'essentiel, à l'étude de propriétés et de comportements physiques, à l'échelle texturale, c'est-à-dire à l'échelle de l'assemblage des éléments constitutifs du matériaux. Ces propriétés, mesurées à cette échelle, prennent alors un caractère intrinsèque, essentiellement lié à la constitution du matériau : granulométrique, minéralogique, et organique.

Néanmoins, dans le Chapitre concernant les propriétés mécaniques, on sera amené à considérer l'interaction entre les comportements texturaux et structuraux.

1.2. Choix des matériaux

L'étude de l'effet des matières organiques sur les propriétés physiques des matériaux terreux est rendue difficile par l'absence de matériaux naturels qui, pour une même constitution minérale, présentent une gamme suffisamment étendue de teneurs en carbone. On observe généralement, dans les populations d'échantillons de terres cultivées, une corrélation très marquée entre la teneur en carbone et la teneur en argile, elle-même variable explicative majeure de la plupart des propriétés physiques. Ainsi, cette interaction masque souvent, dans les analyses statistiques, les effets propres aux constituants organiques.

Nous avons donc choisi de travailler sur des couples d'échantillons naturels (cf. Tab 1).

Pour chaque couple, la constitution granulométrique est aussi identique que possible et la différence des teneurs en matières organiques a été maximisée de manière à rendre nettement accessibles à la mesure les effets induits. Néanmoins, les teneurs en matières organiques ont été choisies de sorte qu'elles restent compatibles avec les pratiques culturales courantes bien qu'extrémisées vis-à-vis de la gestion organique.

Pour les différents matériaux étudiés, les différences de teneurs sont dues soit à un effet profondeur, soit à un effet technique culturale.

TABLEAU 1

Echantillons	Argile %	C.E.C	C.tot %	C.lib %	C.lié %	origine
Durance (alluvions)	13.8	7.6	2.15	1.20	0.95	0-20cm
	10.5	3.8	0.61	0.09	0.52	20-40cm
2 Parcelles Versailles	19.1	15.0	2.47	0.57	1.89	Fumier
	17.7	11.8	0.67	0.07	0.60	Témoin
Boigneville (ITCF)	26.7	15.4	2.19	0.36	1.83	non trav
	24.4	13.7	1.04	0.12	0.92	labour
Dne St Paul (prairie)	30.1	10.8	1.35	0.15	1.20	0-20cm
	30.3	9.1	0.80	0.06	0.74	40-60cm
es Vignéres (serres)	45.8	19.5	2.26	0.64	1.00	0-20cm
	45.9	18.8	1.60	0.25	1.35	20-40cm
	49.6	19.7	0.66	0.05	0.61	40-60cm

1.3. Préparation des échantillons

La meilleure estimation d'une propriété ou d'un comportement à l'échelle texturale s'obtient généralement en effectuant la mesure sur des agrégats de terre obtenus par tamisage à sec entre 2 et 3 mm.

Pour améliorer l'estimation de la résistance mécanique à la rupture, nous avons été amenés à effectuer les mesures sur des agrégats de terre dont la forme est la plus sphérique possible. Cette géométrie diminue la variabilité de la mesure et permet des calculs de contrainte à la rupture (GUERIF, à paraître).

A cet effet, les agrégats sont tamisés entre 3 et 5 mm, puis arrondis mécaniquement, l'usure les amène à un diamètre compris entre 2 et 3 mm. De manière, donc, à avoir des données comparables, toutes les mesures décrites dans la suite ont été effectuées sur des agrégats naturels arrondis mécaniquement. Cette opération supprime inévitablement une proportion non négligeable d'agrégats, moins résistants mécaniquement, et sélectionne des agrégats dont la constitution, et particulièrement la constitution organique, diffère de la constitution évaluée sur le tout venant, comme on le verra par la suite.

On retrouve ici l'hétérogénéité de constitution, notamment organique, mise en évidence par AKROUME (1985).

Cette hétérogénéité de constitution et surtout ses conséquences sur les propriétés physiques sont masquées pour les mesures effectuées directement sur une population d'agrégats, contrairement aux mesures effectuées agrégat par agrégat.

De manière, d'une part à atténuer cette hétérogénéité, d'autre part à maximiser l'écart de teneur en M.O dans un même couple, certaines mesures ont été effectuées sur des matériaux remaniés (FIES-STENGEL, 1981).

1.4. Evaluation des propriétés et comportements physiques

1.4.1. Organisation texturale

L'organisation de l'espace poral textural est analysée de deux façons :

- a/ Par un bilan de volume, en estimant la part relative du volume des pores et du volume de solide. On mesure la masse volumique d'agrégats de 2-3 mm par pesée et poussée d'Archimède dans du Kerdane (ρ_d^a) (FIES, STENGEL, 1981) et la masse volumique de solide (ρ_s) par pycnométrie à eau.

On en déduit l'indice des vides textural :

$$e^T = \frac{\rho_s}{\rho_d^a} - 1$$

- b/ Par analyse de la distribution des diamètres des pores obtenue par porosimétrie à mercure : cette méthode donne la mesure du volume de mercure intrudé dans l'échantillon sous une pression donnée. On déduit de cette pression, sous

hypothèse capillaire, le diamètre des pores donnant accès au volume poral intrudé.

On distingue (FIES, 1984) deux sous-espaces poraux :

-l'espace poral lacunaire

-l'espace poral propre à la phase argileuse

la mesure du volume de l'espace poral de la phase argileuse reste incomplète. La pression d'intrusion de mercure étant limité sur notre appareil à 200 MPa, et donc à des diamètres équivalents d'intrusion de mercure de 0,006 μm , l'estimation du volume des pores propres à la phase argileuse sera obtenue en combinant les deux méthodes : par différence entre le volume des vides texturaux et le volume de lacunes.

1.42. Propriétés de rétention : relation potentiel matriciel-teneur en eau.

Les échantillons sont réhumectés sous vide et amenés à une succion de 3 mbar. Les mesures de teneur en eau à un potentiel donné sont obtenues après équilibre (environ 72 heures) dans des presses à plaque. Les pressions appliquées sont : 0,1; 0,5; 1; 3; 5; 15 bar. Les teneurs en eau sont obtenues par la méthode gravimétrique après séchage à l'étuve à 105°C.

1.43 Propriétés de gonflement-retrait

Les agrégats, préalablement réhumectés sous vide à un potentiel proche de zéro (-3 mbar), sont amenés aux teneurs en eau souhaitées par dessiccation ménagée sous silicagel, en enceinte calorifugée. Pour chaque teneur en eau, la masse volumique des agrégats est mesurée comme précédemment (FIES, STENGEL, 1981).

Sur les courbes de gonflement-retrait, sont déterminés graphiquement les points particuliers suivant : gonflement maximum, point d'entrée d'air, limite de retrait, état sec à 105°C.

1.44. La résistance à la rupture

L'évaluation de la résistance mécanique a fait l'objet d'une analyse bibliographique présentée à part (GUERIF, à paraître). Ce travail propose une méthode d'estimation de la résistance mécanique des matériaux discontinus, en distinguant une résistance mécanique à l'échelle texturale et une résistance mécanique issue de la coalescence des éléments structuraux.

Résistance mécanique texturale :

On mesure la résistance à l'écrasement, par compression simple, d'agrégats de 2-3 mm préalablement arrondis (voir préparation des échantillons) et amenés soit à la teneur en eau choisie, par la méthode décrite pour les mesures de gonflement retrait (dessiccation ménagée sous silicagel), soit au potentiel choisi par la méthode des presses à plaques.

Résistance mécanique structurale :

La résistance à l'écrasement structurale est mesurée par compression simple de cylindres obtenus par un compactage standard de massifs d'agrégats (\varnothing 7 cm, H = 2,4 cm). Comme dans le test brésilien, les forces sont appliquées sur le cylindre selon deux génératrices diamétralement opposées.

Dans les deux cas, on mesure la force maximale à la rupture grâce à un capteur de force. Tant qu'on ne fait pas d'hypothèse quant à la nature de la rupture (compression, traction, cisaillement), on exprimera la résistance à la rupture sous la forme du rapport de la Force maximale à la rupture et de la surface du plan de rupture.

1.45. Le comportement au compactage

Le comportement au compactage est étudié par un test de laboratoire (GUERIF, 1982).

Des agrégats tamisés entre 2 et 3 mm sont soumis, dans une cellule cylindrique de 7 cm de diamètre et de 2,4 cm de haut, à un effort vertical monodimensionnel jusqu'à équilibre.

Pour chaque échantillon, on impose une teneur en eau lors du compactage, et une charge, on détermine la variation de volume de l'échantillon.

On en déduit la masse volumique après compactage et donc l'indice des vides total e^T . Par ailleurs, la courbe de gonflement-retrait des agrégats donne, pour chaque teneur en eau, l'indice des vides textural e^T .

On peut donc calculer l'indice des vides structural e^S (ou indice des vides inter-agrégats) après compactage

$$e^S = e^T - e^T$$

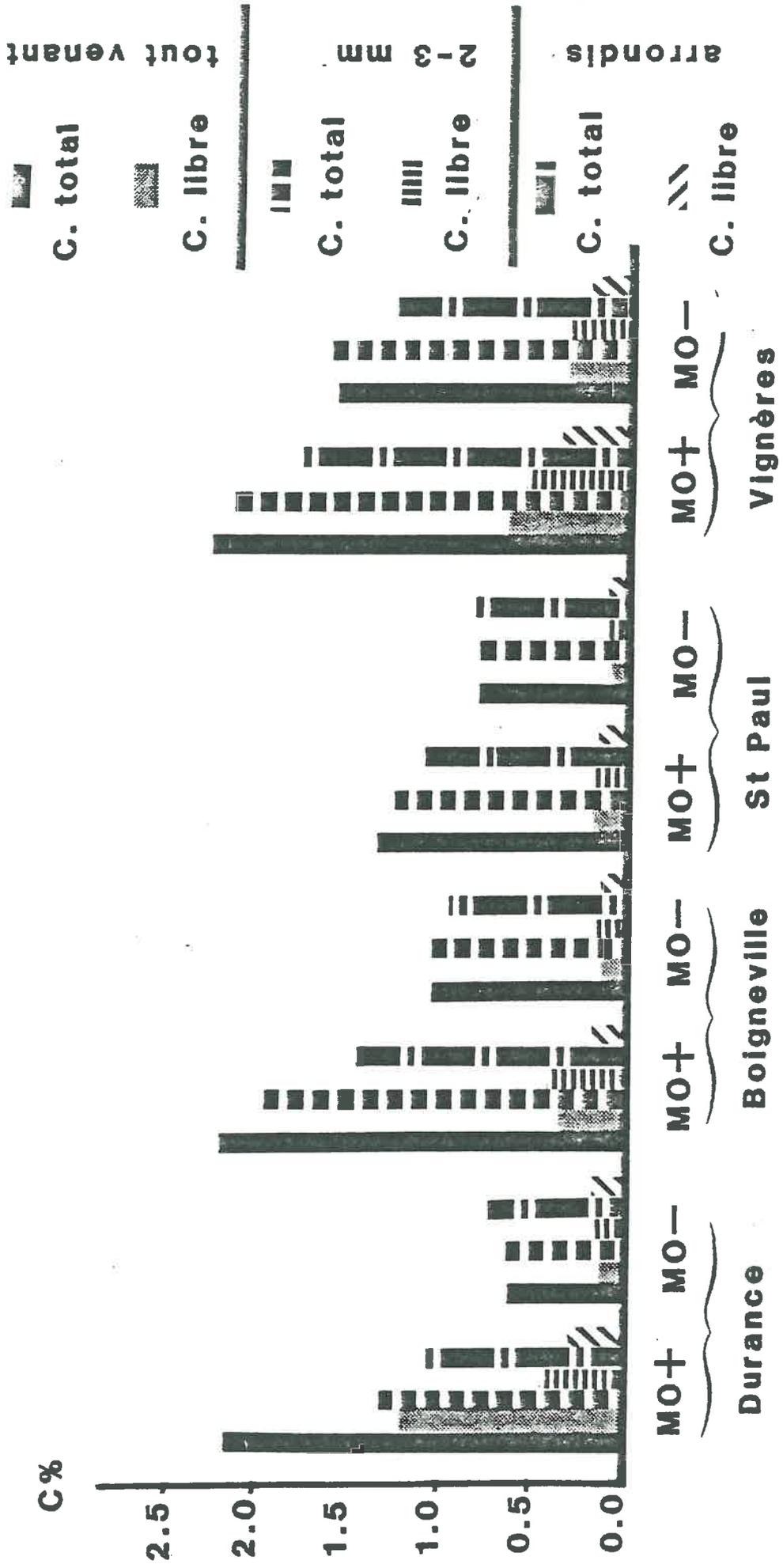


Fig 1

RESULTATS

2. LOCALISATION DES MATIERES ORGANIQUES ET ORGANISATION DE L'ESPACE PORAL

2.1. Localisation des matières organiques - Effet de la préparation des échantillons sur leur teneur en carbone.

On dispose pour quatre matériaux des teneurs en Carbone total et Carbone libre sur les échantillons tout venant, tamisés entre 2 et 3 mm, et arrondis mécaniquement (fig 1).

Pour chaque matériau, l'échantillon le plus pauvre en C., ne présente pas de différence de teneur en Carbone total ou libre, en fonction de la préparation (tout venant - agrégats 2-3 mm et mécaniquement arrondis). Et donc, à l'échelle de la prise d'échantillon, la répartition de la matière organique est homogène en teneur en carbone.

Par contre, pour les matériaux les plus riches, la teneur en C est d'autant plus faible que l'analyse est effectuée sur les agrégats les plus résistants aux agressions mécaniques. Ainsi donc, une grande partie de l'accroissement récent des teneurs en matières organiques se concentre essentiellement sous forme de C Libre, soit dans les pores structuraux, soit dans la terre fine agglomérée. Cet effet est d'autant moins marqué :

- que la teneur en argile de l'échantillon est forte,
- que l'enfouissement des matières organiques n'est pas dû à un remaniement mécanique.

Ainsi, le sol de Prairie (St. Paul), sans remaniement mécanique depuis une vingtaine d'années, présente de faibles variations des teneurs en Carbone selon le mode de préparation des agrégats et ce quelle que soit la profondeur.

2.2. Organisation texturale à l'état sec

L'appréciation de l'influence des matières organiques sur l'assemblage textural a été effectuée d'une part en mesurant la masse volumique sur petits agrégats ρ_a^2 , d'autre part en appréciant par porosimétrie à mercure les parts respectives de l'espace poral lacunaire et de l'espace poral propre à la phase argileuse.

Une appréciation des écarts de teneurs en Carbone dans les couples (fig 2) est donnée par deux indicateurs :

- le premier fournit une estimation globale de l'incrément de Carbone pondéré par la teneur en argile du matériau.

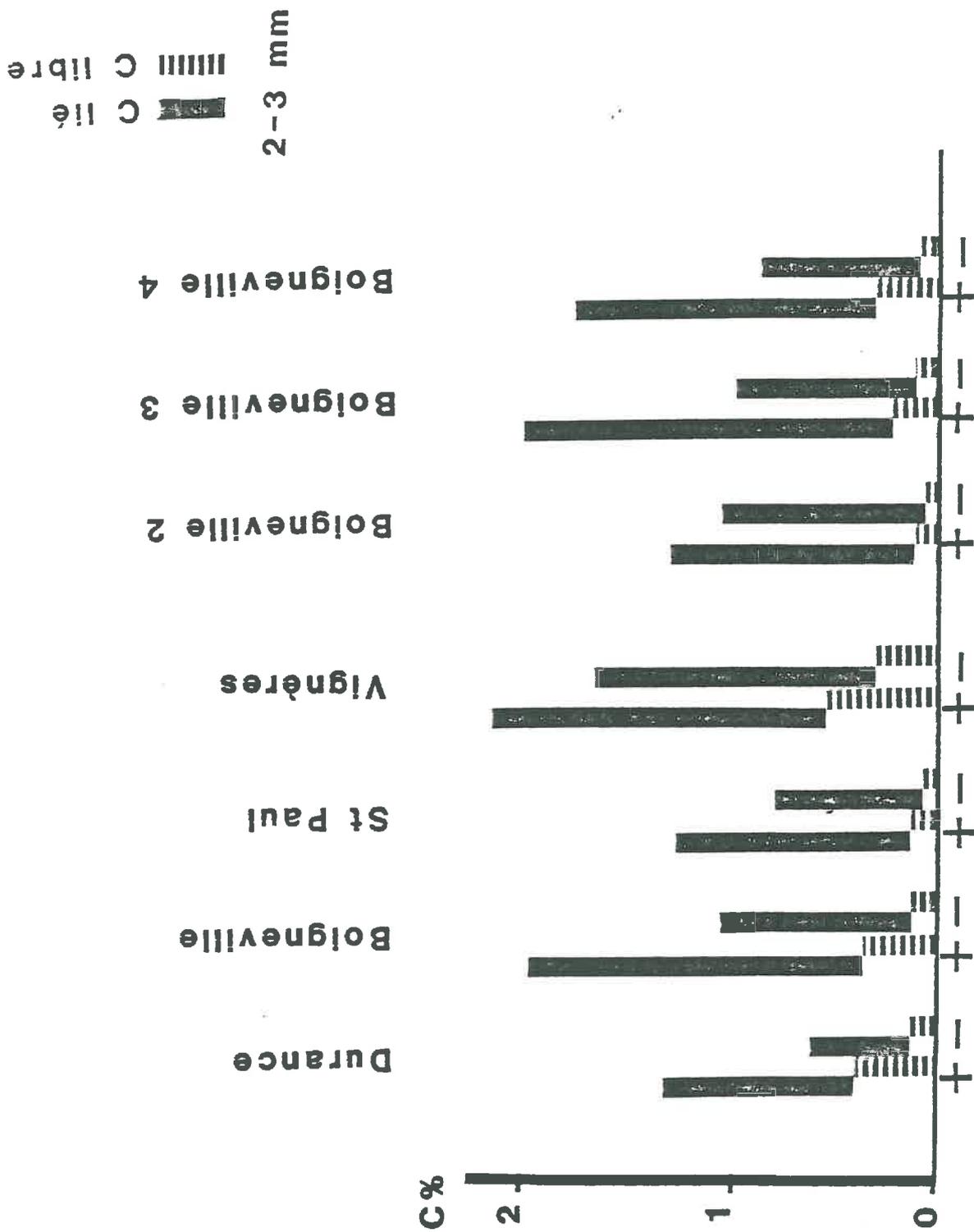


Fig 2

On compare dans chaque couple, les teneurs en Carbone total ramenées à l'argile en calculant les rapports C^T/A du plus riche/ C^T/A du moins riche.

- le second donne une estimation de la part prise par le Carbone libre dans la variation de la teneur en Carbone total.

On compare alors dans chaque couple les rapports $C_{\text{libre}}/C_{\text{total}}$ en calculant le rapport C_{libre}/C_T du plus riche/ C_{libre}/C_T du moins riche.

Les modifications de l'organisation texturale liées à un incrément de matières organiques sont appréciés globalement en calculant dans chaque couple l'incrément d'indice des vides textural, soit :

$$\Delta e^T = e^T (\text{échantillon le plus riche}) - e^T (\text{échantillon le moins riche})$$

On constate fig. 3 que le volume de l'espace poral induit par de la matière organique supplémentaire augmente globalement avec l'augmentation de C. Cette augmentation du volume poral est d'autant plus importante que la proportion de C_L est plus forte dans la matière organique totale. Certains fragments de matières organiques encore figurées se trouvent donc, probablement, jouer un rôle identique à celui du squelette dans l'organisation texturale, et augmentent, par la même, le volume de l'espace poral.

Dans l'espace poral textural, on distingue :

- les pores propres à la phase argileuse,
- les pores, issus de l'interaction entre phase argileuse et squelette, ou lacunes.

La porosimétrie à mercure, combinée à la mesure de la masse volumique, donne accès à une estimation du volume de ces deux compartiments (FIES, 1984) (Fig 4).

La mesure étant effectuée sur des agrégats, il faut distinguer l'intrusion inter-agrégats de l'intrusion intra-agrégats. Plus le squelette est grossier et plus la teneur en argile est faible, plus cette distinction est délicate. Néanmoins, dans la plupart des cas, cette limite coïncide avec le premier point d'inflexion de la courbe (Fig 4, point A). Par ailleurs, l'intrusion dans la phase argileuse correspond statistiquement à un diamètre d'intrusion de $0,05 \mu\text{m}$ (point B).

La limite de montée en pression de l'appareil ne donne accès qu'à environ 50 % du volume des pores de la phase argileuse. On estime donc le volume des pores de la phase argileuse par différence entre le volume total de pores texturaux et le volume de lacunes.

La texture étant bien entendu le principal facteur de variation de cette répartition entre lacunes et pores de la phase argileuse, une faible différence de constitution granulométrique dans un couple peut masquer l'effet propre aux constituants organiques.

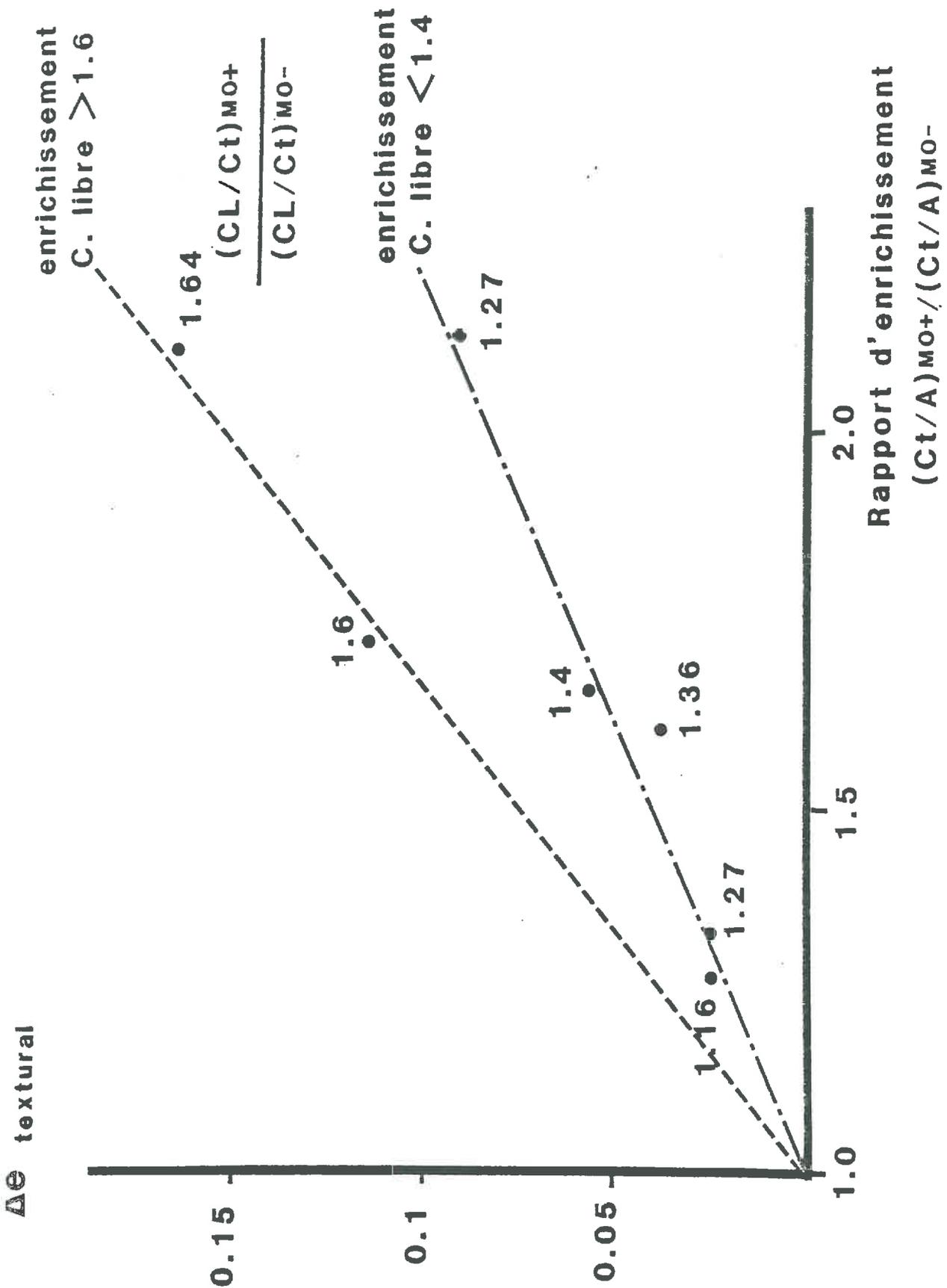


Fig 3

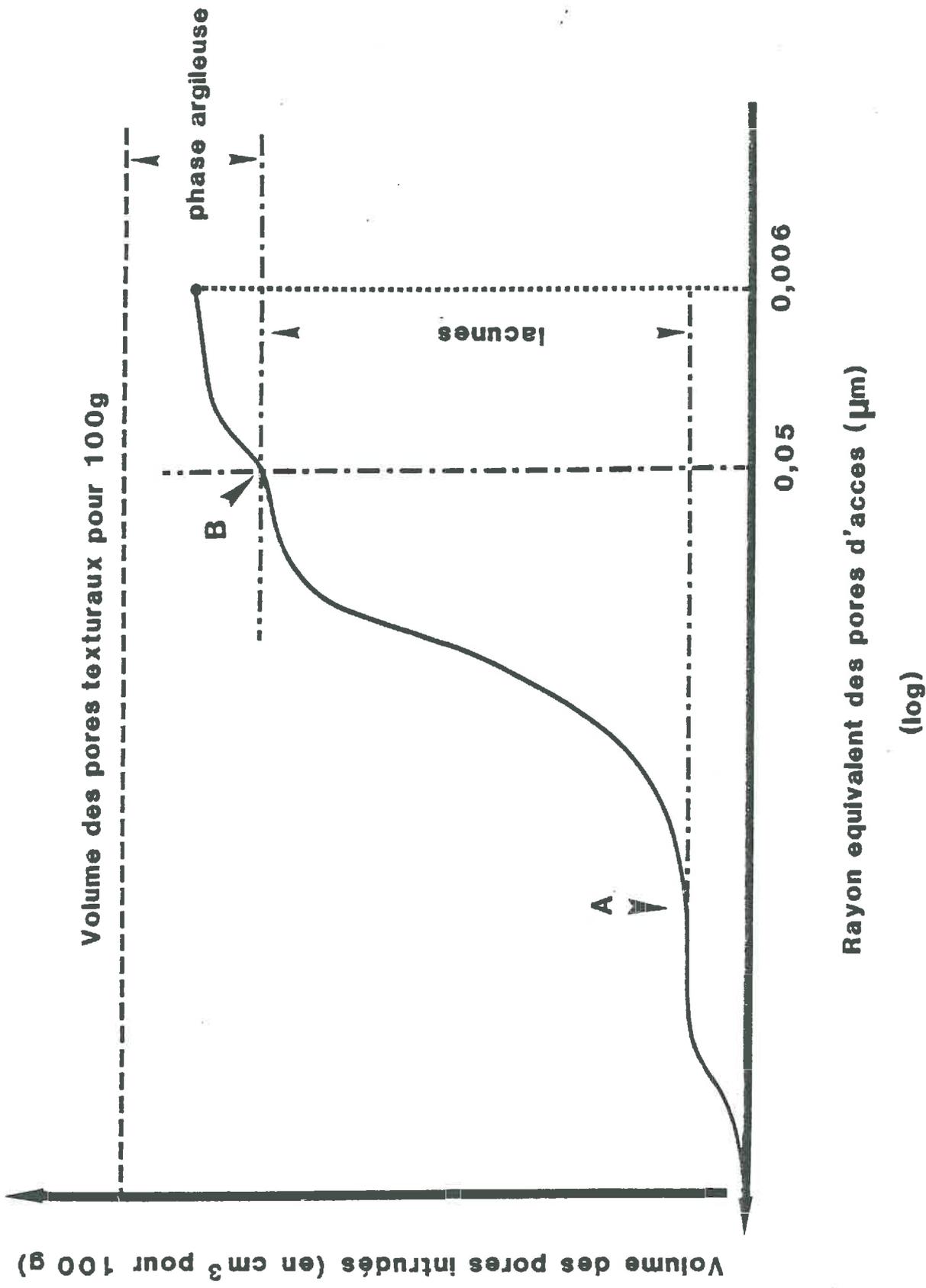


Fig 4

On pondère donc le volume des pores de la phase argileuse par la teneur en argile de l'échantillon en exprimant le volume des pores de la phase argileuse pour 100 g d'argile et, symétriquement (bien que cela soit moins satisfaisant), on exprime le volume de lacunes pour 100 g de squelette.

L'erreur sur l'estimation de la masse volumique texturale à l'état sec est au maximum de l'ordre de $1 \text{ cm}^3/100 \text{ g}$ de matériau. L'erreur sur le volume des pores de l'argile est du même ordre de grandeur. L'erreur sur le volume de lacunes dépend de la validité des hypothèses concernant les bornes choisies graphiquement (A et B), on l'estime aussi environ à 1 cm^3 pour 100 g.

Dans un cas seulement (couple témoin-fumier des "42 parcelles"), l'organisation de la phase argileuse est modifiée significativement par l'incrément de teneur en matières organiques (fig 5).

Le volume de l'espace poral lacunaire, par contre, augmente avec l'augmentation de teneur en matières organiques. Le limon de Durance présente une différence à la limite de la signification. Le matériau le plus argileux, ne montre aucune différence significative.

La confrontation des courbes traduisant les variations des pentes des courbes cumulatives d'intrusion de mercure (fig 6) montre que l'augmentation de teneur en M.O dans l'espace poral textural :

- augmente le diamètre modal d'intrusion dans l'espace poral lacunaire,
- étale la distribution des diamètres d'intrusion dans l'espace poral lacunaire.

Ces variations restent néanmoins faibles, voire insignifiantes dans le cas du matériau le plus argileux.

Seules les 42 parcelles présentent des variations des diamètres d'intrusion dans la phase argileuse.

En résumé donc, une augmentation du stock de matières organiques consécutive à une modification des techniques culturales (travail du sol, amendements, ...) se traduit par :

- une augmentation de la teneur en matière organique dans l'espace poral structural ou dans des agrégats issus de l'agglomération de terre fine,
- une augmentation comparativement moins importante de la teneur en matière organique dans l'espace poral textural qui provoque principalement une augmentation du volume des lacunes, sans modifier, à notre échelle d'observation, l'organisation de la phase argileuse proprement dite.

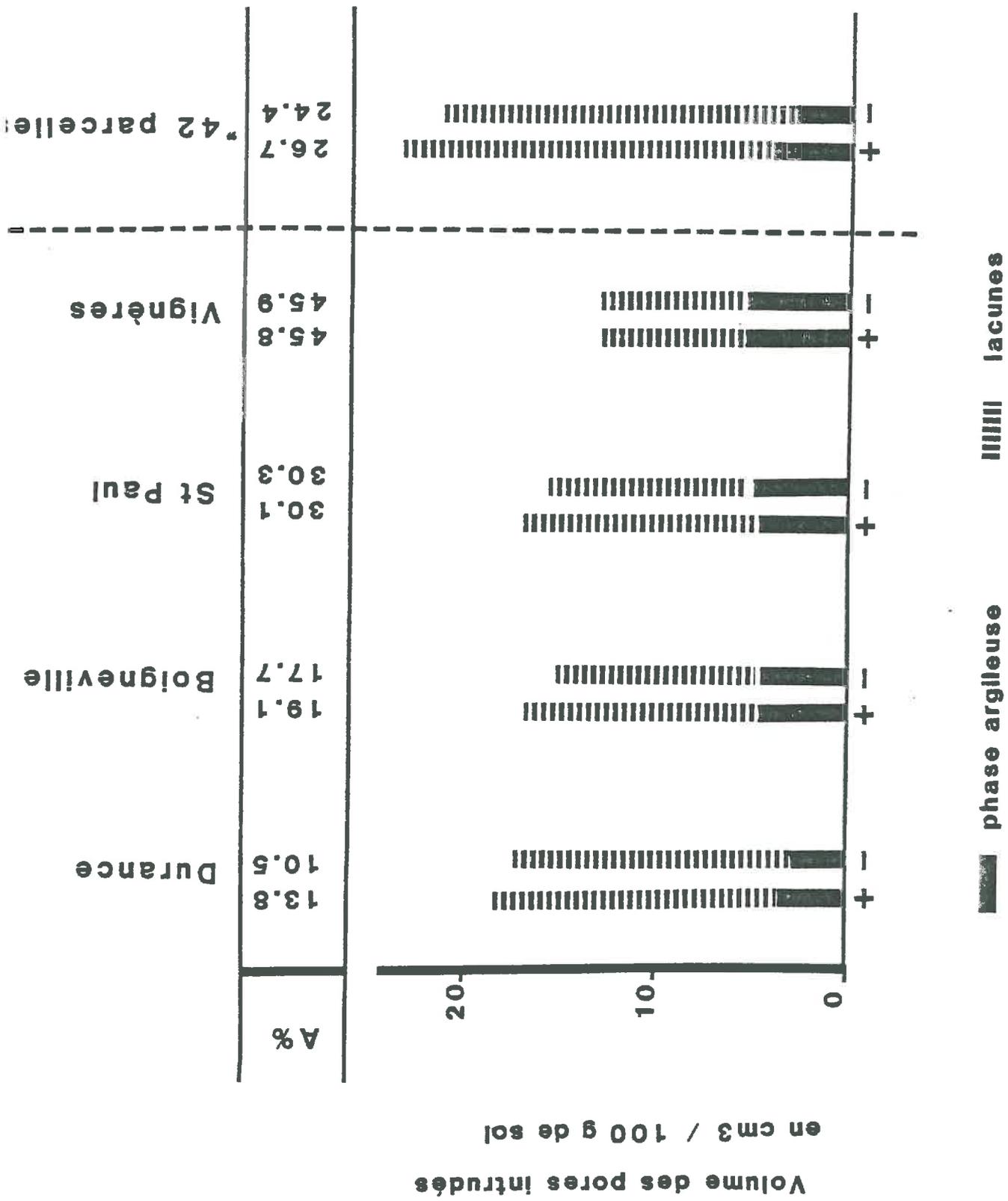


Fig 5

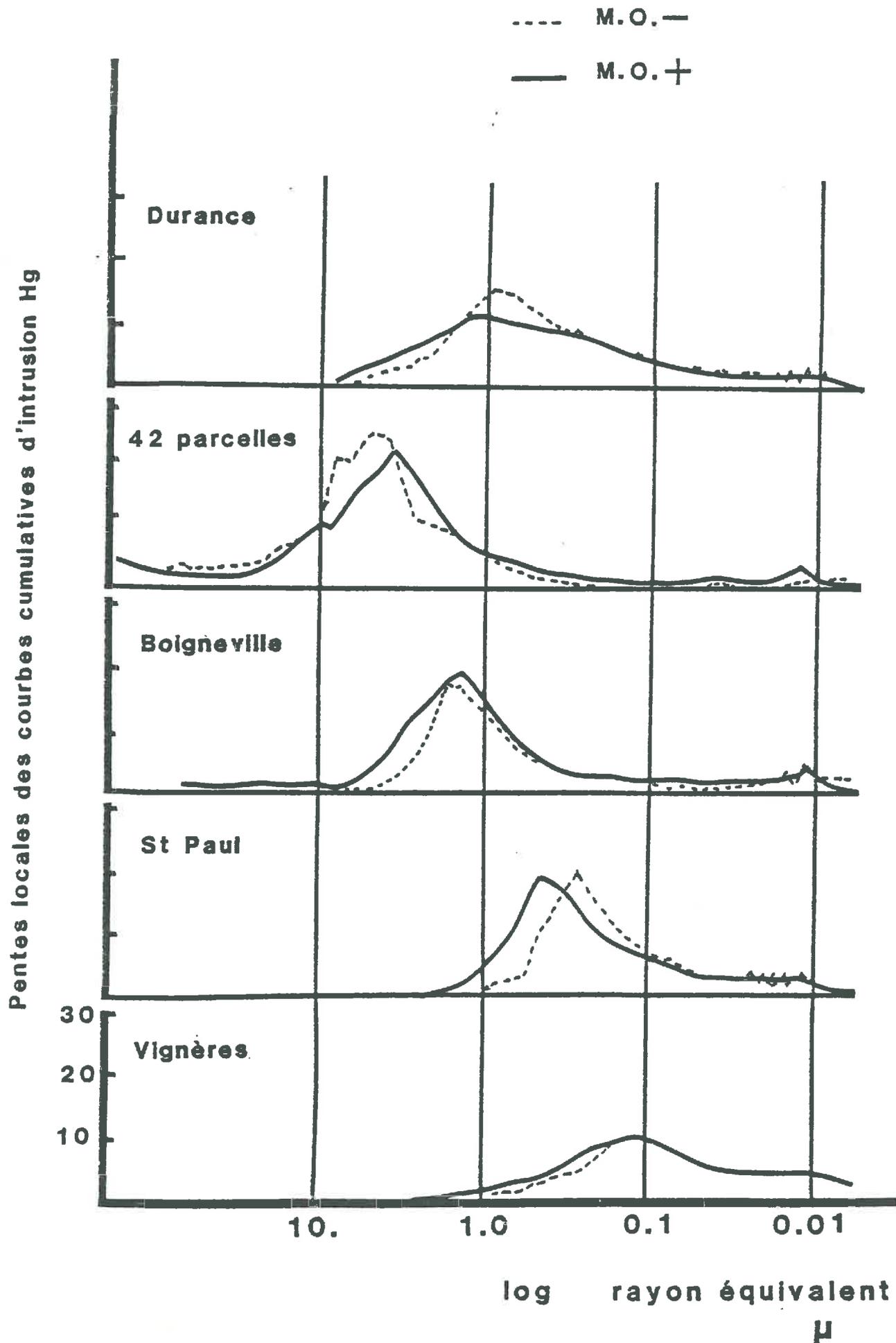


Fig 6

3. HYDRATATION-DESSICCATION/GONFLEMENT-RETRAIT

3.1. Propriétés de rétention : Courbes de potentiel

L'étude des relations potentiel-teneur en eau sur des agrégats de 2-3 mm pour chacun des couples de matériaux, met en évidence le rôle de la M.O sur les propriétés de rétention à l'échelle texturale.

Une augmentation de la teneur en M.O induit une augmentation de la teneur en eau à une succion donnée. Cette augmentation de la rétention est d'autant plus forte que :

- la succion est faible,
- la teneur en argile est faible,

l'amplitude d'augmentation de la rétention reste, somme toute, faible dans la gamme de potentiel correspondant généralement à la réserve utile, et ne justifie pas l'idée communément répandue de l'augmentation de la réserve en eau par les matières organiques.

Pour éliminer les effets parasites des différences de teneurs en argile dans un même couple, nous avons pondéré les teneurs en eau par la teneur en argile de l'échantillon (fig 7).

On constate que pour une succion de 15 bar, les courbes $W = f(\psi)$ convergent. A une telle succion, on peut faire l'hypothèse que l'eau contenue dans l'échantillon est contenue dans la seule phase argileuse et que celle-ci est saturée. Ainsi donc, le volume d'eau contenu dans l'échantillon représente le volume de l'espace poral de la phase argileuse.

L'égalité des teneurs en eau à 15 bar, indépendamment de la teneur en matières organiques, vient confirmer les résultats obtenus en porosimétrie à mercure. La rétention en eau de la phase argileuse n'étant pas modifiée à cette succion par les apports de matières organiques, on peut admettre que l'organisation de la phase argileuse n'est pas modifiée.

Seuls les échantillons des 42 parcelles présentent encore une fois une différence significative.

Propriétés de Gonflement-Retrait

La comparaison des courbes de gonflement-retrait couple par couple montre que :

- l'allure générale des courbes n'est pas modifiée (retrait normal, point d'entrée d'air, retrait résiduel, limite de retrait, domaine de masse volumique constante),

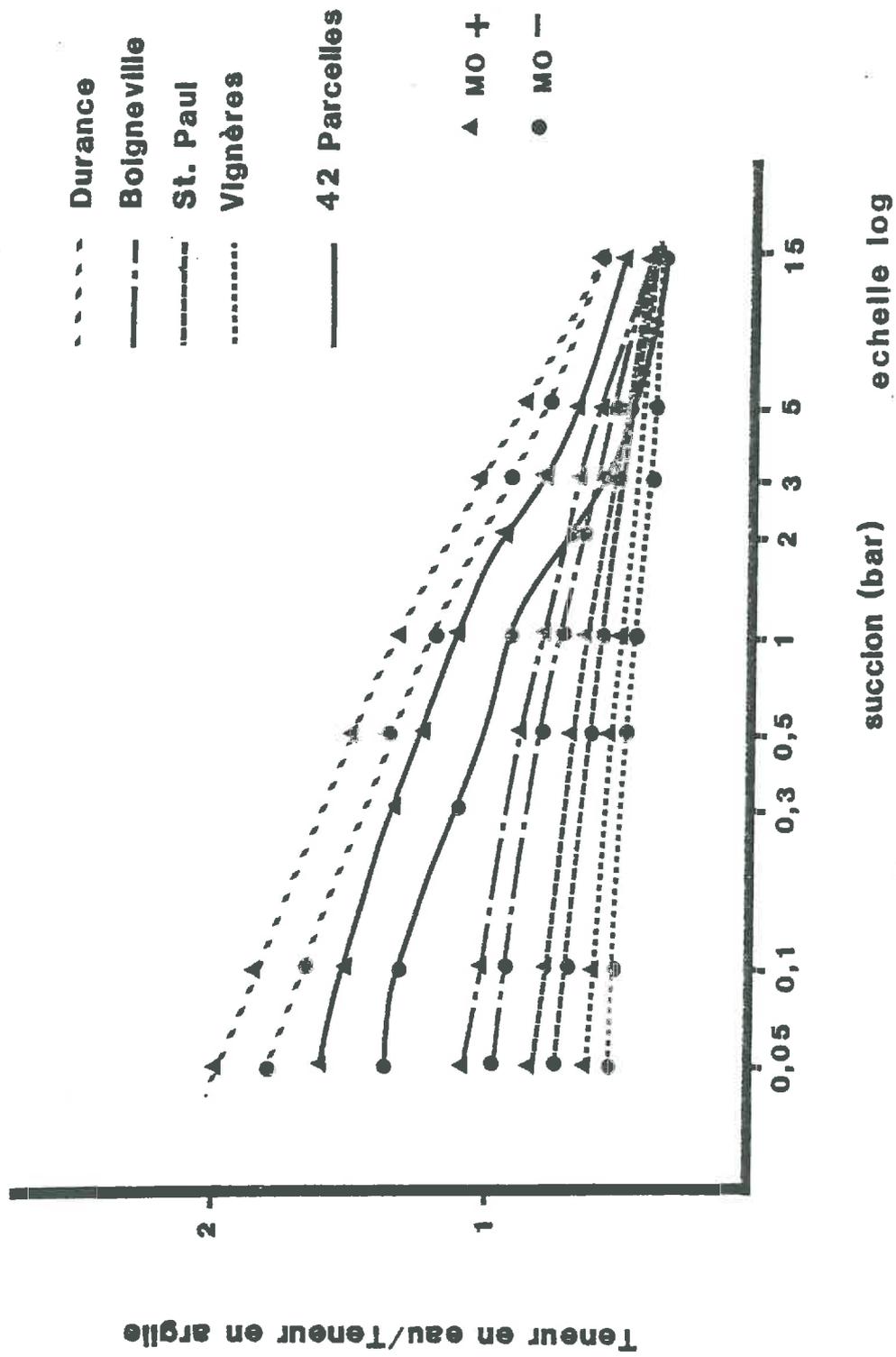


Fig 7

- la dispersion des résultats expérimentaux augmente avec la teneur en M.O.
- l'écart à la droite de saturation est plus marqué lorsque l'échantillon contient plus de M.O.
- la détermination graphique des points particuliers est relativement incertaine.

Comme le montrait précédemment les résultats concernant les propriétés de rétention, la teneur en eau au gonflement maximum défini techniquement par une succion de -3 cm d'eau est nettement augmentée par la présence de M.O. supplémentaires.

Si on définit (STENGEL et al., 1984) le gonflement potentiel G_p comme la différence entre les indices des vides au maximum de gonflement et à l'état sec (à 105°C), on constate que le gonflement potentiel augmente avec la teneur en Carbone (fig 8).

Interprétation des courbes de retrait en terme de potentiel

Si on porte sur du papier semi-logarithmique (fig 9) le volume massique en fonction du log du potentiel (après transformation des teneurs en eau mesurées, par lecture graphique sur les courbes potentiel-teneur en eau), on peut rendre compte de la relation volume massique-potential par une tridroite dont les points particuliers sont l'état sec à 105°C, la limite de retrait, le point d'entrée d'air et le point de gonflement maximum.

Pour autant que les imprécisions de mesure et d'appréciation graphique le permettent, il semble que :

- Pour un matériau, le potentiel à la limite de retrait est indépendant de la teneur en matières organiques (dans la gamme de variation étudiée, bien entendu),
- Les potentiels aux points d'entrée d'air se différencient d'autant plus dans un couple que la teneur en argile est faible.
- Pour un couple, l'écart de volume massique est constant dans la gamme des potentiels compris entre "l'état sec (105°C)" et le point d'entrée d'air.

Ainsi donc le gonflement n'est augmenté par la présence de matières organiques que dans le domaine saturé ou pseudo-saturé. Des alternances d'humectation-dessiccation pour des teneurs en eau inférieures au point d'entrée d'air, entraîneraient donc des amplitudes de gonflement-retrait indépendantes de la teneur en matières organiques.

La stabilité du potentiel à la limite de retrait avec les variations de teneurs en M.O. est en accord avec le fait que l'organisation de la phase argileuse demeure inchangée. En effet, la limite de retrait d'un matériau correspond au point d'entrée d'air propre à sa phase argileuse (STENGEL, 1981).

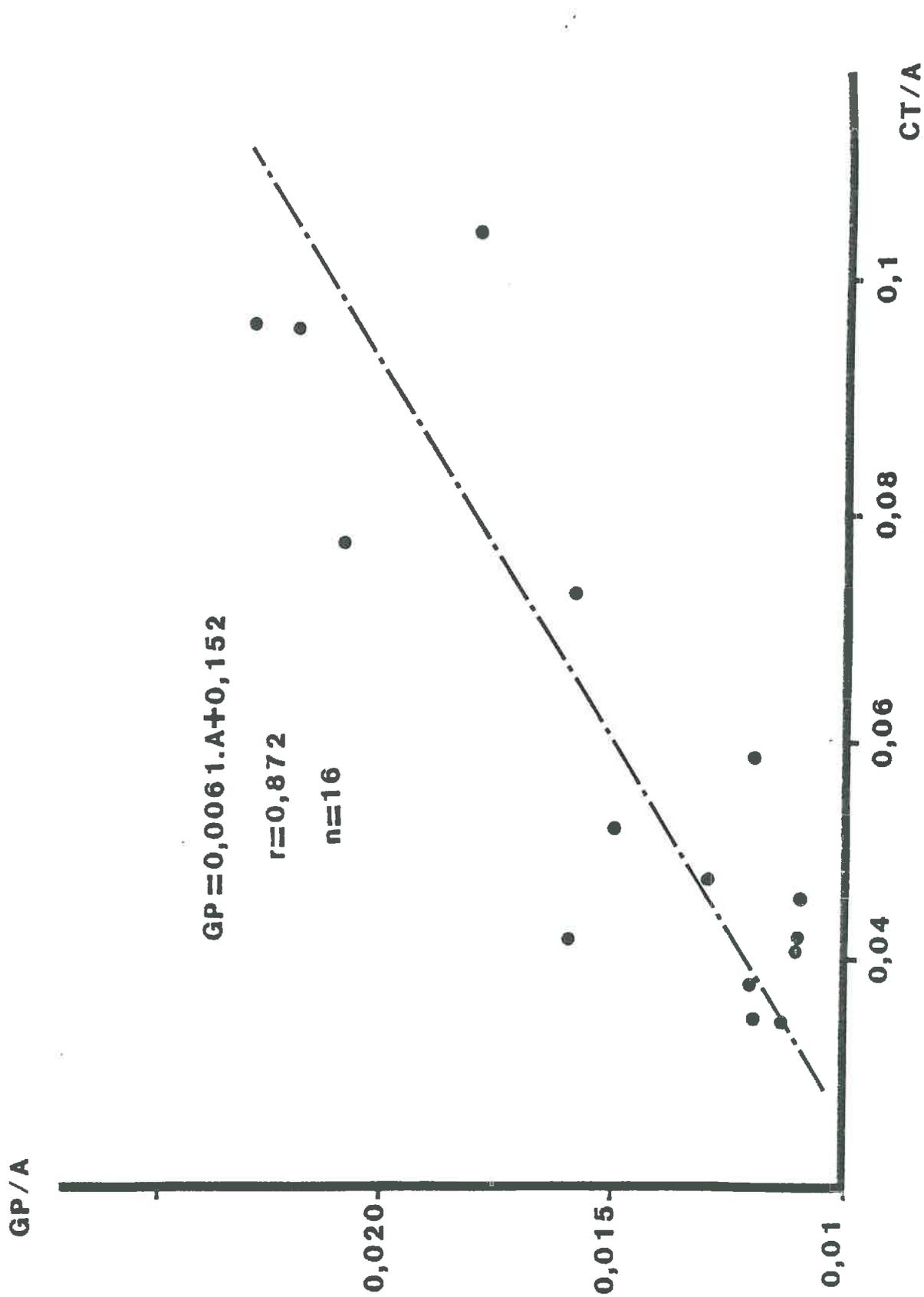


Fig 8

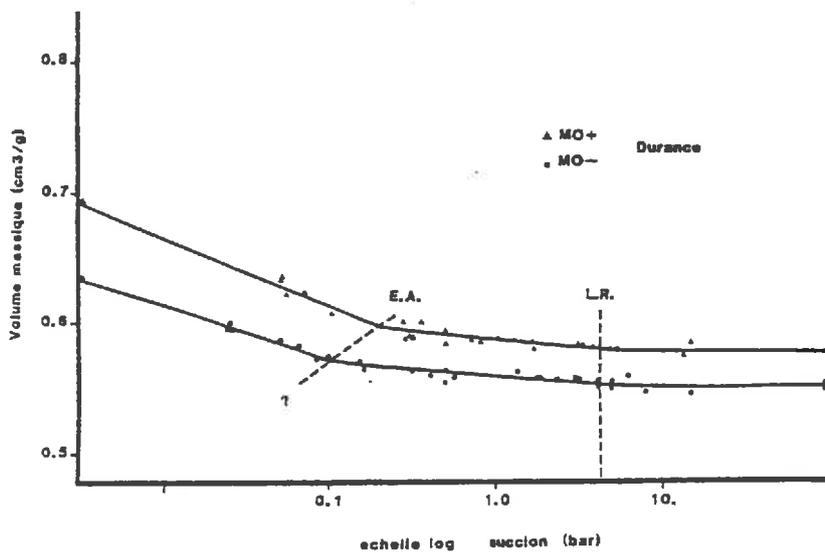
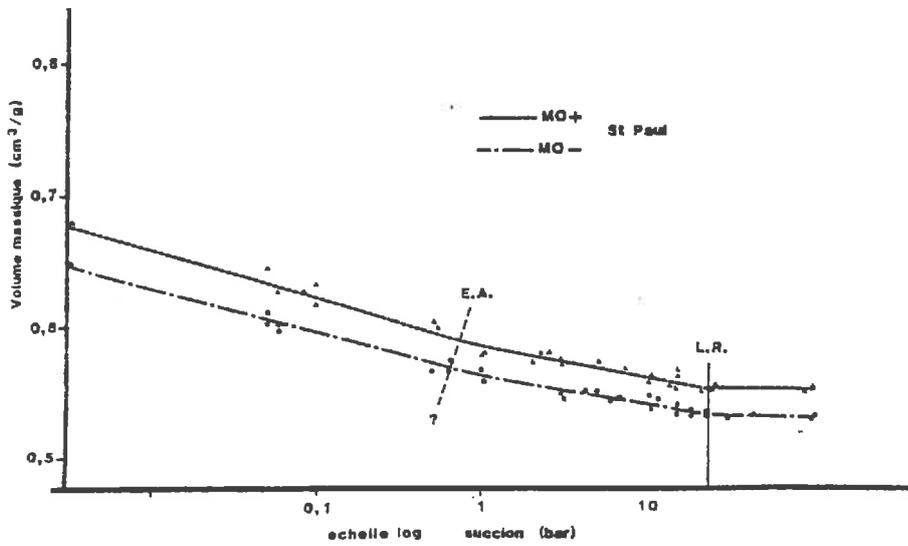
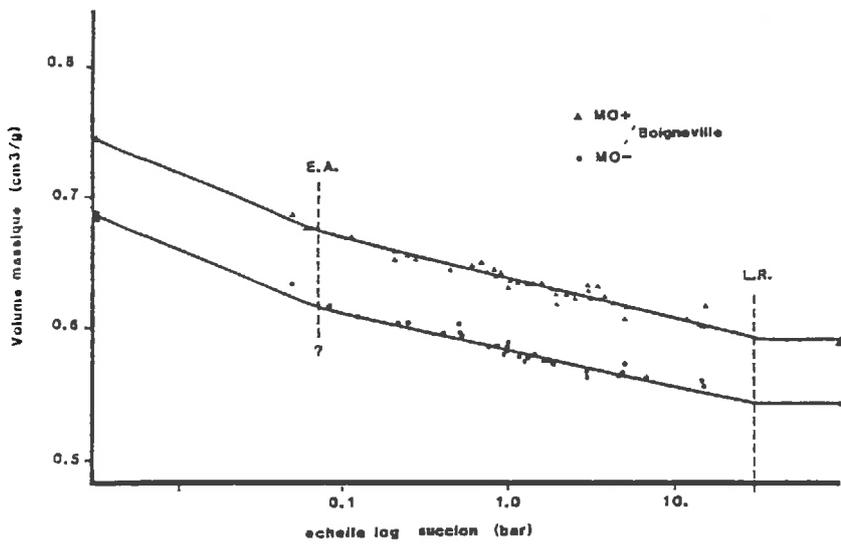


Fig 9

4. PROPRIETES MECANIQUES

4.1. Résistance à la rupture

4.1.1. Résistance à la rupture à l'échelle texturale

Contrairement aux propriétés présentées précédemment, la résistance à la rupture est mesurée agrégat par agrégat. On dispose donc de la variabilité de cette propriété à cette échelle. On étudie donc une distribution et non plus une valeur moyenne.

Agrégats naturels à l'état sec

Quels que soient les échantillons et indépendamment de leur teneur en matières organiques, on constate (Tab 2) que les distributions des résistances à la rupture sont dissymétriques, le mode étant toujours décalé vers les valeurs les plus faibles.

On peut avancer une explication, au moins partielle, de ce phénomène : la méthode de préparation mécanique des agrégats, en détruisant les agrégats les moins cohérents, sélectionne les agrégats les plus résistants. La distribution des résistances à la rupture des agrégats ainsi préparés est donc tronquée dans la gamme des plus faibles résistances.

On peut rapprocher cette observation, de la remarque concernant l'effet de la préparation mécanique des agrégats sur leur teneur en matière organique. Celle-ci est plus faible que la teneur en matière organique du "tout venant".

La préparation mécanique des agrégats, en éliminant les agrégats les plus riches en matière organique atténue donc la différence des résistances à la rupture dans un même couple.

Comme pour les autres propriétés physiques, la teneur en argile est une variable déterminante pour expliquer la variabilité de la résistance à la rupture à l'échelle texturale. Celle-ci, peut être considérée comme directement proportionnelle à la teneur en argile, dans la gamme des teneurs en argile de nos échantillons (GUERIF, à paraître).

Pour comparer les différents échantillons et mettre en évidence l'effet des matières organiques, on considère la résistance à l'écrasement (moyenne) ramenée à la teneur en argile (fig 10).

On constate que les matières organiques semblent diminuer la résistance à la rupture. On peut envisager comme explications :

- une modification des propriétés mécaniques propres à la phase argileuse par les matières organiques liées. Celle-ci est peu probable si on considère l'absence de modification de l'organisation de la phase argileuse mise en évidence, notamment par la porosimétrie à mercure,

TABLEAU 2

CARACTERISTIQUES DES
HISTOGRAMMES DE RESISTANCE A L'ECRASEMENT

Echantillons :	nombre : agrégats :	moyenne : (bar) :	test-t : Student :	variance :	assymétrie :	aplat- : issement :
Durance - :	80 :	7.68 :	0.6 :	8.95 :	0.59 :	-0.64 :
Durance + :	80 :	7.40 :	N.S. :	7.38 :	0.90 :	1.28 :
Boigneville- :	60 :	23.79 :	3.19 :	55.03 :	0.48 :	-0.13 :
Boigneville+ :	60 :	19.93 :	H.S. 0.2% :	32.64 :	0.57 :	0.41 :
St Paul - :	60 :	26.57 :	2.48 :	48.95 :	0.42 :	1.01 :
St Paul + :	60 :	23.59 :	S. 1.6% :	37.21 :	0.35 :	-0.42 :

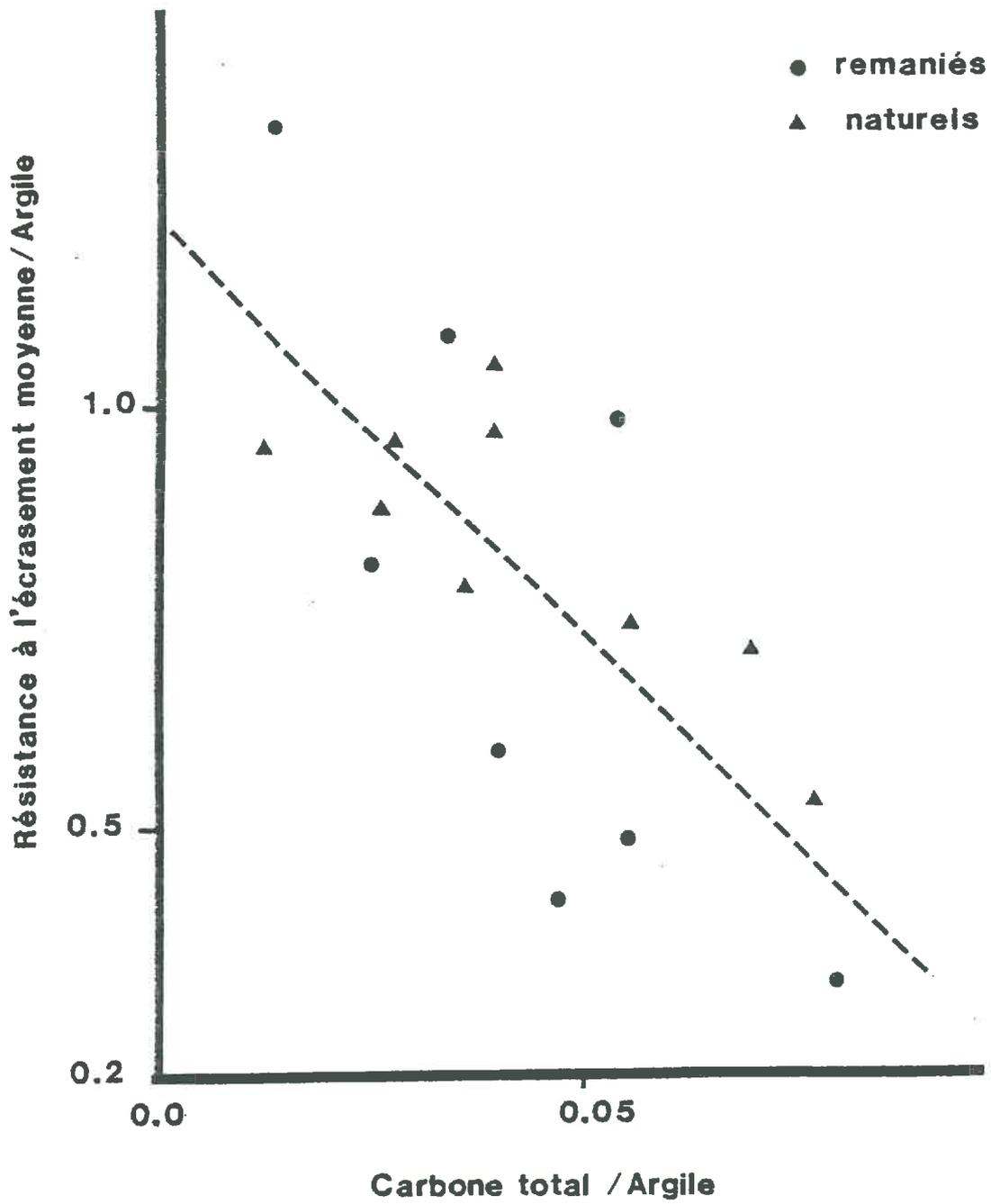


Fig 10

- une fragilisation de l'assemblage due à l'augmentation du volume de lacunes ainsi qu'à la présence de fragments de matières organiques pouvant induire des discontinuités mécaniques.

Le Carbone libre et le Carbone total n'étant pas des variables indépendantes, il est difficile de mettre en évidence statistiquement le rôle privilégié de l'un ou l'autre des deux compartiments, M.O libres et liées.

Distribution de la résistance à l'écrasement, influence de la teneur en matières organiques.

L'hétérogénéité de répartition des matières organiques dans le matériau est responsable, en partie, de l'étalement de la distribution de la résistance à l'écrasement.

Si on compare les distributions de résistances à l'écrasement pour le couple Boigneville L_0/L_2 (fig 11a) portant sur 280 agrégats par couple, on constate :

- que l'échantillon L_2 (le plus riche en M.O) présente une distribution étalée entre 0 et 45 bar,
- que l'échantillon L_0 présente apparemment une distribution étalée entre 5 et 70 bar (les trois dernières classes étant peu significatives).

Nous avons voulu voir si l'étalement des résistances à l'écrasement est liée à la variabilité des teneurs en matières organiques des agrégats.

Ne disposant pas de techniques de dosage agrégat par agrégat, nous avons été amenés à procéder comme suit :

- Nous avons défini 9 classes de résistance à l'écrasement.
- Après la mesure de résistance à l'écrasement, les agrégats de même classe de résistance ont été regroupés par lots.
- Nous avons effectué autant de mesures qu'il était nécessaire pour obtenir 0,6 g d'agrégats par lot ; masse nécessaire pour effectuer une mesure de Carbone par la méthode d'Ane sur chaque lot représentatif d'une classe de résistance à l'écrasement.

La lourdeur d'un tel protocole nous a contraint à n'effectuer ces mesures que pour un couple (Boignelle L_0/L_2) cf. Tab 3 et fig 11b.

Il apparaît (fig 11b) que :

- 1/ Il existe bien une relation entre la résistance à l'écrasement des lots d'agrégats et leurs teneurs en matières organiques comme c'est le cas pour l'échantillon L_2 .
- 2/ La matière organique n'est pas le seul facteur susceptible d'expliquer l'étalement de la distribution des résistances à l'écrasement d'agrégats.

Boigneville L0/L2 280 agrégats

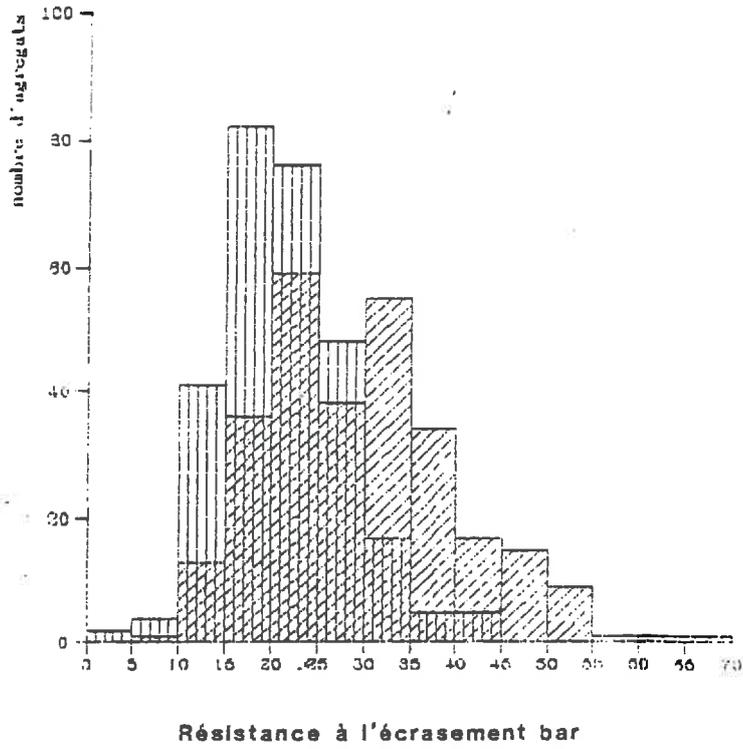


Fig 11 a

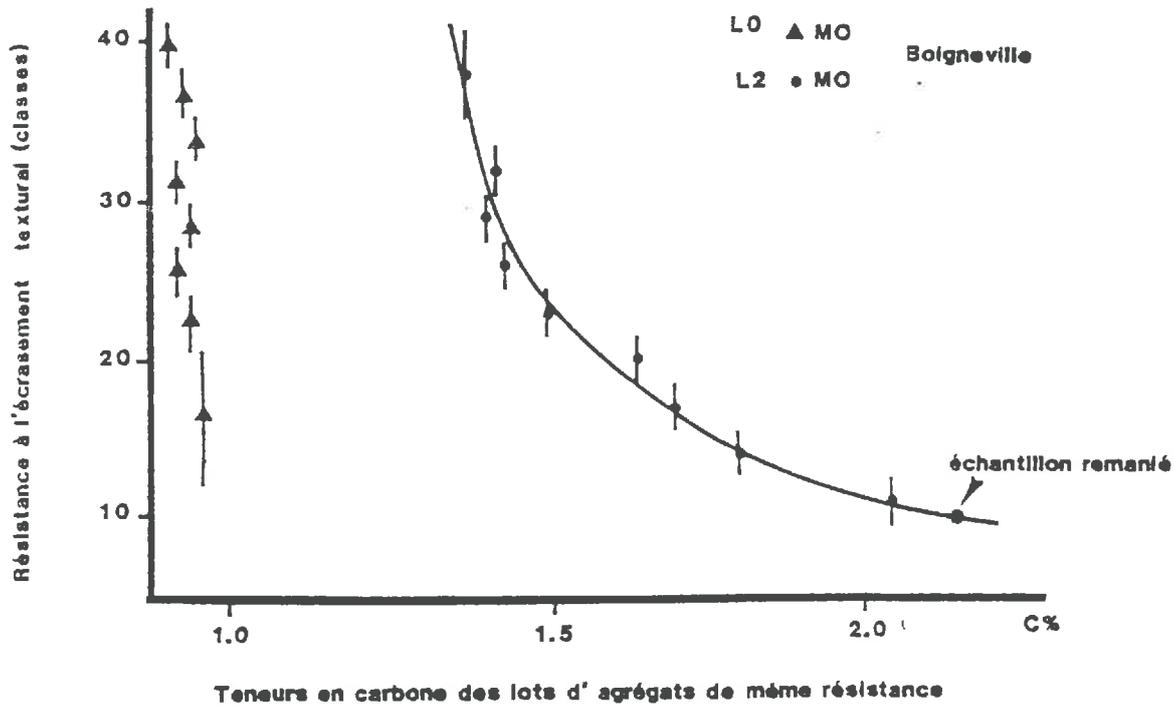


Fig 11 b

TABLEAU 3

BOIGNEVILLE MO +		BOIGNEVILLE MO -	
Resistance moyenne de la classe (bar)	Teneur en Carbone total du lot (%)	Resistance moyenne de la classe (bar)	Teneur en Carbone total du lot (%)
10.5 + 1.5	2.05		
13.5 + 1.5	1.80		
16.5 + 1.5	1.70	16.5 + 4.5	0.96
19.5 + 1.5	1.64		
22.5 + 1.5	1.50	22.5 + 1.5	0.95
25.5 + 1.5	1.43	25.5 + 1.5	0.90
28.5 + 1.5	1.40	28.5 + 1.5	0.94
31.5 + 1.5	1.42	31.5 + 1.5	0.92
		34.5 + 1.5	0.94
37.5 + 3.1	1.37	37.5 + 1.5	0.91
		> 39.0	0.89

En effet, l'échantillon L_0 présente une gamme de variation de la résistance à l'écrasement, voisine de celle de L_2 , alors que les lots d'agrégats présentent une faible variabilité de teneurs en matières organiques.

Résistances à l'écrasement des agrégats d'échantillons remaniés (état sec)

En remaniant les échantillons, on a cherché à atténuer les deux phénomènes mis en évidence ci-dessus : l'hétérogénéité de répartitions des matières organiques dans le matériau L_2 , ainsi que la variabilité des agrégats observée en L_0 , probablement liée aux différences d'histoire hydrique pour mettre en évidence plus nettement un "effet M.O".

Le remaniement des échantillons, effectué sur les échantillons tout venant, augmente la teneur en matière organique des agrégats et accroît la différence intra-couple (cf. Tab 4).

On obtient ainsi très nettement des différences significatives intra-couples de la résistance à l'écrasement :

- au niveau des distributions (test de χ^2)
- au niveau des moyennes (à moins de 1 % par le test de Student).

Agrégats naturels à l'état humide

La fig 12 illustre la relation qui existe entre la résistance à l'écrasement texturale et la teneur en eau.

Mises à part les différences observées à l'état sec et décrites précédemment, on ne constate pas ou peu de différence entre les échantillons L_0 - L_2 .

Pour des valeurs particulières du potentiel de l'eau 1,5 et 15 bar, on a comparé les distributions des résistances à l'écrasement des agrégats des échantillons L_0 et L_2 (cf Tab 5).

A 1,5 bar, il n'y a pas d'effets des matières organiques sur la résistance à l'écrasement (les moyennes ne sont pas significativement différentes).

A 15 bar, les moyennes de résistance à l'écrasement des échantillons L_0 et L_2 sont significativement différentes à 5 %. Par contre, un test de χ^2 sur les distributions reste non significatif.

4.12. Résistance à la rupture à l'échelle structurale

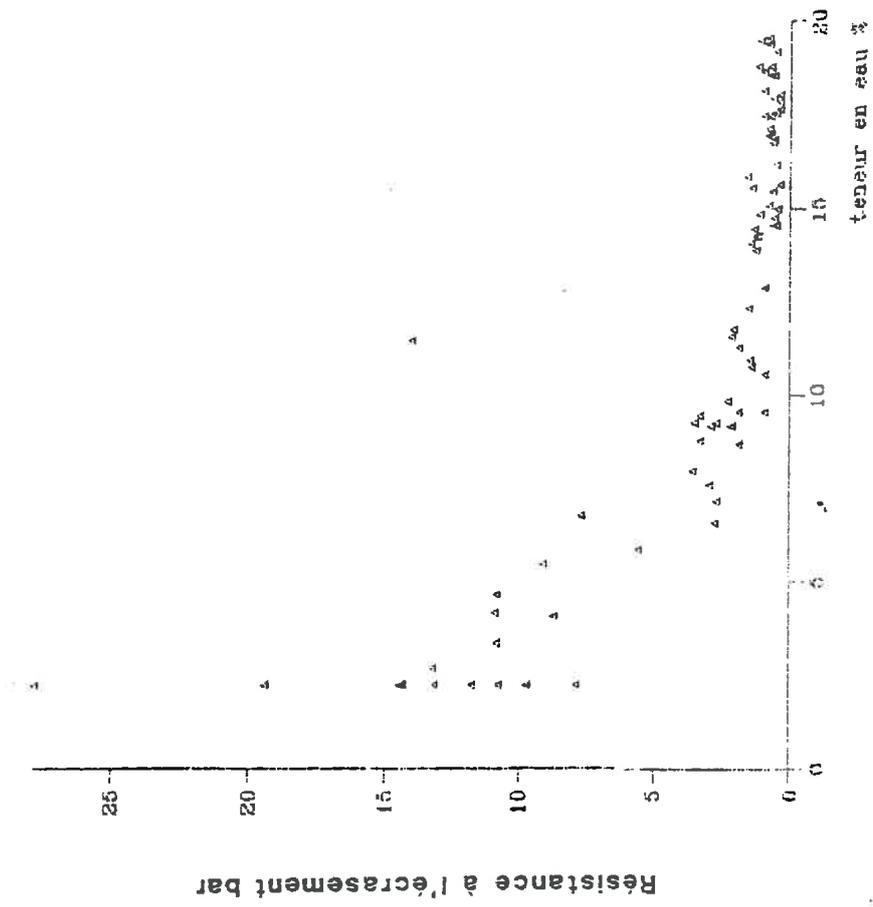
Le compactage d'éléments structuraux disjoints initialement provoque leur coalescence. La résistance à la rupture de ce massif ainsi constitué dépend des conditions de compactage : humidité pression, et bien sûr, de l'indice des vides résultants (GUERIF, à paraître).

Nous avons testé donc sur un couple (St Paul) l'effet des M.O sur la "qualité" de cette coalescence dans des conditions standard.

TABLEAU 4

Echantillons :	AGREGATS NATURELS ARRONDIS						AGREGATS REMANIES ARRONDIS					
	Argile %	C.tot. %	C.libre %	masse volumique g/cm ³	résist. moyenne bar	écrasement ec.type	C.tot. %	C.libre %	masse volumique g/cm ³	résist. moyenne bar	écrasement ec.type	
rance + :	13.8	1.04	0.27	1.79	7.4	2.7	2.03	1.20	1.52	4.0	1.1	
rance - :	10.5	0.72	0.14	1.84	7.6	3.4	0.57	0.08	1.69	5.2	1.2	
gneville + :	26.7	1.45	0.16	1.81	19.9	5.7	2.12	0.36	1.53	8.7	2.5	
gneville - :	24.6	0.95	0.09	1.88	23.8	7.4	0.98	0.12	1.71	14.5	3.2	
t Pauli + :	30.1	1.09	0.12	1.83	23.6	6.1	1.42	0.16	1.73	12.6	2.6	
t Pauli - :	30.3	0.81	0.06	1.89	26.6	7.0	0.78	0.06	1.82	24.6	5.1	

boigneville L2



boigneville L0

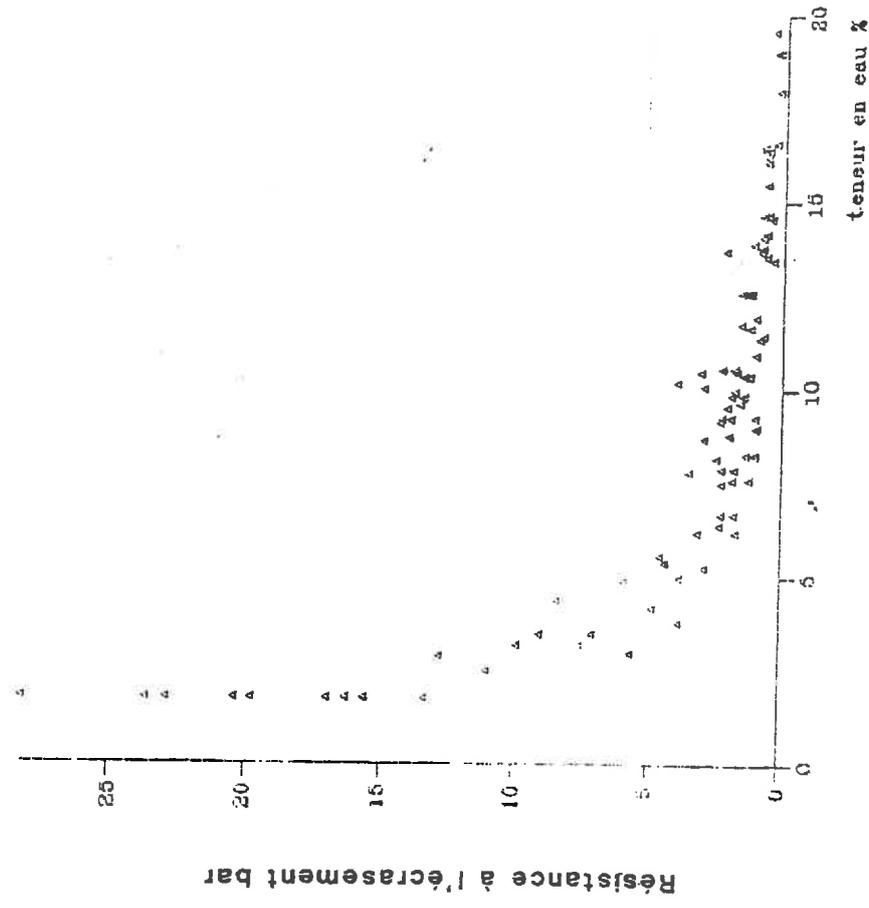


Fig 12

TABLEAU 5

Potentiel	1.5 bar		15 bar	
Resistance à l'écrasement	moyenne (bar)	écart type	moyenne (bar)	écart type
Boigneville L0	1.57	0.26	3.11	0.48
Boigneville L2	1.56	0.39	2.90	0.66

Les échantillons (agrégats de 2-3 mm) St Paul (surface M.O+ et profondeur MO-) ont été portés au même potentiel de 100 mb, puis compactés jusqu'à obtenir un indice des vides structural de $e_s = 0,4$ (volume des vides inter-agrégats ramené au volume de solide).

Pour une première série de massifs compactés, on a mesuré la résistance à la rupture à l'humidité de compactage. Sur une deuxième série, on a mesuré la résistance à la rupture après dessiccation des massifs compactés sous silicagel jusqu'à stabilisation du poids. La teneur en eau étant voisine de 0 % obtenue par séchage à l'étuve à 105°C.

Les résultats sont présentés Tab 6.

A l'état humide, les résistances à l'écrasement des deux échantillons sont faibles et peu différentes. On observe néanmoins une coalescence légèrement plus faible pour l'échantillon MO+.

Après dessiccation, on constate que la prise en masse des massifs compactés a été diminuée de moitié par la présence des matières organiques.

Ce phénomène bien que mis en évidence sur une constatation ponctuelle pourrait expliquer la relation entre la richesse en matière organique et la facilité de travailler le sol communément établie par les experts.

4.2. Comportement au compactage

4.21. Rappel

En portant l'indice des vides structural (vides inter-agrégats) après compactage en fonction de la teneur en eau (fig 13), on peut distinguer (GUERIF, 1982) trois domaines hydriques de comportement au compactage :

$W < W_1$: l'amplitude du tassement est faible. Elle est fonction de la résultante de la pression appliquée et du frottement entre agrégats. Elle est indépendante du temps d'application, les agrégats ont un comportement solide, leur résistance à l'écrasement est grande par rapport aux contraintes qui se développent dans le massif.

$W_1 < W < W_2$: à l'humidité W_1 la résistance à l'écrasement des agrégats est de l'ordre de grandeur des contraintes auxquelles ils sont soumis, l'augmentation de l'humidité s'accompagne, comme on l'a vu précédemment, d'une diminution rapide de la résistance à l'écrasement textural, les agrégats deviennent fragiles. Le tassement résultera du réarrangement des petits morceaux issus de la rupture.

$W > W_2$: dans cette gamme de teneur en eau, on ne peut plus considérer la déformation comme instantanée. Le comportement sous charge est alors visqueux, l'amplitude de la déformation étant fonction du temps d'application de la charge.

TABLEAU 6

Echantillons	St Paul MO+	St Paul MO-
Potentiel	100 mbar	100 mbar
Teneur en eau au compactage	21.9 %	19.3 %
Resistance à l'écrasement humide	0.081 bar	0.094 bar
Resistance à l'écrasement sec	1.604 bar	2.373 bar

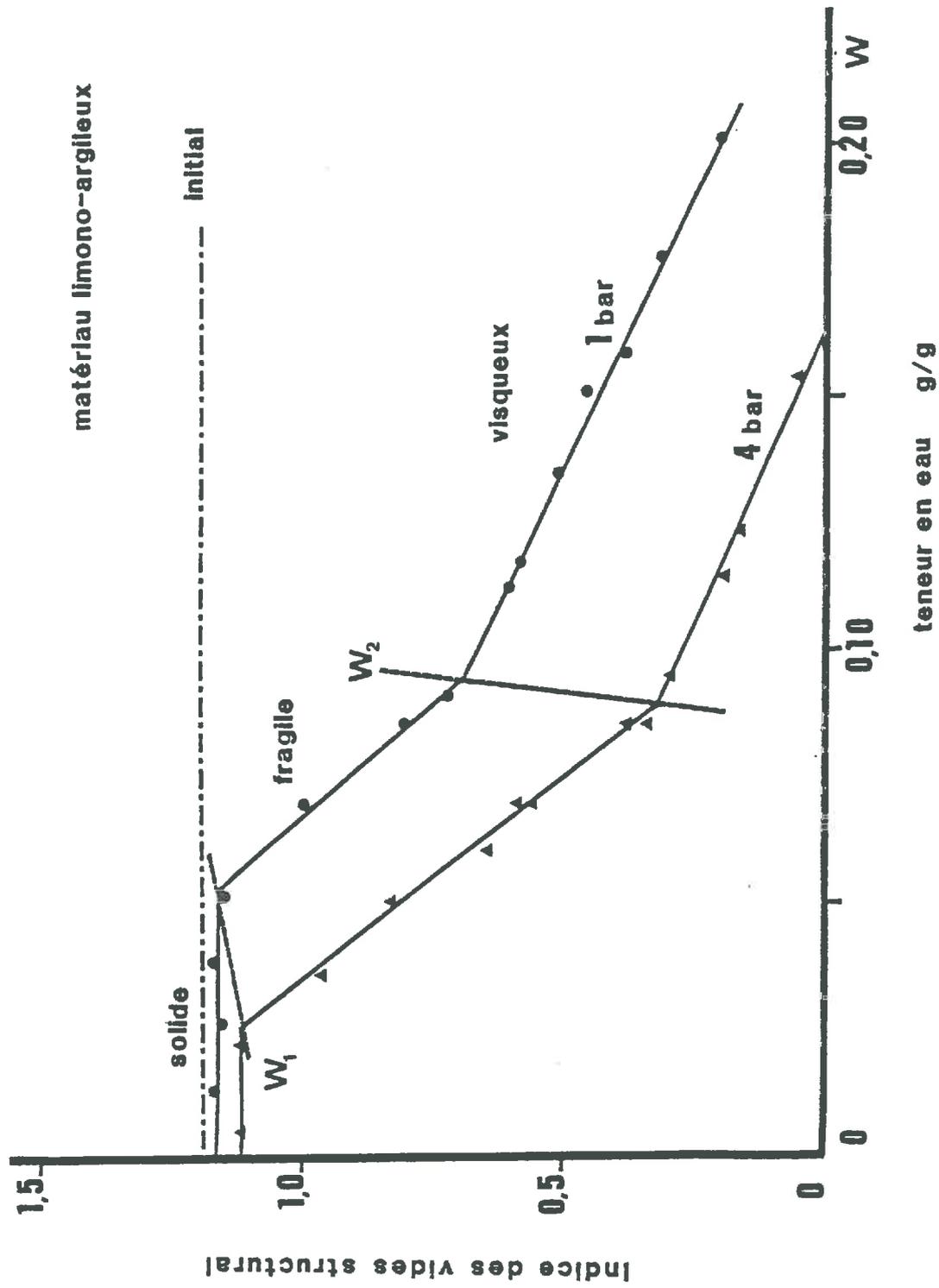


Fig 13

4.22. Effet des matières organiques

Le matériau testé provient de Boigneville ; les trois échantillons, à teneur en argile identique, contiennent respectivement 9 %, 10% et 13 % de Carbone total, les échantillons ont été soumis à une charge de 4 bar.

On constate (fig 14) que :

- dans le domaine visqueux, l'échantillon est d'autant plus compressible qu'il contient moins de matières organiques, néanmoins cet effet reste de faible amplitude. Les teneurs en eau, bornes de ce domaine, sont fonction de la matière organique, mais correspondent à des potentiels identiques. Ainsi à la limite inférieure de viscosité, le potentiel est de 15 bar, au compactage maximum ($e_s = 0$) le potentiel est voisin de 1 bar.

- seul l'échantillon le moins riche en M.O présente un domaine solide. L'accroissement de la teneur en matière organique diminue, comme on l'a vu précédemment, la résistance à l'écrasement à l'échelle texturale. On constate donc, pour $W < W_2$, un tassement d'autant plus grand que la teneur en matière organique augmente.

On a montré précédemment (GUERIF, 1979) que les matières organiques libres localisées dans l'espace poral structural pouvaient avoir un effet protecteur vis-à-vis du compactage, du fait de leur élasticité propre. On constate ici que les matières organiques localisées dans l'organisation texturale, en diminuant la "cohésion" à cette échelle peuvent, au contraire, faciliter les tassements ; en revanche, en diminuant la prise en masse, elles faciliteront la récupération des compactages par travail du sol.

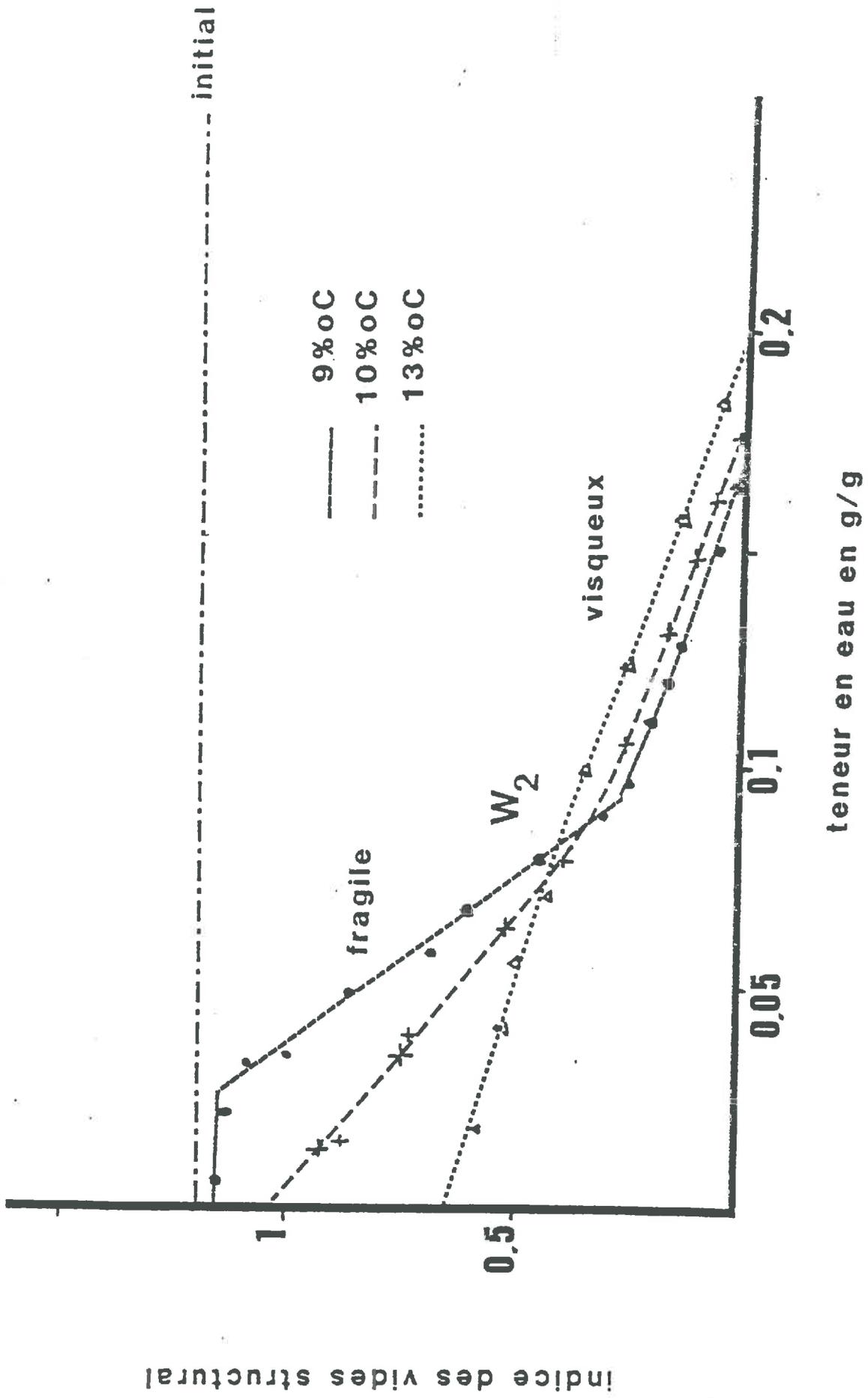


Fig. 14

CONCLUSION

L'influence des matières organiques sur les propriétés physiques et mécaniques intrinsèques des matériaux terreux définies à l'échelle texturale est manifeste. Mais il convient de distinguer les sens d'action des différents effets, et leurs intensités pour des variations de teneur en Matières organiques compatibles avec la pratique agricole.

On constate donc, avec l'augmentation de la teneur en M.O :

1/ Une augmentation du volume de l'espace poral textural. Cette augmentation se situe essentiellement au niveau des lacunes. Il semble que l'organisation de la phase argileuse ne soit pas modifiée (exception faite de l'échantillon "42 parcelles de Versailles" où les incorporations de M.O sont incompatibles avec la pratique).

2/ Une augmentation de la quantité d'eau retenue dans le matériau à un potentiel donné, pour des succions comprises entre 0 et 15 bar. Au-delà de 15 bar, les quantités d'eau retenues sont identiques et comme à cette succion on peut admettre que l'eau est contenue dans la seule phase argileuse, il semble donc que la relation potentiel-teneur en eau de la phase argileuse soit inchangée.

3/ Que le potentiel correspondant à la limite de retrait, est, indépendant de la variation de teneur en M.O (dans la gamme étudiée), il semble que le point d'entrée d'air de la phase argile, définissant la limite de retrait du matériau, soit indépendant des variations de teneur en M.O.

Ces trois constatations étant faites, on peut penser que, pour les variations de M.O observées, les propriétés et l'organisation de la phase argileuse ne sont pas modifiées. Ainsi, donc, l'incorporation de M.O dans les conditions agricoles ne conduirait pas à un enrichissement sensible de la phase argileuse en M.O.

4/ Une augmentation du gonflement potentiel. Cette variation du gonflement n'apparaît que pour des succions inférieures à la succion correspondant au point d'entrée d'air.

5/ Une diminution de la résistance à l'écrasement texturale moyenne, qui s'accompagne d'une augmentation de la compressibilité dans le domaine fragile.

6/ Une diminution de la résistance à l'écrasement structural, l'écart est d'autant plus grand que l'échantillon compacté a été desséché.

Néanmoins, globalement, et mise à part la constatation n° 6, l'intensité de ces variations de comportement consécutives à des variations de teneurs en M.O reste faible et insuffisante pour expliquer les effets bénéfiques communément admis.

Des différences importantes de comportements sont cependant présentées dans la littérature. Elles sont généralement issues :

- de résultats obtenus sur des couples où les écarts de teneur sont extrêmes et exceptionnels et rarement compatibles avec la pratique agricole.

- de modèles comparant des matériaux minéraux purs et des matériaux enrichis. Il semblerait que la "première couche" de molécules organiques fixée à la surface des argiles détermine le plus gros de la modification observée, les enrichissements ultérieurs n'entraînant qu'une faible dérive (CHASSIN, communication personnelle). Les argiles des sols agricoles ont toujours, au moins, cette "première couche", laissant ainsi une faible latitude à l'évolution des propriétés de la phase argileuse proprement dite, avec les fluctuations des teneurs en M.O du sol.

- de corrélations indirectes. La teneur en matière organique est corrélée à de nombreuses variables qui, elles, peuvent expliquer les modifications enregistrées.

Ainsi, par exemple :

- la teneur en M.O est corrélée à la profondeur et la profondeur à l'histoire hydrique de l'échantillon. Quelle est alors la part de cette histoire hydrique dans la modification de comportement enregistrée ?

- la baisse des teneurs en M.O dans les régions de grande culture est corrélée à l'évolution des systèmes de cultures et du matériel y afférent.

Quelle est l'influence de ces modifications d'exploitation sur les variables mesurées ?

Si le principal effet des matières organiques ne semble pas se situer à l'échelle des comportements texturaux, mesurés pour des états hydriques à l'équilibre, il convient cependant de s'interroger sur :

- l'existence possible, bien qu'improbable, d'effet synergiques : l'effet global des matières organiques étant plus qu'une somme de micro-effets. Reste à trouver une méthodologie pour le démontrer....

- l'effet certainement déterminant des modifications par les matières organiques de la cinétique d'hydratation, Quel est alors le comportement physique ou mécanique des matériaux dont les lois de transferts hydriques sont momentanément modifiées ? mais comment, par exemple, effectuer dans l'état actuel de nos connaissances, des mesures de propriétés mécaniques sur des éprouvettes de sol où la teneur en eau est anisotrope ?

- la méthodologie et l'échelle d'observation permettant d'étudier l'effet des matières organiques peu ou pas évoluée, situées dans l'espace poral structural, sur les propriétés de transferts et sur les propriétés mécaniques responsables des comportements au champ.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AKROUME C., 1985 - Localisation et caractérisation de la matière organique des sols. Définition d'un modèle d'évolution. Thèse INA-P.G.

CALVET R., CHASSIN P., 1973 - Complexes organiques des argiles : mécanismes de formation, méthodes d'étude et applications. Bull. du Groupe Français des Argiles, XXV-2:37-114.

FIES J.C., STENGEL P., 1981 - Densité texturale des sols naturels. I et II. Agronomie 1(8), 651-666.

FIES J.C., 1984 - Analyse de la répartition du volume des pores dans les assemblages argile-squelettes : comparaison entre un modèle d'espace poral textural et les données fournies par la porosimétrie au mercure. Agronomie 4(9), 891-899.

GUERIF J., 1979 - Mechanical properties of straw. The effect on the soil, in : Straw decay and its effect on disposal and utilization. Proc. Symp. Straw decay Workshop Assesment Techniques, Hatfield Polytechnic, 337 pages, Grossbard E. (Ed), John Wiley New-York.

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.

GUERIF J., 1984 - Matières organiques et propriétés physiques des sols - Etude bibliographique. Rapport d'ATP M.O.S. PIREN-INRA.

GUERIF J., - Estimation de la résistance en traction des matériaux terreux : I- Effet de la texture et des constituants organiques, (à paraître).

GUERIF J., - Estimation de la résistance en traction des matériaux terreux : II- Effet de la structure, interaction avec les constituants organiques et la charge cationique.

HAYES M.H.B., SWIFT R.S., 1981 - Organic Colloïds and organo-mineral Association in the Nature and properties of soil colloïd surfaces. Bull. of the Int. Soc. of Soil Sci., n° 60:67-74.

STENGEL P., DOUGLAS J.T., GUERIF J., GOSS M.J., MONNIER G., CANNEL R.Q., 1984 - Factors influencing the variation of some properties of soils in relation to their suitability for direct drilling. Soil and Tillage Res. (4), 35-53.

STENGEL P., 1981 - Relations entre le retrait et le potentiel de l'eau dans les mélanges smectite-limons. C.R. Acad. Sc. Paris, t. 293, 19/10/1981.