

TH-L33.
GD8 a

THÈSE

présentée à

L'INSTITUT NATIONAL AGRONOMIQUE PARIS-GRIGNON

pour l'obtention du titre de

DOCTEUR INGÉNIEUR

« Sciences Agronomiques »

par

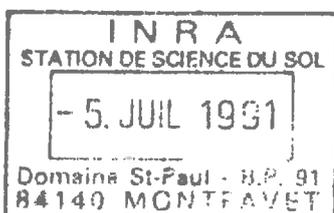
Jean BOIFFIN

Ingénieur Agronome de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon

**La dégradation structurale des couches superficielles du
sol sous l'action des pluies**

Soutenue le 29 Juin 1984 devant la Commission d'examen

MM. M. SEBILLOTTE Président
G. MONNIER Rapporteur
G. BOCQUIER Examineur
C. CHEVERRY "
S. HÉNIN "
G. THÉVENET "



AVANT - PROPOS

Ce travail a été réalisé au sein du Laboratoire de l'INRA associé à la Chaire d'Agronomie de l'INA P-G et s'insère dans le programme de ce Laboratoire concernant les systèmes de culture et leur influence sur le milieu. J'espère qu'il constituera une contribution, si limitée soit-elle, aux missions des deux organismes (INRA et INA P-G) qui m'en ont fourni le cadre et les moyens.

Gérard MONNIER et Michel SEBILLOTTE ont été les initiateurs de ce travail et ont joué un rôle primordial dans son accomplissement.

G. MONNIER m'a aidé, tout d'abord à cerner les contours du sujet puis à structurer mon appréhension du problème. Sur plusieurs points essentiels ses propositions m'ont ouvert la voie et sa clairvoyance m'a été précieuse pour ne pas perdre le fil conducteur. Je lui suis profondément reconnaissant de la confiance et de la disponibilité qu'il a manifestées à mon égard tout au long du travail.

M. SEBILLOTTE m'a initié à la méthode expérimentale et m'a donné foi en sa mise en oeuvre au champ, y compris dans les pires conditions atmosphériques. Fondateur du dispositif de Montluel, il a encadré mes premiers travaux sur la stabilité structurale et la battance. Au cours du travail, plusieurs discussions avec lui et le travail de critique serrée et constructive qu'il a accompli sur les manuscrits, m'ont été d'une aide décisive, tant pour l'élaboration des protocoles que pour la rédaction.

L'oeuvre de Monsieur HENIN m'a fourni la base - les règles d'analyse du comportement du sol - et les matériaux - la théorie de la désagrégation - de ma démarche. A partir de cela, je n'ai fait qu'essayer de recomposer l'histoire et la géographie de la dégradation structurale. Dans cette tentative j'ai été constamment stimulé par l'intérêt qu'il m'a toujours montré à l'occasion de nos nombreuses rencontres.

En acceptant de lire la première version du texte, Claude CHEVERRY m'a apporté l'éclairage d'une compétence et d'une approche différentes et complémentaires de celles dont je suis familier. Le travail qu'il a accompli m'a aidé à cerner zones d'ombres et points forts.

Je remercie vivement Monsieur G. BOCQUIER d'avoir accepté d'être membre du jury. J'espère qu'il verra dans mes tentatives d'analyse morphologique, au-delà de leurs limites et de leurs maladrotes, mon intérêt pour un domaine où j'aimerais bénéficier de son expérience, car j'ai conscience de pouvoir y trouver des réponses aux questions que je me suis posées.

Je remercie également Gilles THEVENET, Chef du service Agronomie de l'ITCF de sa participation au jury. Celle-ci contient en germe la possibilité de développer les applications pratiques du travail et de le confronter aux exigences d'utilisateurs dynamiques et compétents.

Cette laborieuse entreprise n'aurait pas abouti sans les nombreux concours dont j'ai bénéficié tout au long de sa conduite.

Louis Marie BRESSON m'a aidé en réalisant et en observant avec moi les lames minces au laboratoire de la Chaire de Pédologie de l'INA P-G. Ce fut une contribution elle aussi décisive.

Mes collègues de la Chaire d'Agronomie m'ont apporté une aide substantielle. Hubert MANICHON a lu soigneusement la première version et m'a aidé à la fois "à y croire" et à redresser le tir ; Jacques CANEILL, Carolyne DÜRR, Jean-Marc MEYNARD m'ont donné, chacun, à leur manière, de sérieux coups de main, en répondant à mes questions, en me déchargeant au moment opportun de certaines tâches d'enseignement, et par leur soutien matériel et moral dans la dernière ligne droite.

Christian VALENTIN a discuté avec moi de la partie descriptive. Je me suis beaucoup appuyé sur son propre travail sur les Organisations Pelliculaires Superficielles.

Mes collègues de la Station de science du sol d'Avignon m'ont toujours accueilli chaleureusement. Patrick LEROY, mathématicien et voisin de palier, m'a amicalement aidé à résoudre certains problèmes qui dépassaient ma compétence, de même que Jean ROGER-ESTRADE.

A la base, la collecte et le traitement des données ont été l'oeuvre d'une petite équipe où chacun a joué un rôle avec enthousiasme et ténacité. Cyrille BARRIER a été mon compagnon de terrain et son ardeur ne s'est démentie ni sous les pluies battantes, ni au clavier de la calculatrice. Madame DEUDE a assuré avec soin et dynamisme pesées, mesures et mise en forme des données. Jacqueline DECOIN a réalisé avec habileté la plupart des tests et manipulations sur lesquels s'appuie la partie la plus analytique du travail. A ce noyau se sont adjoints différents concours plus occasionnels mais néanmoins précieux. Ainsi plusieurs étudiants de 3ème année de l'INA P-G ont été associés à ce travail et y ont apporté leur pierre : Brigitte CADENEL, Martial FREYSSINAUD MAS de FEIX ; puis Clément AUDIGE, Genviève DUPE et Jean-Philippe BOUSQUET qui a joué un rôle particulièrement important en prolongeant sa participation.

Les traitements informatiques ont été réalisés grâce à l'intervention compétente de Bruno CANEILL, et la plupart des figures réalisées par Alain PELLERIN.

Les clichés ont été tirés et développés avec diligence par MM. VALLEE et BOSSE.

Je n'oublie pas les "gens de terrain": MM. ESCHENBRENNER et MARQUES à Palaiseau, GASNIER et G. LASSUS à Montluel, qui nous ont accueillis et aidés avec gentillesse et efficacité ; sans eux les dispositifs n'auraient pu être implantés.

Enfin, dans la phase finale j'ai bénéficié d'une équipe de dactylographes exceptionnellement efficace, et j'ai apprécié la compétence et la gentillesse du service de reprographie de l'INA P-G. Je n'oublierai pas le soutien chaleureux et lui aussi combien efficace d'Anne EYRAL.

Financièrement, le travail a été soutenu par l'ex comité ECAR de la DGRST, dans le cadre du programme "fertilité et systèmes de production en région de grande culture" piloté par M. SEBILLOTTE.

SOMMAIRE GENERAL

(Les plans détaillés de chacune des parties figurent au début de chacune d'elles)

	<u>PAGE</u>
<u>INTRODUCTION</u>	1
1) - SITUATION DU PROBLEME	3
2) - DEFINITION DE L'OBJET D'ETUDE	6
3) - LES PRINCIPAUX DOMAINES DE CONNAISSANCE CONCERNES	9
4) - LE TRAVAIL ENTREPRIS	16
<u>PREMIERE PARTIE : LE PHENOMENE : DESCRIPTION, METHODES D'ETUDE</u>	18
1) - PRINCIPAUX TRAITES DE L'EVOLUTION DU SOL SOUS L'EFFET DES PLUIES	23
2) - ELABORATION D'UNE DEMARCHE EXPERIMENTALE	71
<u>DEUXIEME PARTIE : LES PROCESSUS INTERVENANT DANS LE DEROULE- MENT DE LA DEGRADATION</u>	109
1) - LA REDISTRIBUTION SPATIALE DU MATERIAU A LA SURFACE DU SOL ET SES PRINCIPAUX FACTEURS	113
2) - RELATIONS ENTRE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE DU SOL ET LA REDISTRIBUTION SPATIALE DU MATERIAU	153
3) - LA REORGANISATION VERTICALE DES COUCHES SUPERFICIELLES	203
<u>TROISIEME PARTIE : ETUDE DES MODALITES DE DIVISION DES FRAGMENTS TERREUX</u>	225
1) - MISE EN EVIDENCE DE L'INTERVENTION DE DIFFERENTES MODALITES ..	226
2) - ETUDE DES MODALITES DE LA DESAGREGATION	236
<u>QUATRIEME PARTIE : SYNTHESE ET ELEMENTS DE MODELISATION</u> ...	262
1) - DEROULEMENT ET PROCESSUS DE LA DEGRADATION STRUCTURALE	263
2) - ELEMENTS DE MODELISATION	275
<u>CONCLUSION GENERALE</u>	287
<u>BIBLIOGRAPHIE</u>	298
<u>LISTE DES TABLEAUX</u>	311
<u>LISTE DES FIGURES</u>	315
<u>INDEX DES RELATIONS, CODES ET SYMBOLES UTILISES</u>	319

NB : Les planches photographiques font partie du Tome d'ANNEXES .

INTRODUCTION GÉNÉRALE

P L A N

	<u>PAGE</u>
1 - <u>SITUATION DU PROBLEME</u>	3
2 - <u>DEFINITION DE L'OBJET D'ETUDE</u>	6
3 - <u>LES PRINCIPAUX DOMAINES DE CONNAISSANCE CONCERNES</u> .	9
1°/ - <u>Etude des modifications de l'état structural du sol sous l'action des pluies et de ses conséquences directes</u>	9 9
2°/ - <u>Données relatives aux mécanismes de l'évolu- tion structurale</u>	12
3°/ - <u>Données relatives à l'érosion hydrique</u>	14
4°/ - <u>Conclusion</u>	15
4 - <u>LE TRAVAIL ENTREPRIS</u>	16

1 - SITUATION DU PROBLEME

Les couches du sol situées au voisinage immédiat de l'atmosphère sont le siège de relations déterminantes entre le peuplement cultivé et son environnement physique, édaphique et biologique. Elles sont donc au centre de l'activité de diagnostic des agronomes. A cet égard, un des instruments d'appréhension du milieu physique les plus utiles est le concept de structure, entendu dans son acception la plus générale de "manière dont sont assemblés les divers constituants du sol" (HENIN, 1976). En effet, cet assemblage et ses conséquences directes (formes et taille des fragments terreux, porosité et cohésion à différents niveaux d'organisation) déterminent dans une large mesure la façon dont sont accomplies les fonctions physiques du sol vis-à-vis de l'implantation, de la croissance et de la conduite des cultures.

Or, de par leur position, ces couches superficielles sont perpétuellement soumises à diverses perturbations, volontaires ou non, en partie aléatoires, souvent discontinues dans l'espace et le temps.

L'agronome doit donc disposer non seulement de moyens de caractérisation instantanée adaptés à la très forte hétérogénéité latérale qui résulte de ces remaniements (MANICHON, 1982) mais aussi de moyens d'analyse et de prévision de l'évolution de l'état structural, celle-ci devant être envisagée au champ et à différentes échelles de temps. On mesure d'emblée la difficulté de satisfaire un tel besoin, compte tenu du caractère contingent et infiniment varié des modalités d'interaction entre les différents facteurs et conditions de remaniement qui interviennent dans le milieu cultivé.

C'est à partir de la notion de comportement structural (HENIN et al., 1960) que l'on peut tenter d'organiser les connaissances et les données imbriquées dans cet ensemble à première vue très complexe.

Cet terme désigne de façon générale un certain type de modification de l'assemblage des constituants du sol, caractérisé par le sens d'évolution des principaux paramètres de l'état structural, la nature de l'agent qui provoque cette modification, et, dans les cas où cette précision est nécessaire, par la localisation de ce changement d'état dans le profil.

Lorsque le sol passe d'un état fragmentaire, poreux et meuble à un état plus continu, plus compact et cohérent, on parle couramment de dégradation de la structure, car cette modification se traduit par une évolution des caractéristiques de fonctionnement du sol plutôt défavorable pour

l'activité agricole : baisse de la conductivité des couches superficielles pour l'eau et les gaz, augmentation d'albedo et de la capacité calorifique et donc diminution de la vitesse de réchauffement du sol, constitution d'obstacles à la croissance des racines, à la germination et à la levée des plantes. La dégradation de la structure du sol résulte selon les cas :

- des actions de compactage exercées par les pneumatiques ou les pièces travaillantes,
- des diverses actions, notamment de désagrégation, exercées par les pluies. On parle alors de battance pour désigner l'ensemble des manifestations de dégradation affectant la surface du sol, et de prise en masse pour désigner celles qui se produisent au sein du profil.

C'est à ce deuxième aspect qu'est consacré notre travail. Il vise une compréhension, débouchant sur des éléments de modélisation, de l'évolution de l'état structural des couches superficielles sous l'action des pluies, dans la gamme des situations où cette évolution peut être qualifiée de dégradation.

Une telle entreprise se justifie, à la fois par la gravité des répercussions de ce comportement structural pour la production agricole et l'environnement, et par son caractère difficilement contrôlable dans les conditions courantes de la pratique agricole.

Trois types de répercussions prédominent :

- le ruissellement. Consécutif à la réduction des flux d'infiltration des pluies, il peut provoquer l'érosion si le terrain est en pente, à l'intérieur même ou en aval des parcelles où il prend naissance. Il en résulte alors un entraînement des éléments fertilisants et de produits de traitements apportés en couverture, ce qui constitue non seulement une perte pour les agriculteurs mais aussi une cause de pollution des zones réceptrices.
- la reprise en masse des états fragmentaires créés par les opérations de travail du sol, qui peut obliger l'agriculteur à refaire telle ou telle de ces opérations.
- la mauvaise implantation des cultures. Si la dégradation structurale du lit de semence se produit rapidement après le semis, elle peut compromettre la germination, la levée et le début de croissance de la culture. Les différentes espèces cultivées sont plus ou moins sensibles tant à la dégradation elle-même qu'à une densité de peuplement faible et irrégulière. Dans les cas extrêmes, l'agriculteur est contraint de réaliser une nouvelle implantation.

Pour certaines cultures comme le colza ou la betterave sucrière, la fréquence de cet accident à l'échelle nationale n'est pas négligeable⁽¹⁾. Dans des situations particulièrement propices à la battance, elle est si élevée que le problème de la dégradation structurale est au premier rang des préoccupations des agriculteurs⁽²⁾.

Dans ces trois cas, on comprendra aisément que pour évaluer la gravité des conséquences de la dégradation structurale, il faut prendre en considération non seulement son amplitude, mais aussi la rapidité avec laquelle elle se produit à la suite de la dernière opération de travail du sol (souvent constituée par le passage de semoir lui-même). C'est donc bien la dynamique du phénomène qui nous intéresse, dynamique dont on doit tirer des indications (si possible prévisionnelles) de vitesse. Or, cette dynamique présente une importante variabilité. Tout d'abord les modifications de l'état structural par les pluies ne sont perçues comme systématiquement défavorables par les agriculteurs que dans les "terres battantes". Celles-ci correspondent en général à des sols dont la texture de surface est à dominante limoneuse et dont la teneur en argile est inférieure à 25 %, auxquels s'ajoutent les terrains sodiques. En France, elles couvrent de l'ordre de 25 % des terres labourables et se répartissent dans l'ensemble des zones de grandes cultures notamment dans celles qui ont été marquées au quaternaire par les dépôts éoliens. Au sein de cet ensemble, le caractère battant est lui-même plus ou moins intense, en relation avec les variations de la teneur en argile, du statut organique, de la composition ionique et du régime hydrique du sol. En outre, beaucoup d'agriculteurs soulignent que le degré de fragmentation des couches superficielles du sol a une influence considérable sur la dégradation structurale, celle-ci étant d'autant plus rapide pour un climat donné, que l'affinement est plus poussé.

Quoiqu'il en soit, en un site donné c'est toujours le climat qui est le facteur prépondérant de variabilité de la dégradation structurale : celle-ci est avant tout commandée par la répartition chronologique des pluies et de leurs caractéristiques dont chacun connaît l'extrême irrégularité. Pour l'agriculteur, battance et prise en masse sont avant tout des risques, que ni lui

(1) De 1971 à 1979 pour les 23 départements français produisant plus de 5000 ha de colza, nous avons recensé 38 cas (soit 18 %) où plus de 20 % des surfaces emblavées en colza avaient dû être retournées. Les informations disponibles suggèrent que la moitié environ de ces cas sont imputables plus ou moins directement à la battance (BOIFFIN, POUZET, ROLLIER, 1980).

(2) Cette perception est particulièrement aigüe dans certaines zones betteravières du Nord du Bassin Parisien. Dans la région des Dombes, nous avons enregistré des fréquences respectivement de l'ordre de 30 % et de 15 % des semis de colza et maïs pour lesquels la battance avait engendré une forte réduction du taux de levée, la resemis étant le plus souvent nécessaire (BOIFFIN, SEBILLOTTE, DUBY, 1975 ; BOIFFIN et al, 1981).

ni aucun expert ne savent vraiment évaluer (1).

Selon une règle d'analyse commune à tous les comportements structuraux du sol (BOIFFIN et MONNIER 1982), on voit donc se dégager le rôle de trois principaux groupes de facteurs et conditions qui contrôlent la dynamique de la dégradation structurale :

- l'agent externe (les précipitations dans le cas étudié) et ses caractéristiques ;
- l'état initial du sol (ici l'état structural existant avant une période pluvieuse) ;
- les propriétés physiques des matériaux, qui dépendent de leur constitution, et de leur état hydrique au moment où l'agent intervient.

2 - DEFINITION DE L'OBJET D'ETUDE

A partir des considérations précédentes on peut construire un premier graphe du phénomène (Fig. 1).

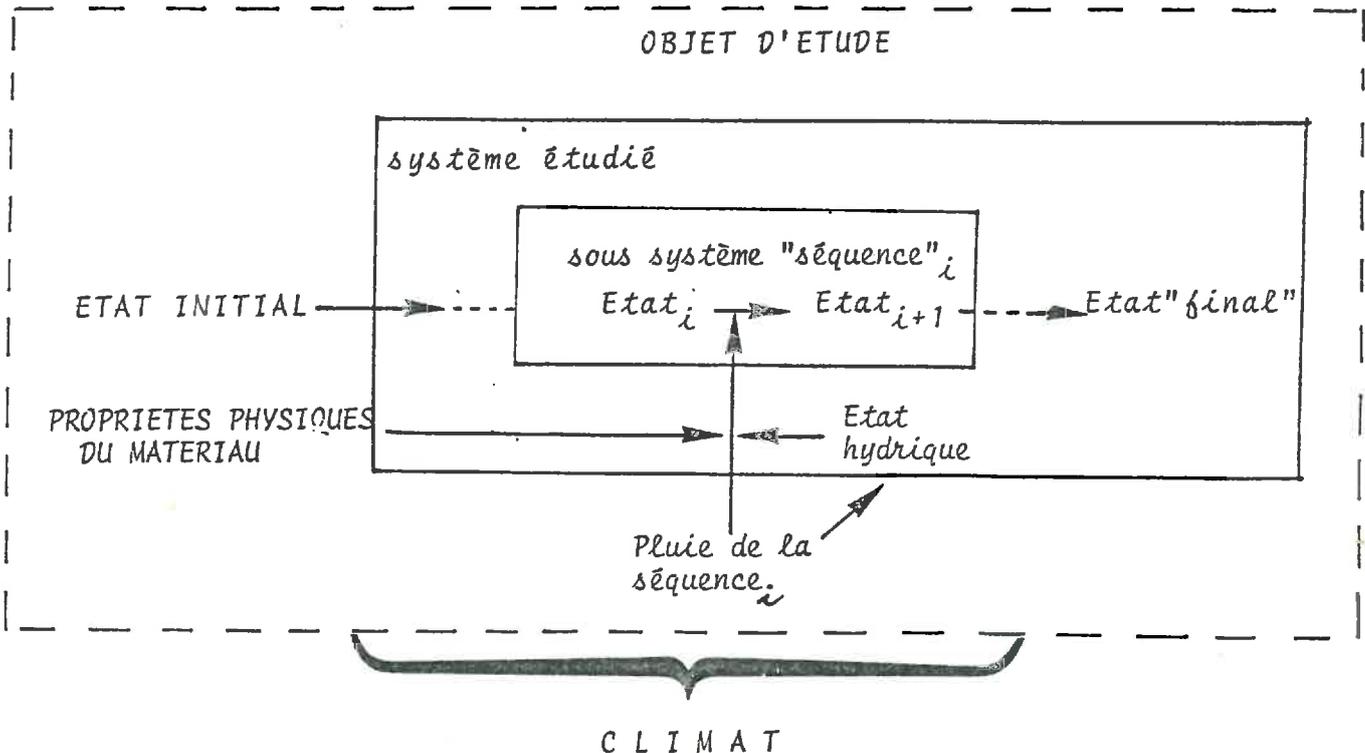


Fig.1. - Graphe de la dégradation structurale

(1) Incertitude dont témoigne la diversité des techniques de préparation des lits de semence dans les régions où le problème se pose (MANICHON, SEBILLOTTE, 1975).

Le système étudié sera la succession des états structuraux de la couche superficielle qui subit l'action des pluies. L'état initial considéré est fragmentaire, on se situe en l'absence de végétation et de toute intervention culturale entre le début et la fin de l'étude.

L'objet d'étude comportera non seulement l'histoire de ces états successifs, mais aussi les modalités de passage d'un état à l'autre : outre le système étudié, il inclut les processus, pour l'instant hypothétiques qui le relie aux variables d'entrée figurées à la périphérie du graphe (1).

Il convient par ailleurs de préciser les limites du système étudié.

a) - Limites spatiales

- Latéralement, ce système est nécessairement une portion de surface et non tel ou tel motif ou micro-site isolé. Ceci tient d'abord à la répartition spatiale diffuse de la pluie, mais aussi à la très forte micro-hétérogénéité⁽²⁾ de l'état structural des couches superficielles résultant d'un passage d'outil. En effet, celle-ci a pour conséquence :

. d'une part que l'évolution microlocale est très variable (puisque l'état initial est lui-même très variable). Ce n'est qu'en élargissant le champ de perception que l'on peut saisir une évolution caractéristique d'un terrain face à celle d'un autre terrain. La plus petite surface correspondant à ce niveau de perception est telle que les différents états initiaux y soient représentés avec une extension relative voisine de celle rencontrée au niveau de l'ensemble du terrain que l'on veut caractériser. Ceci est généralement obtenu en délimitant des stations d'ordre de grandeur métrique, correctement localisées par rapport aux hétérogénéités d'allure périodique créées par les travaux agricoles.

. d'autre part qu'il y a interdépendance dans l'évolution de micro-sites plus ou moins éloignés, mais correspondant à une altitude (donc à une énergie potentielle) différente. Les relations les plus évidentes concernent donc les transferts d'eau et de terre à la surface du sol mais on peut aussi facilement percevoir d'autres types de relations, comme par exemple de protection par rapport aux pluies ou

(1) Les termes "système étudié" et "objet d'étude" sont utilisés dans l'acception proposée par SEBILLOTTE (1981) à propos des expérimentations et des enquêtes agronomiques.

(2) Le préfixe micro s'appliquera à des objets ou des caractéristiques que l'on peut individualiser à un niveau de perception centimétrique voire même millimétrique dans le cas d'un état initial affiné.

d'interaction dans l'histoire hydrique. Pour appréhender toutes ces interactions, il faut que tous les éléments du système, en l'occurrence les différents types de microsites interdépendants, soient inclus dans le champ d'observation. Pratiquement ceci revient à considérer la plus petite portion de surface dont les échanges de terre et d'eau avec son environnement soient négligeables, du début à la fin de la dégradation structurale, par rapport aux mouvements internes. Sur un terrain en pente ceci nous entraînerait à observer de très grandes surfaces ; sur un terrain plat les dimensions convenables sont, là encore, d'ordre de grandeur métrique.

- Verticalement, la limite inférieure du système étudié est plus difficile à définir. En toute rigueur, il devrait s'agir de la plus profonde des deux limites suivantes :
 - . soit la discontinuité structurale la plus profonde ayant un rôle vis-à-vis du régime hydrique des couches de surface ;
 - . soit la limite inférieure des transferts verticaux de matière solide en provenance de ces couches superficielles.

Si nous avons étudié le phénomène de dégradation structurale dans une optique pédogénétique, nous aurions dû respecter cette contrainte. Privilégiant la modification des états des couches d'interface, nous travaillons à des échelles de temps (délais de quelques mois) pour lesquels les transferts de matériaux à grande profondeur sont quantitativement très faibles et ont en eux-mêmes une influence négligeable sur l'évolution des couches superficielles. D'un point de vue pratique la limite inférieure recherchée sera donc la surface subhorizontale à partir de laquelle aucune modification de l'arrangement des constituants du sol ne peut être décelée avec les moyens d'observation mis en oeuvre. Il s'agira généralement de la discontinuité entre une couche superficielle plus ou moins meuble et une couche adjacente rigide, créée par le passage d'une pièce travaillante

b) - Limites chronologiques

Conformément au graphe de la Fig. 1, nous envisageons l'évolution de l'état structural des couches superficielles comme un enchaînement de séquences interdépendantes. Mais c'est bien à l'ensemble de l'histoire que correspond le système étudié. Le point de départ de cette histoire est l'instant qui suit la dernière action de fragmentation ou de tri (généralement par l'intermédiaire d'une opération de travail du sol) ; le point d'arrivée est théoriquement le remaniement suivant, et pratiquement le moment à partir duquel le phénomène de dégradation cesse de devenir perceptible, le sol ayant atteint un état d'équilibre (généralement pseudo stable ou instable comme nous le verrons par la suite).

c) - Sous-systèmes

La réponse du système ainsi délimité aux facteurs et conditions qui sont supposés régir son fonctionnement, ne peut être étudiée sans considérer certains sous ensembles, appréhendés à des niveaux de perception plus fins.

Dans l'espace, on sera amené à distinguer et à décrire séparément différents micro-sites ou différentes couches. Dans le temps, l'analyse de l'effet des pluies ne pourra être réalisée que si on distingue certaines séquences pluviueuses. Le terme de séquence désigne ici un groupe d'épisodes pluvieux plus ou moins espacés les uns des autres mais successifs, qui se produisent entre deux dates d'observation du sol. Il nous arrivera parfois de devoir individualiser l'épisode pluvieux, groupe de précipitations consécutives et homogènes se produisant entre deux changements d'intensité pluviométrique, ou la pluie, groupe d'épisodes pluvieux consécutifs situés entre deux périodes sans précipitations.

3 - LES PRINCIPAUX DOMAINES DE CONNAISSANCE CONCERNES

Cette première étape bibliographique vise avant tout à cerner les contours du travail expérimental à entreprendre, et à dégager les principales notions sur lesquelles il peut s'appuyer, les travaux cités n'étant présentés et discutés en détail que par la suite en relation directe avec nos propres résultats expérimentaux.

1° - Etude des modifications de l'état structural du sol sous l'action des pluies et de ses conséquences directes

La première constatation qui s'impose est que le comportement global des couches superficielles du sol au champ a été relativement peu étudié. L'orientation la plus courante est l'étude de certains traits morphologiques typiques de l'action des pluies sur le sol : les "croûtes de battance", terme couramment utilisé mais qui ne constitue qu'une acception particulière du vocable plus général d'organisations pelliculaires superficielles (O.P.S.) (VALENTIN, 1981).

a) - Caractérisation des O.P.S.

On peut distinguer deux types d'approches parfois associés :

- la description morphologique (DULEY, 1939 ; Mc INTYRE, 1958 ; EVANS et BUOL, 1968 ; CHEN et al., 1980 ; VALENTIN, 1981 ; MUCHER et al., 1981). Elle utilise

les diverses techniques et méthodes de la micromorphologie, l'essentiel des observations étant réalisées à des grossissements relativement faibles (10 à 30 fois) qui permettent de garder une vue d'ensemble de ces organisations. Les résultats sont assez concordants: au cours des premiers stades de formation des O.P.S., et ultérieurement dans les zones de départ de terre le trait dominant est l'apparition à la surface de microhorizons continus de même composition que les horizons sous-jacents. Ce type d'O.P.S. reçoit selon les auteurs différentes appellations, par exemple O.P.S. de désagrégation (VALENTIN) ou croûte structurale (CHEN et al.). Par la suite dans les zones de dépôts apparaissent des O.P.S. de type sédimentaire, qui donnent au terrain son aspect "glacé", caractéristique des terres battantes.

- la quantification de certaines caractéristiques de fonctionnement physique étroitement liées à l'état structural et concernant principalement :

- . les propriétés mécaniques (GOYAL et al., 1979).

Les mesures les plus fréquemment pratiquées sont celles de la résistance à la pénétration d'une aiguille (CANARACHE, 1965 ; EL HABIB, 1980 ; VALENTIN, 1981). Les résultats dépendent au premier chef de l'humidité du sol (BUSCH et al., 1973 ; SHARMA et AGRAWAL, 1978). Malgré son intérêt pour la prédiction de l'émergence des plantules (ARNDT, 1965 a et b; HOLDER et B 1974 ; GOYAL et al., 1980), nous avons renoncé à utiliser cette procédure car l'état de la surface du sol doit être caractérisé par une courbe de cohésion en fonction de l'humidité dont l'obtention et la comparaison avec celles correspondant à d'autres états exige un très grand nombre d'échantillons et de mesures.

- . Le régime d'infiltration de l'eau.

La plupart des travaux sur ce thème consistent à adapter les lois générales de l'écoulement aux conditions particulières des milieux stratifiés (HILLEL, 1964, 1980). Les O.P.S. sont alors caractérisées de façon abstraite par deux principaux paramètres : épaisseur et conductivité hydraulique en régime saturé (dont le quotient est la résistance hydraulique). Les relations entre ces paramètres et la morphologie des O.P.S. sont rarement étudiées (Mc INTYRE, 1958 ; VALENTIN, 1981). Or, les interrelations entre le processus de formation des O.P.S. et le régime hydrique de surface constituent vraisemblablement un aspect important du phénomène, raison du rôle joué par l'eau libre dans les principaux mécanismes de la dégradation structurale.

b) - Etude de leurs processus de formation

Elle est pratiquement toujours abordée par voie expérimentale, sous pluies artificielles et le plus souvent en laboratoire (EPSTEIN et GRANT, 1967, 1973 ; FARRÉS, 1978 ; LUK, 1979 ; Mc INTYRE, 1958 ; TACKETT et PEARSON, 1965), plus rarement en petites parcelles expérimentales (EL HABIB, 1980 ; VALENTIN, 1981).

Les facteurs de variation étudiés sont avant tout les caractéristiques de la pluie (intensité, vitesse et forme des gouttes) et la constitution des matériaux, beaucoup plus rarement l'état hydrique du sol (COLLIS GEORGE et al., 1971) et la dimension des fragments de terre (FARRÉS, 1978). Le souci d'un contrôle très étroit des conditions expérimentales se traduit par une artificialisation assez arbitraire qui compromet la transposition au champ des conclusions : les simulateurs de pluie sont utilisés à des intensités généralement très élevées (plusieurs dizaines de mm/h) ; les échantillons de sol sont remaniés, et calibrés à des dimensions relativement fines (le plus souvent quelques mm) ; ils sont généralement soumis aux pluies à l'état sec au départ et sont ensuite rapidement et constamment saturés ; enfin, la surface de l'échantillon est le plus souvent faible (au plus quelques centaines de cm²) et ne peut être considérée que comme une entité homogène. Dans ces conditions, le scénario expérimental le plus courant est une dégradation initiale très brutale qui aboutit en quelques dizaines de minutes à un système figé à partir duquel les seules données à enregistrer sont des transferts d'eau et de terre. Il ne correspond donc guère aux formes de dégradation, à la fois plus lentes et, au bout du compte, plus poussées qu'on peut observer in situ sous climat tempéré.

A vrai dire, ces travaux se situent d'ailleurs le plus souvent aux frontières du domaine de l'érosion ; la critique des conditions expérimentales est abordée par leurs auteurs, mais principalement sous l'angle du réalisme de la simulation des pluies (HALL, 1970 ; VALENTIN, 1979).

c) - Etude du comportement global

Le travail qui se rapproche incontestablement le plus de cet objectif est celui, déjà cité, de VALENTIN, dont l'intérêt majeur est d'associer différentes modalités de caractérisation des états créés, et de les mettre en oeuvre au cours du processus de formation des O.P.S. Celui-ci est d'ailleurs obtenu dans des conditions expérimentales beaucoup moins caricaturales que celles qui viennent d'être décrites. L'auteur est donc en mesure de dégager une interprétation explicative de la formation des O.P.S. naturelles et une analyse de leurs principales conséquences physiques. Cependant, l'échelle d'appréhension privilégiée est celle du microsite (l'auteur ne transpose pas explicitement ses

résultats au niveau de la surface), et l'analyse des modalités de passage d'un état à l'autre reste principalement qualitative, ce qui ne permet pas d'envisager la vitesse du phénomène et sa variabilité.

Pour notre part, nous avons réalisé précédemment (BOIFI SEBILLOTTE, 1976), une première ébauche d'analyse du phénomène exclusivement basée sur une description macromorphologique. Celle-ci nous avait montré l'ampleur de la gradation provoquée par les pluies, son caractère progressif et séquentiel, la répétabilité de la succession des traits morphologiques enregistrés, et nous avait permis de mesurer l'influence du statut organique du sol. Les résultats obtenus nous ont incité à renouveler ce type de proche, basée sur un suivi en conditions naturelles, mais en lui associant des méthodes beaucoup plus fines de caractérisation de l'état du sol et des pluies.

2° - Données relatives aux mécanismes de l'évolution structurale

Elles ne concernent pas directement les modifications d'état du sol observables in situ, mais certains des processus élémentaires qui se combinent pour aboutir à un comportement structural. Les actions que subit le sol peuvent être répertoriées dans trois catégories (MONNIER, STENGEL, GUERIF, 1981) : actions de désagrégation, de compactage, de fragmentation. Vis-à-vis de la dégradation de l'état structural par les pluies, on accorde généralement un rôle privilégié à la désagrégation intervenant lors d'une humectation rapide des fragments terreux (HENIN et al., 1960).

a) - Mécanismes de la désagrégation

Le phénomène principal serait l'éclatement des fragments (YODER, 1936 ; HENIN, 1938 ; EMERSON, 1967 ; KEMPER, 1965 ; FARF 1980) lui-même consécutif à la conjonction de deux effets de l'humectation :

- la compression de l'atmosphère interne par les ménisques liquides pénétrant dans les pores. Les forces ainsi développées sont d'autant plus importantes que le volume d'air emprisonné est plus important et, relativement au volume de fragment, ce qui fait intervenir la vitesse de pénétration des ménisques (CONCARET, 1967) et les dimensions du fragment ; et
- (b) que la pression capillaire s'exerçant au niveau des ménisques est plus importante. Ces deux aspects mettent en cause la mouillabilité des parois des pores et la dimension de ceux-ci.

- . la diminution de cohésion des assemblages terreux, due à des modifications plus ou moins poussées de la microorganisation des argiles, se traduisant par le gonflement, ou même, dans des conditions extrêmes, par la dispersion.

Des preuves indiscutables de la réalité de ce schéma théorique ont été apportées. La question reste cependant posée de savoir quelle part il prend dans la dégradation au champ, c'est-à-dire dans des conditions de mise en contact de l'eau et des fragments terreux très variables mais généralement beaucoup plus progressives que celles qui ont été utilisées dans ces travaux.

b) - Notion de stabilité structurale, tests d'évaluation

Ce terme désigne la résistance qu'oppose un matériau donné à la désagrégation par l'eau. Elle met en cause une combinaison assez complexe de propriétés. Plutôt que d'évaluer séparément celles-ci, il est beaucoup plus réaliste de caractériser le sol par une résultante qui traduit son comportement dans des conditions d'humectation standardisées. Cette méthode de caractérisation par tests est universellement employée, mais avec des nuances importantes. Les auteurs de langue anglaise réalisent ces tests sur des échantillons de sol non ou peu remaniés. Ils déterminent ainsi des taux d'agrégats stables qui traduisent pour une part l'état initial de l'échantillon. Cette conception est basée sur une notion d'agrégat stable préexistant et caractéristique du sol (YODER, 1936 ; QUIRK, 1950 ; DE LEENHEER et de BOOD 1954 ; EMERSON, 1967 ; GREENLAND, 1971 ; HAMBLIN, 1977).

En France, au contraire, les tests ont été conçus de telle manière que les résultats obtenus soient aussi indépendant que possible de l'état du sol lors du prélèvement des échantillons, et que leurs variations puissent être imputées essentiellement à celles de la constitution des matériaux. On peut alors parler de comportement intrinsèque. Deux types de tests ont été mis au point (HENIN et al., 1955 ; HENIN et MONNIER, 1956) : le test d'analyse d'agrégats (indice I_s) et le test de percolation en milieu concentré (indice K). Leurs résultats sont bien corrélés et classent les sols de manière concordante avec les observations de terrain, ce qui va à l'appui de la notion de comportement intrinsèque ; sous jaçants à différentes modalités d'agression, ce sont bien les mêmes mécanismes qui s'expriment.

Dans le cas du test d'analyse d'agrégats, l'action de l'eau est modulée par différents prétraitements qui mettent en valeur soit les variations de cohésion de terre humide (prétraitement alcool), soit les variations de mouillabilité liées à la teneur en matière organique (prétraitement benzène). Par ailleurs, le test de percolation discrimine particulièrement bien les matériaux différant par la composition

ionique. L'ensemble de ces procédures a donc permis d'étudier le rôle des différents facteurs de constitution de micro-organisation des matériaux du sol, ce qui était l'objectif principal des auteurs de ces méthodes : composition granulométrique (KHEYRABI et MONNIER, 1968 ; FIES, 1970), statut organique (MONNIER, 1965), composition ionique (BURGEVIN et HENIN, 1939 ; MERIAUX, 1958, 1961), histoire hydrique du sol (MONNIER et KONAN, 1968 ; SEBILLOTTE, 1968 ; BOIFFIN, 1976). Les indicateurs de comportement intrinsèque que constituent les différents résultats de ces tests peuvent être considérés comme de bons critères de fertilité physique (MONNIER, STENGEL, GUERIF, 1981 ; BOIFFIN et MONNIER, 1982), permettant de classer des situations différenciant par la nature du sol et l'histoire culturale. Pour autant, ils ne constituent pas en eux-mêmes de véritables prédicteurs du comportement in situ.

3° - Données relatives à l'érosion hydrique

L'objet des travaux concernant l'érosion ne coïncide pas avec le nôtre puisque les variables privilégiées ne sont pas les changements d'état du sol mais les quantités de terre et d'eau qui sont exportées hors d'un certain domaine spatial. Cependant, les principales variables d'entrée sont à priori les mêmes (FOURNIER, 1960 ; FEODOROFF, 1965), et certains processus sont nécessairement identiques. De ce fait, la partie analytique de la vaste littérature sur l'érosion hydrique constitue un gisement d'informations très important vis-à-vis du sujet. Réciproquement, les spécialistes de l'érosion considèrent depuis longtemps que la dégradation de l'état structural de la surface du sol est la première étape de l'érosion hydrique puisqu'elle conditionne l'apparition du ruissellement (ELLIS, 1947). Cependant, sa brièveté dans des conditions naturelles de pluie violente (et, on l'a vu, dans la plupart des expériences avec pluies simulées) fait que la plupart du temps cette étape initiale n'est pas analysée en tant que telle et constitue une "boîte noire". Quoi qu'il en soit, sur trois thèmes principaux, ces travaux apportent une contribution précieuse à notre objet d'étude.

a) - Analyse de l'effet érosif des pluies

Cette rubrique comporte principalement :

- une caractérisation physique des pluies, débouchant notamment sur des moyens d'estimation de leur énergie cinétique (LAWS 1941, LAWS et PARSONS, 1943 ; MIHARA 1951 ; SMITH et WISCHMEIER, 1957, 1962 ; FREE, 1966 ; HUDSON, 1981 ; GHADIRI et PAYNE, 1981), et la mise au point d'indices globaux permettant de caractériser l'érosivité d'une séquence climatique donnée.

- Une analyse des effets de l'impact des gouttes. L'un des aspects les plus importants est le phénomène de rejaillissement ("splash") de particules solides, détachées et projetées à des distances pouvant atteindre plusieurs dizaines de centimètres (ELLISON, 1944 ; EKERN, 1950 ; ROSE, 1959 ; KINNELL, 1982 ; SAVAT et POESEN, 1981).

b) - Analyse de l'érodibilité du sol et mise en évidence de ses relations avec différents facteurs de constitution ou d'état du sol (WISCHMEIER et MANNERING, 1969 ; DUMAS, 1965 ; BRYAN, 1968 ; de PLOEY, 1980). Globalement les approches relatives à ce thème sont plutôt de type statistique et débouchent parfois sur des conclusions contradictoires. Par exemple les sols les plus résistants aux actions de désagrégation sont considérés par de nombreux auteurs comme étant les moins sensibles à l'érosion (QUANTIN et COMBEAU, 1962 ; BRYAN, 1974), mais des résultats opposés ont été obtenus (EPSTEIN et GRANT, 1967). En fait, il semble nécessaire de ne pas confondre à priori les propriétés ou les combinaisons de propriétés qui déterminent respectivement la sensibilité à l'érosion (on parle parfois de "détachabilité") et la stabilité structurale (FEODOROFF, 1965 ; de PLOEY, 1981).

c) - Etude du ruissellement

Il s'agit de déterminer son importance et sa propre capacité de transport et d'arrachement de terre. Celle-ci dépend de la vitesse d'écoulement et donc des caractéristiques topographiques du terrain, pente et longueur de pente. En dehors des rigoles ou ravines, c'est-à-dire en fait sur la majeure partie des surfaces exposées aux pluies en situation de pente faible ou nulle, la fonction détachement est accomplie par l'impact des gouttes, seule la fonction transport étant assurée par le ruissellement (ELLISON, 1954 ; MEYER et MONKE, 1965 ; KIRKBY, 1980). Nous rediscuterons ce point, capital pour l'objet de l'étude retenu.

4°/ - Conclusion

Ce rapide tour d'horizon bibliographique fait ressortir la diversité des modalités d'appréhension de la dégradation de l'état structural sous l'action des pluies : diversité des moyens de description, des conditions expérimentales, et surtout des échelles spatio-temporelles d'appréhension.

En l'état actuel, les données acquises à chacune de ces échelles ne font appel que de manière très qualitative aux connaissances

acquises à une autre échelle. Au mieux, on vérifie qu'il y a concordance dans les sens de variation enregistrés. La compréhension et la prévision de modification de l'état structural suppose donc que soit réalisé un travail spécifique d'assemblage de ces différents éléments, ce qui suppose au minimum qu'ils aient été réunis sur la même situation expérimentale.

Une telle entreprise n'apparaît pas déraisonnable dans son principe.

En effet, sous-jacente aux différentes manifestations ou processus qui sont privilégiés se dégage une concordance d'ensemble :

- des principaux traits morphologiques enregistrés et de leurs conséquences directes : augmentation générale de compacité, constitution de minces horizons superficiels très continus, diminution de rugosité et de conductivité hydraulique de la surface, augmentation de sa résistance à la pénétration, apparition de symptômes de ségrégation des constituants granulométriques.
- Des sens de variation du phénomène en réponse à différents facteurs ; ces sens de variation correspondent, le plus souvent, à ceux que permet de prévoir le schéma théorique de la désagrégation. Ce dernier semble donc un des éléments de base sur lesquels peut s'appuyer l'analyse toutefois, il n'est sans doute pas le seul.

5 - LE TRAVAIL ENTREPRIS

Un problème préalable se pose : quels sont les objets et les relations permettant de réduire le phénomène à ses processus essentiels, c'est-à-dire quelle est la décomposition du système étudié la plus efficace pour en rendre compte et quelles sont les variables d'entrée et de sortie des sous-systèmes issus de cette décomposition, qu'il est primordial de contrôler et de mesurer ? Ces questions sont momentanément sans réponse puisque l'objet d'étude - histoire des états structuraux engendrés par les pluies sur une portion de terrain - a été très peu abordé en tant que tel.

C'est pour tenter de le résoudre que nous procéderons, dans une première partie, à une étape de description. A partir de quelques situations de sol en place soumis sans protection à des pluies naturelles, nous chercherons à dégager les traits invariants du phénomène et à resituer les symptômes et éléments de description obtenus par différentes approches dans un déroulement général .

Dans un deuxième chapitre de cette première partie, nous nous baserons sur le schéma d'interprétation issu de la description pour élaborer une démarche expérimentale d'analyse du comportement étudié. Pour expliciter les processus qui concourent au phénomène général de dégradation de la structure - autrement dit établir les lois de fonctionnement des principaux sous-systèmes qui auront été distingués -, il faut, en effet, provoquer de manière distincte une variabilité des principaux facteurs de cette dégradation, et contrôler les variables intermédiaires adéquates.

La deuxième partie, basée sur les résultats expérimentaux obtenus grâce à ce protocole, sera consacrée à l'étude des deux groupes du processus sur lesquels repose notre appréhension du phénomène.

L'évolution de l'état structural est par définition une modification des liaisons qui existent entre les particules de terre allant, le cas échéant, jusqu'à une modification de leur répartition spatiale. Le groupe de processus à considérer correspond donc aux relations qui s'établissent entre les modifications structurales observables (et notamment les modifications morphologiques) et les quantités de terre qui sont déplacées par les agents dégradants, à plus ou moins grande distance dans une autre disposition.

Mais il faut, au préalable, examiner les processus qui se situent en amont, c'est-à-dire ceux qui déterminent la quantité de matériau disponible pour la redistribution spatiale, en d'autres termes, les relations qui existent entre les caractères des pluies, les propriétés du sol et la masse (ou le volume) de terre déplacée.

A l'issue de cette deuxième partie, nous serons amené à considérer comme déterminante l'étape initiale de la redistribution de matière solide : la division des fragments terreux. Une troisième partie sera donc consacrée à l'étude des principaux mécanismes de cette division, afin d'évaluer leur importance respective dans la dégradation au champ. C'est en principe grâce à cette troisième partie que doit s'établir la jonction entre l'étude du comportement in situ et les connaissances relatives aux comportements intrinsèques.

Nous avons mentionné dès les premières lignes une perspective d'application agronomique dont découle un objectif de prévision de l'évolution de l'état du sol. Dans une quatrième partie, nous tenterons donc de faire la synthèse des résultats acquis dans une optique de modélisation du comportement du terrain. Cette modélisation, dans sa forme achevée, serait susceptible de différentes utilisations que nous évoquerons. Son élaboration sera aussi l'occasion de tester le caractère plus ou moins complet de notre analyse et de localiser les points où des investigations complémentaires sont à entreprendre.

PREMIÈRE PARTIE :

LE PHÉNOMÈNE : DESCRIPTION, MÉTHODES D'ÉTUDE

P L A N

	<u>PAGE</u>
1 - <u>PRINCIPAUX TRAITES DE L'EVOLUTION DU SOL SOUS L'EFFET DES PLUIES</u>	23
1.1. - <u>Evolution morphologique de la surface</u>	23
1.1.1. - Mise en évidence des principaux symptômes	23
A/ - Etude des faciès de dégradation successifs	
B/ - Conséquences pour les méthodes de description	
1.1.2. - Première analyse de l'évolution morphologique : notion de phase dans la dégradation	30
A/ - Résultats de la description morphologique systématique	
B/ - Discussion et premiers éléments d'interprétation	
1.2. - <u>Evolution structurale au sein du profil</u>	39
1.2.1. - Approche macroscopique	39
A/ - Démarche d'observation	
B/ - Profils culturaux	
C/ - Evolution du volume apparent du sol	
1.2.2. - Approche micromorphologique	44
A/ - Démarche d'observation	
B/ - Dates et localisation des prélèvements	
C/ - Résultats	
D/ - Discussion	
E/ - Conclusion	
1.3. - <u>Evolution du régime d'infiltration</u>	53
1.3.1. - Observations et position du problème	53
A/ - Comportement du sol sous la pluie : observation des flaques	
B/ - Schéma général de l'infiltration	
1.3.2. - Elaboration d'une méthode d'étude du régime d'infiltration	58
A/ - Inconvénients des méthodes usuelles	
B/ - Principe de la méthode retenue	
C/ - Modalités pratiques	
1.3.3. - Résultats et discussions	62
A/ - Forme et variabilité des relations diamètre-débit	
B/ - Première étude des flux d'infiltration sans flaquage	
1.4. - <u>CONCLUSION DE L'APPROCHE DESCRIPTIVE : SCHEMA GENERAL DE DEROULEMENT DU PHENOMENE</u>	68

	<u>PAGE</u>
2 - <u>ELABORATION D'UNE DEMARCHE EXPERIMENTALE</u>	71
2.1. - <u>Principaux facteurs à considérer, conséquences pour les traitements et contrôles expérimentaux</u>	71
2.1.1. - Variables liées au climat	71
A/ - Rôle et caractérisation des pluies	
B/ - Obtention d'une variabilité	
2.1.2. - Propriétés liées à la constitution des matériaux du sol	79
A/ - Rôle et modalités de caractérisation	
B/ - Obtention d'une variabilité	
2.1.3. - Etat initial	85
A/ - Rôle et modalités de caractérisation	
B/ - Obtention d'une variabilité	
2.1.4. - Conclusion : récapitulation des dispositifs réalisés et des gammes de variation obtenues	90
2.2. - <u>Principes et modalités d'analyse du phénomène</u>	93
2.2.1. - Principe de la démarche d'analyse	93
A/ - Décomposition spatiale et chronologique du système étudié	
B/ - Décomposition du phénomène en processus	
2.2.2. - Evaluation des quantités de terre déplacées à la surface du sol	94
A/ - Modalités du déplacement et méthodes courantes d'évaluation	
B/ - Méthode d'évaluation des quantités de terre projetée	
C/ - Méthode d'évaluation des transferts latéraux	
D/ - Conclusion	
2.2.3. - La réorganisation verticale du profil	104
A/ - Principe de caractérisation : analyse des systèmes de porosité	
B/ - Modalités de réalisation	
2.2.4. - Conclusion : récapitulation de l'ensemble des contrôles effectués	107

TABLEAU. 1 - CARACTERISATION SUCCINCTE DES PARCELLES OBSERVEES.

CODE DE LA PARCELLE	SITE et PERIODE D'OBSERVATION	CARACTERES DU SOL			HISTOIRE CULTURALE		ETAT STRUCTURAL INITIAL	CARACTERES DE LA PERIODE D'OBSERVATION			
		ARGILE %	LIMONS TOTAUX %	CARBONE %/oo	SUCCESSION de CULTURES (1)	RESIDUS de RECOLTE		DATE de DEBUT	DATE de FIN	PLUVIOMETRIE TOTALE (mm)	GEL du SOL
I Co	PALAISEAU Automne	20,6	71,9	10,6	Céréales à paille, Maïs, <u>Pomme de terre</u>	enfouis	Fin très motteux	10.11.81	7.04.82	315	3 épisodes de gel
II Ao		18,0	73,2	10,0				id.	id.	id.	id.
PI NI a	MONTLUEL Printemps	12,1	67,8	8,6	Rotation : Maïs - blé Colza - blé	enfouis	plutôt fin	29.04.82	30.06.82	178	0
P26 NI a	MONTLUEL Automne 1	8,1	72,3	8,6	Maïs - blé Colza - blé	enlevés	quelques mottes en surface	10.09.82	13.01.83	563	1 gel en fin de période
P27 NI a		9,2	70,6	10,1	Maïs - blé Colza-blé 4 ans de prairie temporaire	enlevés		id.	id.	id.	id.
P16 N2 b2	MONTLUEL Automne 2	10,9	70,7	8,7	Maïs - blé Colza - blé	enlevés	Fin	12.10.82	id.	434	id.

(1) Le précédent immédiat est souligné.

1 - PRINCIPAUX TRAITES DE L'EVOLUTION DU SOL SOUS L'ACTION DES PLUIES

La démarche dont on vient de présenter les grandes lignes prend pour point de départ une perception globale du phénomène, visant à identifier les manifestations les plus constantes de l'évolution structurale du sol sous l'action des pluies. On peut espérer les détecter à partir d'une gamme assez diversifiée de situations.

Nous ferons donc appel à quelques séries d'observations recueillies au champ, de Novembre 1981 à Janvier 1983, sur deux sites⁽¹⁾ représentatifs de la gamme de "terres battantes" les plus courantes dans le Nord Ouest de l'Europe.

Le premier, observé pendant l'automne-hiver 1981-82, se trouve à PALAISEAU sur le plateau de SACLAY. Il se caractérise par un sol brun lessivé sur limon dont la couche arable contient environ 20 % d'argile.

Le deuxième, observé au printemps puis pendant l'automne 1982, se situe à MONTLUEL sur le plateau de la DOMBES. Il se caractérise par un sol lessivé dégradé à tendance glossique sur limon (VINATIER, 1983), dont la couche arable contient environ 10 % d'argile.

Tous deux présentent une topographie plane à faiblement inclinée et, en hiver, de fréquentes manifestations d'engorgement de la couche labourée. La parcelle observée à Palaiseau a été drainée à la fin du siècle dernier.

Sur ces deux sites⁽¹⁾, des parcelles d'histoire culturale différente, aboutissant à une certaine variabilité de statut organique et d'état structural initial du sol (Tableau 1), sont exposées aux pluies et observées aussi fréquemment que possible.

Trois principaux types de données seront examinées, concernant respectivement :

- les modifications de l'aspect de la surface ;
- les évolutions qui ont lieu au sein du profil ;
- celles du régime d'infiltration de l'eau.

1.1. - EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE

1.1.1. - Mise en évidence des principaux symptômes

- A/ - Existence de faciès de dégradation successifs
Conformément aux considérations développées précédemment, les unités expérimentales

(1) Dont une description analytique détaillée sera donnée au chapitre suivant.

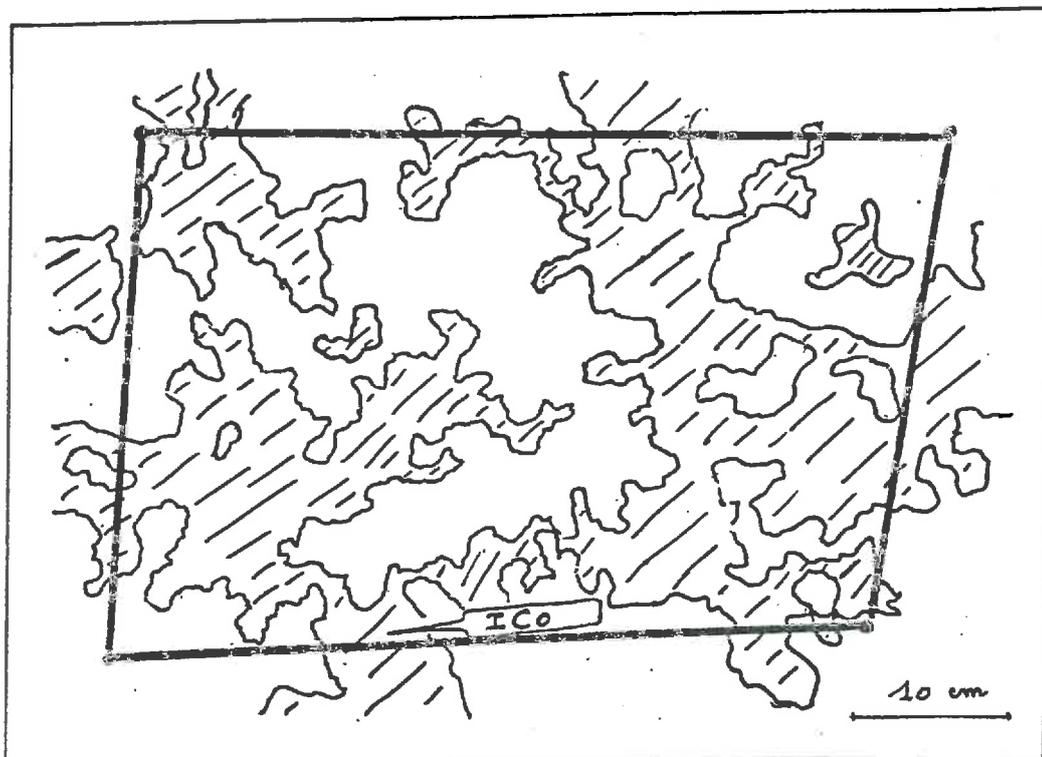


FIG 2a : DELIMITATION DES PLAQUES (SURFACES HACHUREES)
Schéma correspondant au cliché Id.
Le cadre intérieur représente la placette

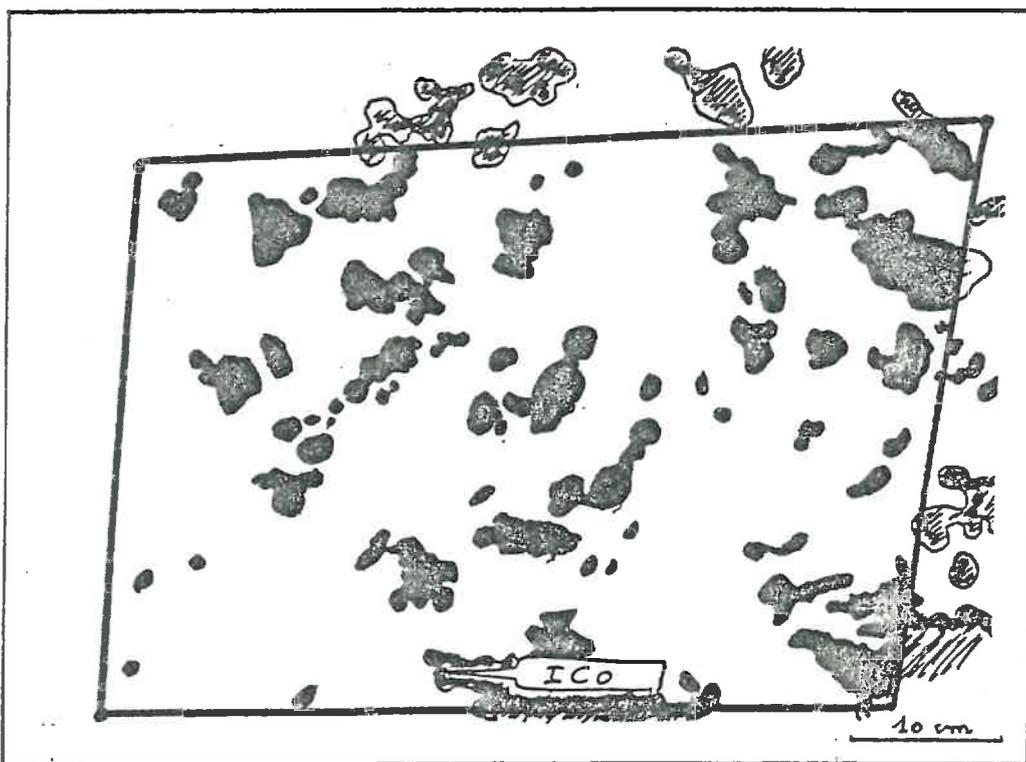


FIG 2b : DELIMITATION DES ZONES DE DEPART (SURFACES FONCEES)
Schéma correspondant au cliché I h
Le cadre intérieur représente la placette

étudiées sont des parcelles de 3 m x 2 m. En leur sein sont délimitées des placettes fixes de 50 x 35 cm², représentatives de l'état initial de la parcelle, ne subissant ensuite aucune perturbation, et sur lesquelles sont réalisées lors de chaque visite, des observations visuelles et photographies. Une sélection de ces clichés est présentée sur les planches I à VI (annexes 1). La succession des photographies a été complètement détaillée pour deux parcelles (respectivement ICo à Palaiseau et 28 N₁ à Montluel).

Observations de terrain et photographies, nous montrent que pour les six parcelles étudiées, l'évolution de l'aspect de la surface du sol correspond à la succession de trois types de faciès :

- un faciès fragmentaire initial (Fo) (cliché Ia). Chaque particule de terre visible en surface appartient à un agglomérat plus ou moins important mais parfaitement délimité et séparé de ses voisins. La proportion de vides observée dans le plan horizontal est importante et ceux-ci constituent un réseau continu. La surface est chaotique et totalement hétérogène, en particulier du point de vue de la dimension des fragments et de leur disposition relative.
- Un faciès fragmentaire altéré F₁ (cliché Id). Certains fragments sont bien distincts et leur forme est très peu modifiée par rapport à l'état Fo, alors que les autres ont plus ou moins complètement disparu, intégrés à des zones d'aspect continu, assez précisément délimitables, que nous appellerons "plaques". La Fig. 2a présente le schéma de localisation de ces différents motifs établi à partir du cliché Id. Ce sont apparemment les fragments les plus grossiers qui restent distincts le plus longtemps, et les plus fins qui disparaissent le plus rapidement, (cette tendance est particulièrement nette si on observe la succession des clichés de Ia à If).

Les vides se présentent sous forme d'un système discontinu mais encore très dense d'orifices plus ou moins anastomosés. La surface reste très rugueuse.

- Un faciès continu F2 (cliché Ih). Pratiquement plus aucun fragment n'est distinct, même les mottes les plus importantes sont bien raccordées à la surface. Réciproquement, ce sont les vides qui sont désormais bien circonscrits ; et le nombre de ces orifices est nettement plus faible que pour le faciès précédent. La surface du sol est beaucoup moins rugueuse. En outre, il apparaît un net contraste (schématisé Fig. 2b) entre deux types de zones : les plus hautes et les plus pentues, qui apparaissent en foncé sur les clichés, présentent des signes de départ de terre : de nombreuses particules grossières,

TABLEAU. 2 .- ILLUSTRATION DES DIFFERENTS FACIES

SITE et PERIODE d'OBSERVATION	PARCELLE	PLANCHE	FACIES, Nos DES CLICHES, (DATES ⁽¹⁾)									
			F ₀	F ₁					F ₂			
PALATSEAU AUTOMNE	I Co	I	a (10-11)	b (19-11)	c (28-11)	d (1-12)	e (8-12)	f (12-12)	g (16-12)	h (4-01)	j (26-01)	l (17-03)
	II Ao	II	a (10-11)	b (8-12)					c (4-01)			
MONTLUEL	PRIN-TEMPS P1 N1a	III	a (30-04)					b (7-06)	c (24-06)			
	AUTOMNE 1 P28 NI a	IV	a (10-09)	b (22-09)			c (28-09)	d (7-10)	e (25-10)	f 1-12	g (13-	
	P27 NI a	V	a (10 ^a 09)						b (28 ^b 09)	c (13 ^c		
	AUTOMNE 2 P16 N2 b2	VI						b (14 ^b 10)	c (25 ^c 10)			

(1) Les dates encadrées correspondent au changement de faciès, soit exactement, soit en l'encadrant.

organiques ou minérales se trouvent en saillie comme si la terre avait été rongée. Au contraire, il semble qu'il y ait accumulation dans les zones planes situées en contrebas des précédentes et les micro-dépressions ; ces zones sont en effet recouvertes d'un manteau très lisse, plus ou moins épais, qui semble principalement constitué de particules élémentaires ; ce sont surtout des limons et sables très fins, qui donnent une teinte très claire à ces zones d'accumulation, mais on trouve aussi (Cliché IVg et Vb) à la surface, des taches foncées constituées d'une fine pellicule argileuse plus ou moins mélangée avec de petits fragments organiques. Dans certains cas encore on voit également des accumulations de petits agrégats dans les dépressions (Cliché IIIc).

Il apparaît que toutes les photographies peuvent être réparties selon ces trois catégories (Tableau 2) et que le passage du faciès F₁ au faciès F₂ peut être assez précisément daté. En outre il semble presque irréversible : il n'y a ensuite de retour à F₁ que dans deux circonstances climatiques accidentelles, susceptibles de provoquer l'apparition de nouvelles discontinuités (ou la réapparition d'anciennes) : le gel (cliché Ii) et une dessiccation très poussée⁽¹⁾ (clichés Ik et Im).

B/ - Conséquences pour les méthodes de description

Elles doivent permettre de discuter et de préciser la perception très globale qui vient d'être présentée. Celle-ci met en cause un certain nombre de rubriques qui doivent faire l'objet d'observations non destructrices.

Ces rubriques, la nature et les caractéristiques de critères qui ont été utilisés pour chacune d'elles, ainsi que les procédures permettant de les saisir, sont récapitulées dans le Tableau 3.

(1) Il est évident que dans le milieu naturel, ces deux "accidents" ne sont pas exceptionnels et jouent donc un rôle très important. Mais dans une optique d'analyse du phénomène, ils représentent avant tout une sorte de remaniement "parasite" qui complique notre tâche. Nous ne leur consacrerons pas une étude spécifique.

TABLEAU 3. - RECAPITULATIF DES METHODES UTILISEES POUR DECRIRE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE.

RUBRIQUE	VARIABLES UTILISEES		PROCEDURE D'OBTENTION	REFERENCE DE PRESENTATION DETAILLEE DE LA PROCEDURE
	NATURE	CARACTERISTIQUES		
EVOLUTION DU CARACTERE FRAGMENTAIRE	1.1. - Terre fine	Note d'état de désagrégation. Calibre des fragments distincts les plus fins Surface relative des "plaques"	Notation visuelle in situ	Annexe 2
	1.2. - Ensemble de la surface.	Quantitative ordonnée (7 classes) Quantitative Quantitative après tri qualitatif	Notation visuelle in situ ou à partir des photos A partir des clichés délimitation visuelle des contours des plaques, puis mesure de leur surface au planimètre	Annexe 2 Annexe 4
	1.2. - Mottés	Note d'état des raccords	Notation visuelle in situ	Annexe 2
EVOLUTION DE LA RUGOSITE	Indices de rugosité Ecart types des cotes de surface	Quantitatives (longueurs et rapports de longueurs) Quantitative (dimension: longueur)	Utilisation d'un aspéromètre (cotation de 156 points à la surface du sol à partir d'une ligne horizontale de référence)	Annexe 3
DESTRUCTION DES ASSEMBLAGES	3.1. - Séparation des constituants élémentaires	Note d'état d'agrégation de la terre fine Note des signes de dispersion	Notation visuelle in situ	Annexe 2
	3.2. - Altération des fragments grossiers	Note d'état des arêtes Note de signes de départ de terre	Notation visuelle in situ	Annexe 2
DEPLACEMENT DE TERRE	4.1. - Symptômes de départ	Cf. supra Mesure de surfaces de départ ou accumulation	idem.	Annexe 2
	4.2. - Symptômes d'accumulation	Notation des formations de dépôts	A partir des clichés délimitation visuelle des contours puis mesure des surfaces au planimètre	Annexe 4
CARACTERISATION SPECIFIQUE DE L'ETAT INITIAL	5.1. - Répartition dimensionnelle des fragments	Répartition pondérale	Notation visuelle in situ	Annexe 2
		Répartition surfacique		
5.2. - Autres caractères		Toutes les variables concernant l'évolution sont saisies au départ	Prélèvements d'échantillons au champ, puis tamisage à sec et pesée Estimation visuelle : au champ, et d'après les photographies, contrôlées par certaines mesures de surface au planimètre	Annexe 2 Annexe 4

Concrètement, les principales opérations réalisées ont été :

- L'observation visuelle systématisée, basée sur l'utilisation d'une fiche qui figure en Annexe 2 ainsi que sa notice d'utilisation. Ce type d'observation concerne principalement l'identification de symptômes qualitatifs et de ce point de vue l'observation d'une seule placette de cette dimension (50 x 35 cm²) est tout à fait suffisante pour caractériser une surface de quelques m² préparée de manière homogène⁽¹⁾.
- Les relevés de cotes à la surface du sol, à l'aide d'un aspérimètre. Les caractéristiques, et les modalités d'utilisation de cet appareil sont détaillés en Annexe 3.

Rappelons brièvement qu'il permet de relever le profil de la surface du sol dans un plan vertical et à partir d'un niveau horizontal de référence. Si la longueur du tracé obtenu est L, celle de sa projection horizontale L₀, l'indice $I_r = \frac{L - L_0}{L_0}$ traduit la sinuosité du tracé indépendamment de L₀ la longueur de l'appareil. L'écart-type des cotes est également un indice de rugosité (il a par exemple été utilisé par DEXTER, 1977), mais il est beaucoup plus influencé par la topographie (notamment par la pente) et son évolution privilégie les points de cote extrême.

La réalisation de 156 mesures sur un tracé rectiligne de 2 m disposé perpendiculairement à l'avancement des outils de préparation du sol s'est avérée suffisante pour bien discriminer des états structuraux initialement différenciés, volontairement ou non (annexe 3-1). Ceci est bien entendu lié à la géométrie et à la nature des outils utilisés et dans d'autres circonstances un nombre plus élevé de mesures peut s'avérer indispensable.

- Le dépouillement de séries de photographies, qui se réalise en 2 étapes :
 - a) - délimitation sur calque, à l'échelle 1 ou 1/3 selon les cas, des contours de zones d'aspect typique ;
 - b) - mesure au planimètre des surfaces ainsi circonscrites, qui sont traduites en proportion de la surface totale de la placette. Le détail de cette procédure

(1) Ce point est discuté en Annexe 2.3. ; sur le site de Montluel ou l'état initial était plus hétérogène en raison de la nature des outils employés, nous avons systématiquement implanté 2 ou 3 placettes.

est présenté en Annexe 4. La nature des zones ainsi cartographiées dépend du type de faciès.

Pour caractériser le faciès F_0 on distingue les surfaces d'après la dimension des motifs qui les recouvrent. Dans ce cas, l'estimation des taux de recouvrement est visuelle. Les conséquences de cette procédure sur la fiabilité et la précision des résultats sont discutées en Annexe 4.2. Nous nous bornerons ici à indiquer que le compromis qu'elle permet d'obtenir entre la qualité et la rapidité de réalisation des mesures nous paraît tout à fait satisfaisant, compte tenu du caractère contrasté des traitements expérimentaux comparés par la suite.

Pour le faciès F_1 , on délimite les plaques précédemment mentionnées. Malgré le caractère en partie subjectif du tracé du contour et la variabilité spatiale de l'état de surface, la répétabilité des mesures au sein d'une zone homogène, pour une même date, est assez satisfaisante (Cf. Annexe 4) ce qui signifie que les placettes ont alors une dimension convenable, en tout cas si l'on cherche à opposer des situations bien contrastées.

Pour le faciès F_2 , on sépare les zones de départ des zones d'accumulation. Cette fois la représentativité d'une placette par rapport à la parcelle est plus discutable. En effet les distances sur lesquelles s'opèrent les déplacements augmentent progressivement et peuvent atteindre l'ordre de grandeur métrique. Nous devons donc introduire certaines restrictions dans l'utilisation de ces données.

1.1.2. - Première analyse de l'évolution morphologique : notion de phase dans la dégradation

A/ - Résultats de la description morphologique systématisée

Sur les Fig. 3a à f sont présentées les évolutions des principaux critères de description retenus en fonction de la hauteur de pluie cumulée depuis l'exposition du sol. Cette variable n'est utilisée qu'à titre de première approche, pour traduire de manière comparative, d'une parcelle à l'autre, la somme des actions subies par le sol. On note dans tous les cas :

a.1. - une augmentation pratiquement immédiate et ensuite progressive des critères traduisant l'altération du caractère fragmentaire initial (cf. Tableau 3), c'est-à-dire :

. de la surface relative des plaques. L'arrêt du tracé qui correspond au passage à F_2 , se produit pour une

valeur assez variable du taux de recouvrement, particulièrement faible pour la parcelle II Ao (Fig. 3b) qui se distingue par son état initial très motteux ;

- . de la note de désagrégation de la terre fine, qui atteint ou dépasse la valeur 5⁽¹⁾ lors du changement de faciès, puis se stabilise à sa valeur maximum 6.
- . du calibre du plus petit fragment distinct. Le changement de faciès correspond à des valeurs observées comprises entre 10 et 20 mm⁽²⁾.

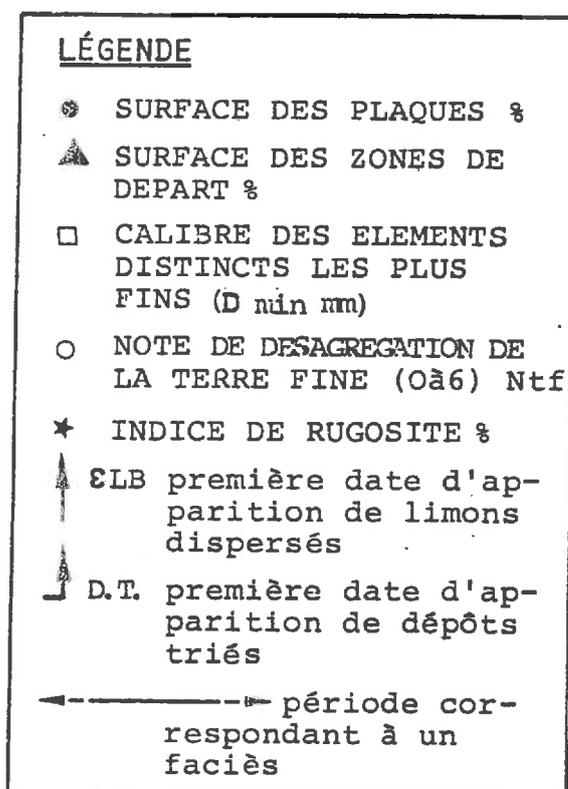
- a.2. - Une diminution progressive de la proportion des zones de départ, critère qui n'est observable que sur le deuxième type de faciès. A la fin des observations, des valeurs presque nulles sont atteintes sur les parcelles de Montluel, les valeurs atteintes à Palaiseau restant un peu plus élevées.
- a.3. - Une diminution également progressive de l'indice de rugosité, qui se manifeste sur toute la période d'observation mais avec une intensité plus marquée au début de l'évolution dans 4 cas sur 6.
- a.4. - La concomitance entre l'apparition massive des dépôts de particules élémentaires triées (y compris les "dépôts noirs" correspondant aux plus fins) et celle du faciès F₂. Les premiers signes d'individualisation de constituants élémentaires (saupoudrage de limons et sables très fins) apparaissent nettement plus tôt, juste avant ou pendant l'extension rapide des plaques.

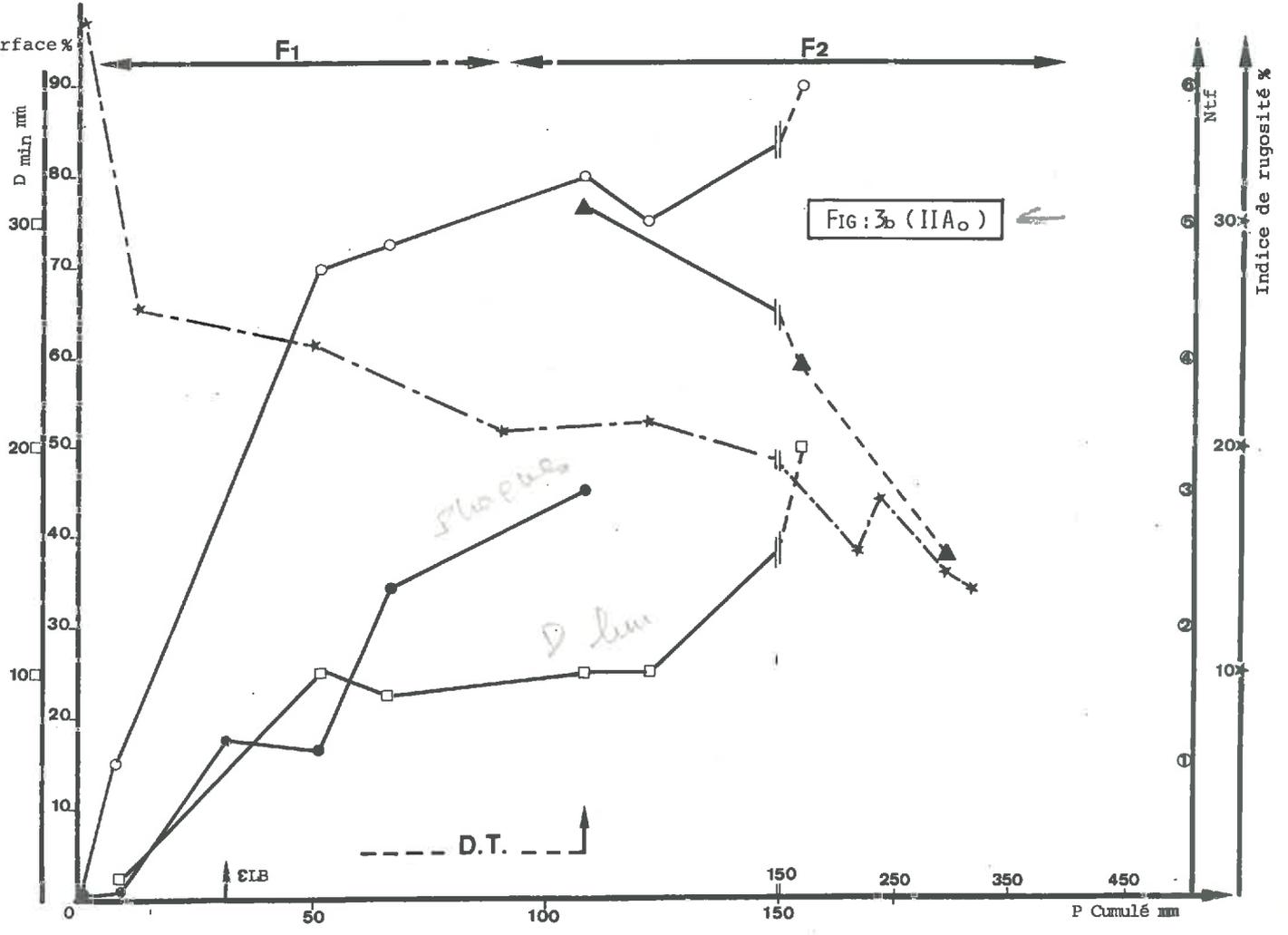
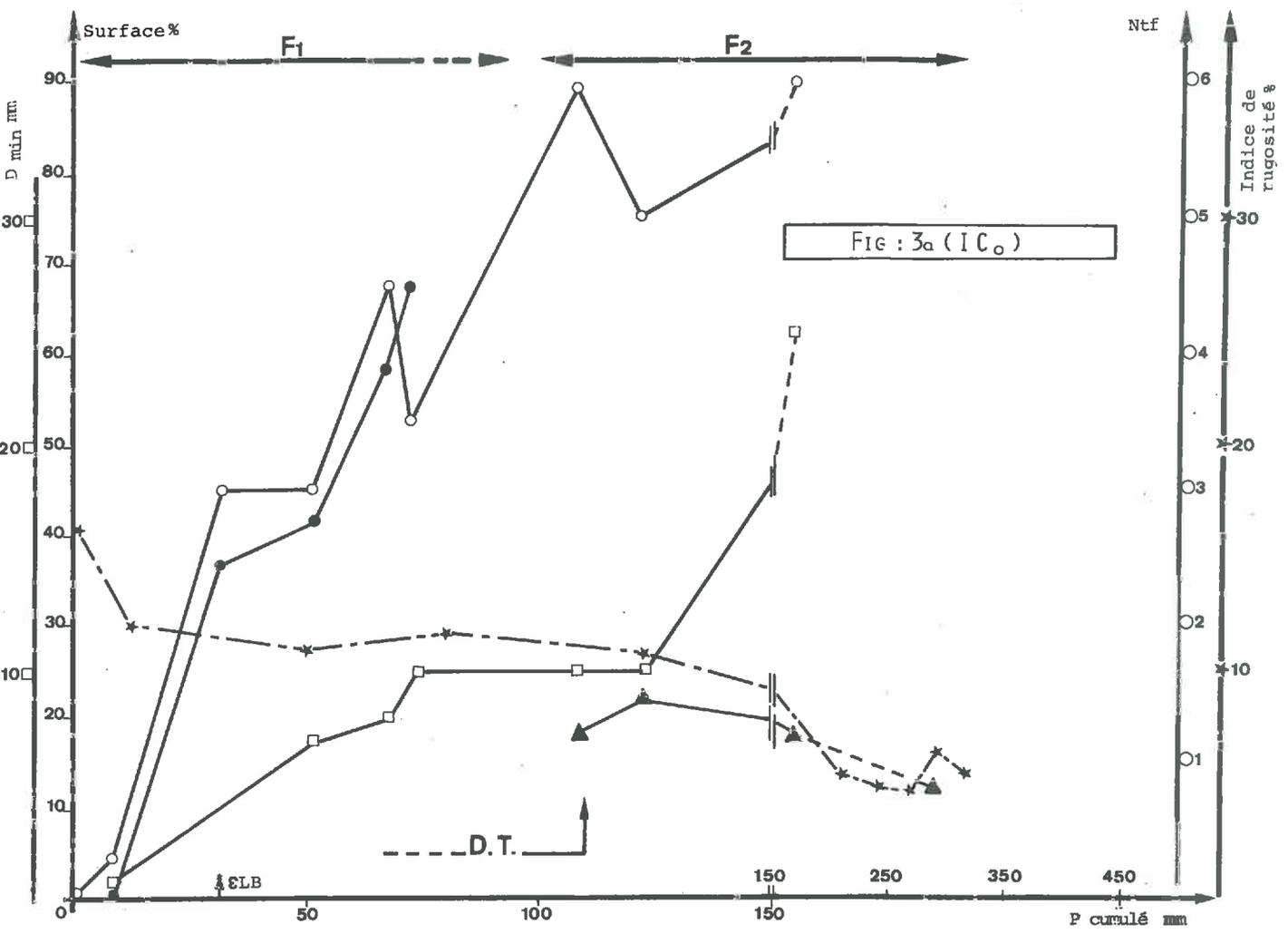
Par ailleurs, les pentes des différentes courbes traduisant l'évolution des critères sont assez variables. Schématiquement, on voit se distinguer :

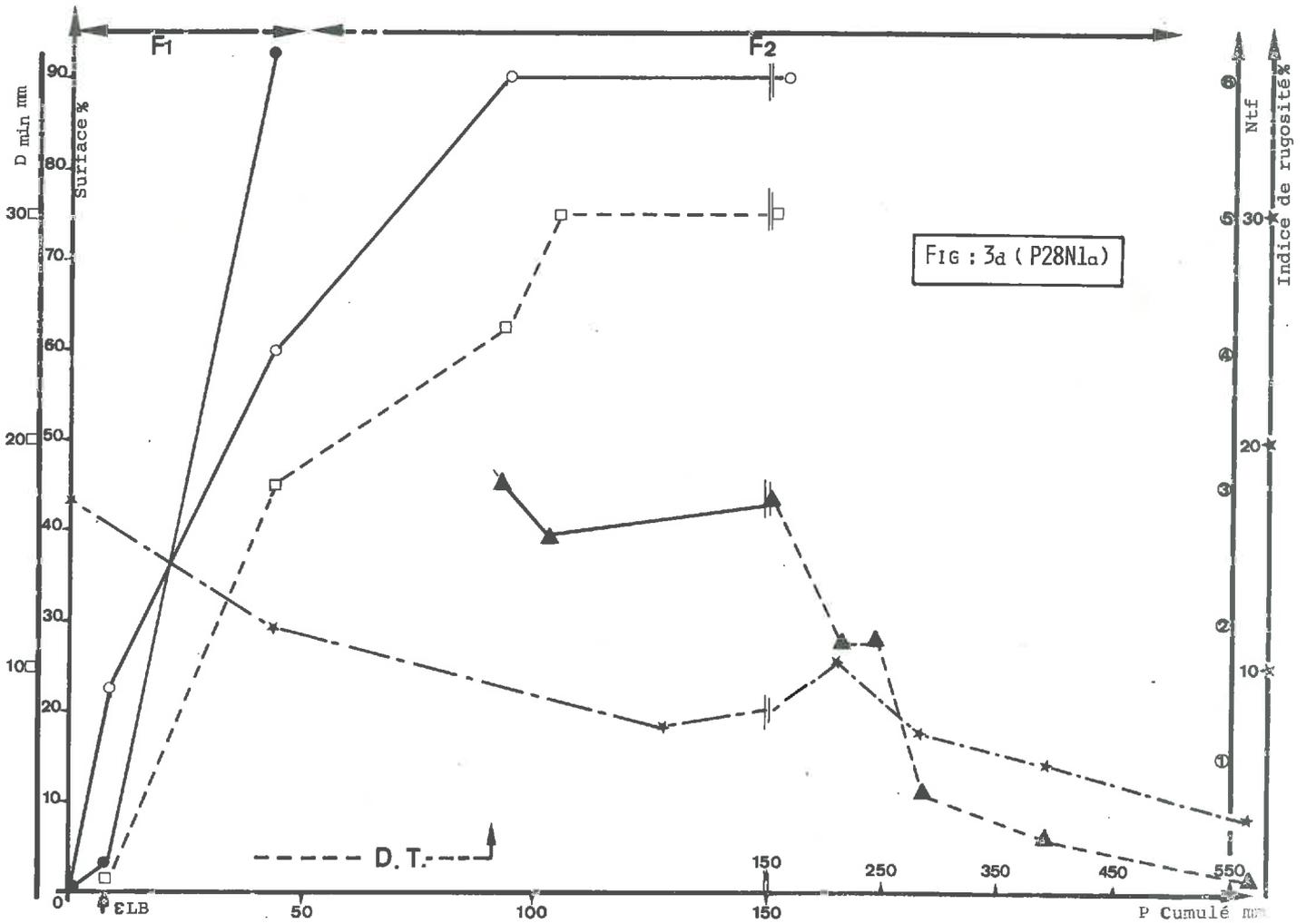
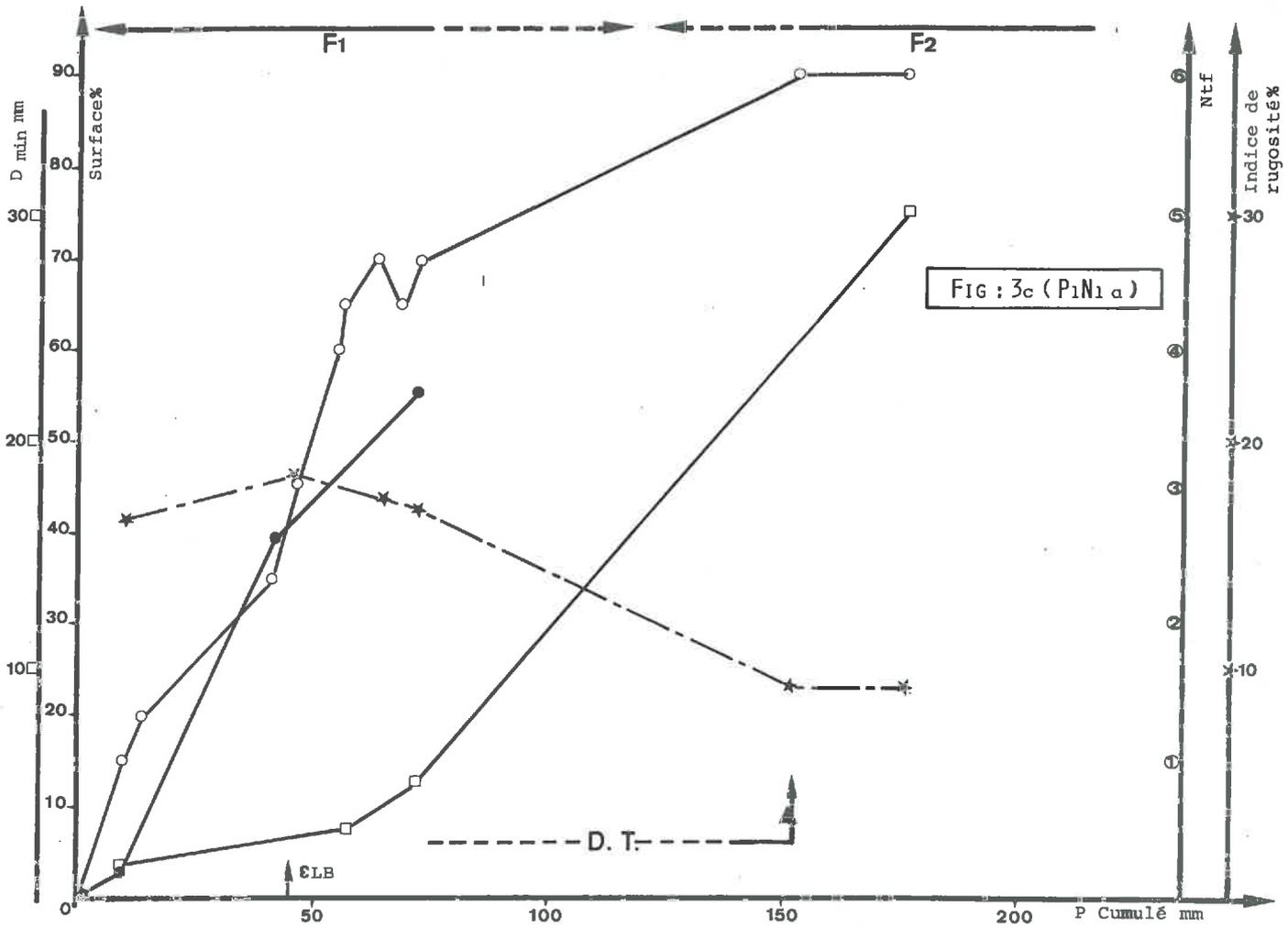
(1) La note 5 signifie (Cf. Annexe 2.2.) : continuité totale avec signes de séparation des constituants élémentaires, apparition massive de limons et sables très fins.

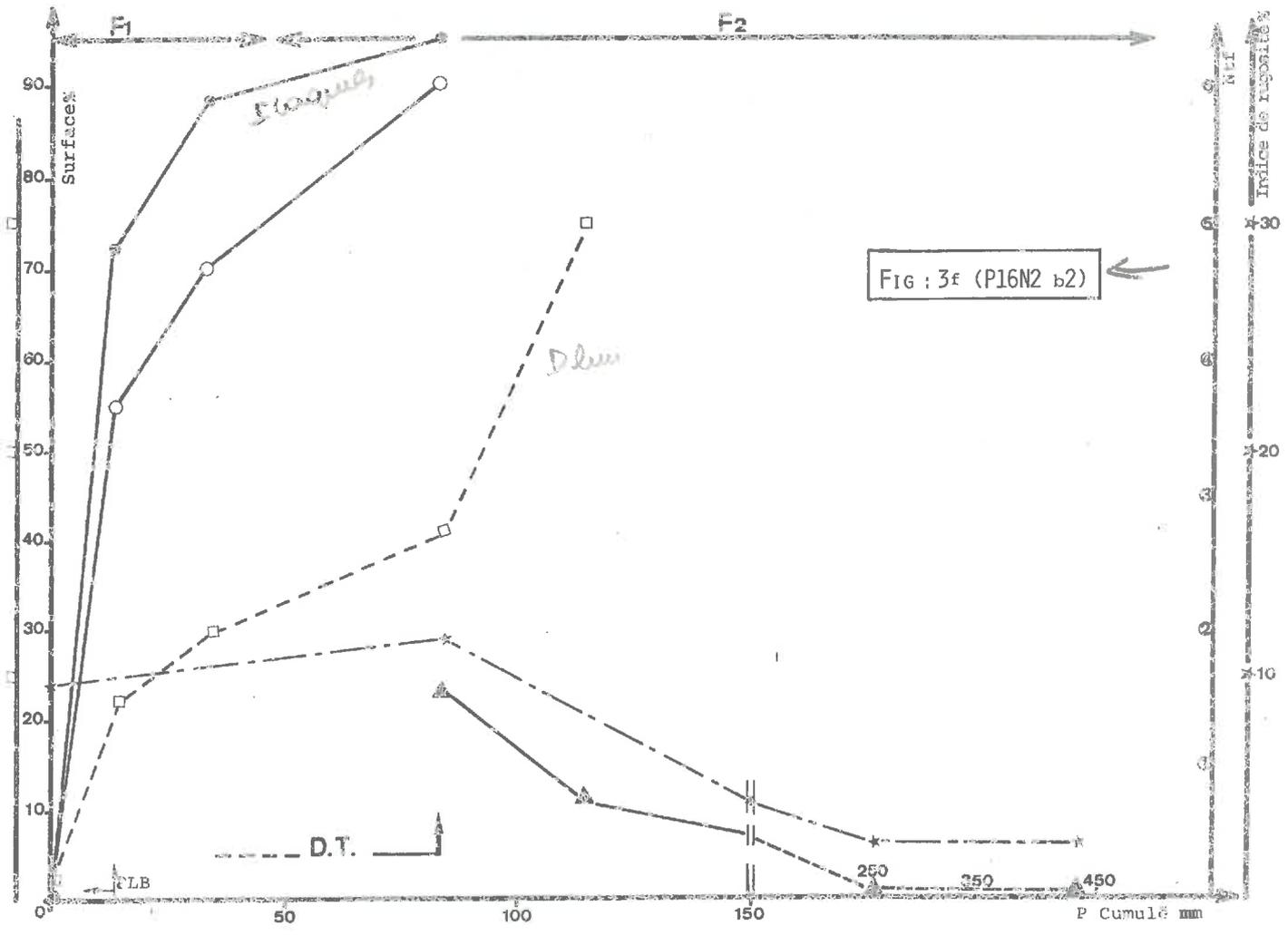
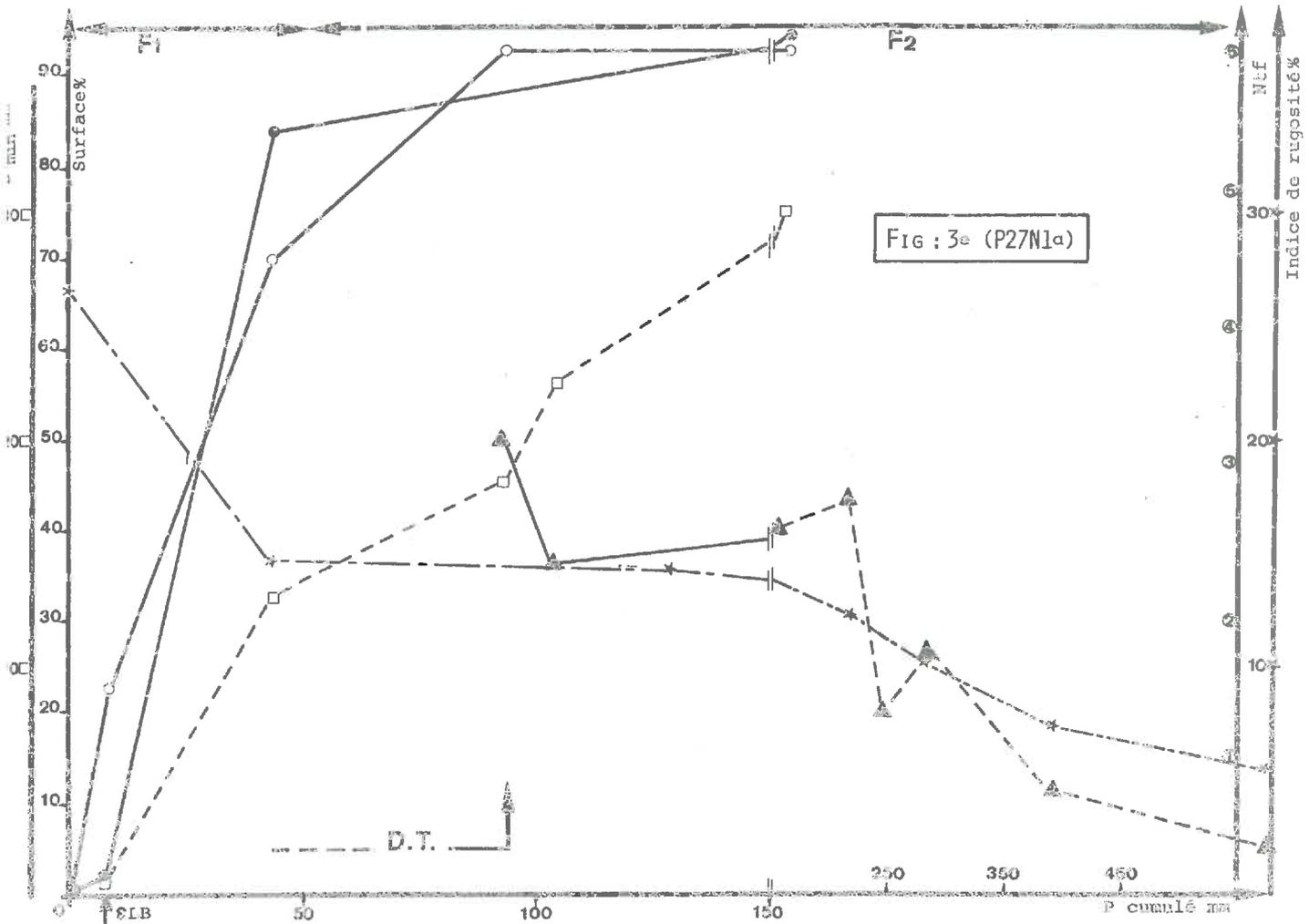
(2) L'allure sigmoïde observée dans la plupart des cas peut, pour partie, s'expliquer par le caractère discontinu de l'échelle de notation (Cf. Annexe 2.2.).

Fig.3 : EVOLUTION DES CRITERES MORPHOLOGIQUES
EN FONCTION DE LA PLUIE CUMULEE









- des situations à dégradation très rapide, pour lesquelles tous les critères montrent une évolution initiale importante (Fig. 3 d, e, f) et où le changement de faciès se réalise moins de 50 mm de pluies cumulées ;
- des situations à vitesse de dégradation modérée pour lesquelles tous les critères évoluent plus lentement.

Cependant, tous les critères ne sont pas corrélés de manière uniforme : ainsi on remarque que la position relative des courbes traduisant l'évolution des taux de recouvrement par rapport aux autres tracés est assez fluctuante, d'un graphique à l'autre. Les parcelles IAo (Fig. 3 b) et PI6 N2 b2 (Fig. 3 f), représentent les deux cas de figure extrêmes, d'évolution respectivement particulièrement lente ou rapide des plaques continues.

B/ - Discussion et premiers éléments d'interprétation

Suffisamment sensibles pour révéler une grande variabilité du rythme de la dégradation structurale, les critères qui ont été retenus présentent une allure de variation commune pour toutes les situations observées. Trois grandes tendances se dégagent, tout à fait cohérentes avec les observations que nous avons faites précédemment à Versailles (BOIFFIN, SEBILLOTTE, 1976) :

- a) - La succession de faciès n'est pas un simple effet d'optique Non seulement elle se reproduit sur des situations différentes, mais encore elle coïncide dans chaque cas, avec un degré d'évolution pratiquement identique de certains critères analytiques saisis de manière indépendante : la taille du plus petit fragment distinct et la date d'apparition massive de dépôts dispersés. Il y a donc probablement une modification qualitative des processus qui déterminent l'évolution morphologique de la surface, c'est pourquoi nous parlerons de 2 phases pour distinguer les périodes correspondant aux faciès F₁ et F₂. Dans cette optique, la jonction des deux phases constituerait un point singulier remarquable dans le déroulement du phénomène. En revanche, au sein des périodes correspondant à chaque faciès, les changements morphologiques ont un caractère progressif.
- b) - La période correspondant au faciès fragmentaire altéré F₁, ou phase 1, est marquée par la naissance et l'extension des plaques. La variation concomitante de la dimension du plus petit fragment distinct D_{min} évoque un lien direct entre ces deux évolutions, ce que confirme un nouvel examen des photographies : les plaques prennent naissance dans les régions initialement couvertes par les fragments les plus fins.

(ceci est particulièrement net en comparant les clichés Ia et Ic), et on voit qu'elles incorporent progressivement des motifs de dimension de plus en plus importante. Ceci suggère d'ores et déjà deux types d'interprétation :

- . Les plaques se formeraient par destruction des fragments, la résistance de ceux-ci dépendant de leur taille. A l'encontre de cette hypothèse vient le fait que les premiers signes importants de destruction des fragments n'apparaissent qu'après que les plaques aient atteint leur extension maximum.
- . Les plaques se formeraient par remplissage des interstices entre les fragments, les interstices les plus fins étant obturés les premiers, et le volume des interstices étant géométriquement déterminé par celui des fragments.

Il serait absurde d'opposer radicalement ces deux interprétations : le produit d'une désagrégation sur place va nécessairement se loger, même à très faible distance, dans un espace libre, et réciproquement, un interstice ne peut être obturé que par du matériau arraché à des fragments préexistants. Il convient cependant de les distinguer car les facteurs prépondérants contrôlant la vitesse d'extension des plaques ne sont pas, à priori, les mêmes dans les deux cas.

Dans l'une et l'autre hypothèse, la répartition dimensionnelle initiale des fragments, joue un rôle : plus l'état initial est grossier, plus lente doit être la progression des plaques, toutes choses égales par ailleurs. Or c'est bien ce que nous avons observé en comparant la parcelle IAo aux autres parcelles et en particulier à P16 N2 b2.

- c) - La période correspondant au faciès continu ou phase 2, est marquée par la conjonction de signes de destruction très poussée des assemblages, et de manifestations de transfert latéral de matière solide.

Dès le début de cette période, on peut opposer des zones de départ et des zones d'accumulation, les premières s'amenuisant progressivement jusqu'à disparaître, alors que les secondes s'agrandissent et se rejoignent en prenant des dimensions de plus en plus importantes. La répartition spatiale de ces zones est nettement liée à l'altitude.

L'aspect des zones d'accumulation évoque très fortement un transport puis un dépôt en phase liquide. D'une part, elles ont une surface extrêmement lisse et régulière, d'autre part, la répartition des particules qui sont classées selon leur taille, est conforme, dans ses grandes lignes, à celle de dépôts sédimentaires.

TABEAU.4.- CARACTERISATION DES ETATS TYPES
DE ZONES DU PROFIL SELON DEUX CRITERES. (Manichon, 1982.)

<u>NATURE</u> <u>DU CRITERE</u>	<u>MODALITES</u>	<u>SIGNIFICATION</u>	
TYPES D' ASSEMBLAGES D' ELEMENTS STRUCTURAUX	V	Cavité de grande dimension	
	M	Massif	
	SD	Structure à éléments soudés à contours difficilement discernables	
	SDV	idem + cavités au sein de la zone	
	SF	Structure à éléments soudés à contours facilement discernables	
	SFV	idem + cavités au sein de la zone	
	F	Structure fragmentaire à élément individualisés	
	FV	idem + cavités au sein de la zone	
	ETATS INTERNES DES ELEMENTS	Γ	Eléments plus ou moins poreux et peu consistants
		Δ	Eléments très compacts et consistants

On est donc amené à supposer que, pendant cette période, l'évolution morphologique de la surface est étroitement conditionnée par la présence et la circulation d'eau libre à la surface du sol. Ceci rendrait compte aussi bien du caractère extrêmement poussé de la séparation des constituants granulométriques, que de l'aspect des formations de dépôt. A contrario, il faut aussi noter, au sein du faciès F2, l'absence de toute figure de type "érosion en rigole" sur les zones de départ. Si, comme le laissent présager l'aspect de la surface et les travaux évoqués en introduction, le ruissellement joue bien un rôle majeur pendant cette période, ce rôle ne comporte vraisemblablement pas l'arrachement de matériaux au départ du déplacement.

En définitive, ces premiers éléments d'interprétation, aussi incomplets et hypothétiques soient-ils, vont à l'appui de la notion de phase de dégradation, considérée comme une étape mettant en jeu certains processus de nature spécifique.

- EVOLUTION STRUCTURALE AU SEIN DU PROFIL

1.2.1. - Approche macroscopique

A/ - Démarche d'observation

A ce niveau de perception peuvent être saisies :

. Des données morphologiques

Elles proviennent de la description systématique des différents horizons du profil culturel, récemment perfectionnée par MANICHON (1982) : au sein de chaque horizon sont délimitées des zones correspondant à certains états-types. Ceux-ci sont définis (Tableau 4) par la combinaison de deux critères : type d'assemblage des éléments structuraux et état interne de ceux-ci. Des notations complémentaires à différentes échelles (élément, zone, horizon) peuvent préciser certains aspects.

Cette démarche se révèle particulièrement efficace pour la description des horizons superficiels cultivés, car l'approche cartographique est bien adaptée au caractère discontinu des interventions mécaniques et au type d'hétérogénéité qui en résulte.

Les limites de son utilisation dans notre travail tiennent avant tout au caractère destructif et perturbateur de l'observation du profil culturel. Compte tenu de la dimension des parcelles observées, il était exclu de réaliser

TABLEAU.5. - PRINCIPAUX TRAITS MORPHOLOGIQUES DE L'EVOLUTION DES PROFILS CULTURAUX.

1 PARCELLE	2 PLUIE CUMULEE DEPUIS LE DEBUT DE L'EXPERIENCE (mm)	3 CARACTERES SPECIFIQUES DE LA SURFACE	4 5 ETATS-TYPES PREDOMINANTS		6 7 TRANSITION ENTRE LES 2 HORIZONS	
			PREMIER HORIZON (2)	DEUXIEME HORIZON (3)	PROFONDEUR MOYENNE (cm)	CARACTERES PARTICULIERS
I C ₀ PALAISEAU	0	1 couche de petites mottes triées surmontant le premier horizon	F,Γ et Δ	M, Δ	8,5	fond ondulé, mais très marqué, continu lissé
	315	Croûte presque continue d'allure stratifiée 0,5 à 1 cm d'épaisseur	SD,Γ et Δ	M, Δ	5,5	idem
II A ₀ PALAISEAU	0	2 couches de grosses mottes triées surmontant le premier horizon	F,Γ et Δ	SDV, Δ	7	fond très irrégulier peu net nombreuses fissures verticales
	315	Croûte stratifiée discontinue, 0 à 2 cm, d'épaisseur, interrompue par restes de mottes	SD,Γ et Δ	SDV, Δ	4	idem
P ₁ N ₁ a MONTLUEL	0	Mélange de terre fine et de mottes peu dégagées	80% F,Γ (4) 20% M,Δ (sous roue)	80% FV,Γ et Δ 20% M,Δ (sous roue)	11	peu marquées, (légère différence de compacité)
	178	Croûte stratifiée continue, 0,2 à 0,5 cm d'épaisseur	80% SDV, (4) 20% M, Δ (sous roue)	SFV,Γ et Δ (4)	impossible à repérer	
P ₂₈ N ₁ a MONTLUEL	0	Cf. état initial de P ₁ N ₁ a	F,Γ et Δ	60% FV,Γ et Δ 40% M, Δ	10-12	assez nette mais irrégulière et assez nombreuses, fissures verticales
	563	Croûte stratifiée continue, 0,2 à 1 cm d'épaisseur	M,Γ et Δ (5)	60% SFV,Γ et Δ 40% M, Δ (5)	8-7	assez nette sur zones sous-jacentes compactes, peu nette ailleurs
P ₂₇ N ₁ a MONTLUEL	0	Cf. état initial de P ₁ N ₁ a	F,Γ et Δ	60% FV,Γ et Δ 40% M, Δ (5)	9-10	cf. P ₂₈ N ₁ a
	563	Croûte stratifiée continue, 0,2 à 0,1 cm d'épaisseur	M,Γ et Δ (5)	60% SFV,Γ et Δ 40% M, Δ (5)	6-7	
P ₁₆ N ₂ b ₂ MONTLUEL	0	Petites mottes triées surmontant le premier horizon	F,Γ et Δ	60% FV,Γ et Δ 40% M, Δ	10-12	cf. P ₂₈ N ₁ a
	434	Croûte stratifiée continue, 0,2 à 0,5 cm d'épaisseur	M,Γ et Δ (5)	60% SFV,Γ et Δ 40% M, Δ (5)	8	

(1) Ces caractères renvoient aux modalités du tableau 4

(2) Ce premier horizon correspond dans tous les cas à la couche ameublie par les façons superficielles

(3) Ce deuxième horizon correspond dans tous les cas à la couche labourée non reprise par les façons superficielles

(4) Notations très voisines de celles de C. DURR et M. SEBILLOTTE (20 jours après)

(5) " " " " " " (6 mois après).

des profils culturaux complets à plus de deux reprises, c'est à dire au début et à la fin des observations. De plus, la pluie ayant une répartition spatiale diffuse, on ne peut s'attendre à voir apparaître de discontinuités latérales spectaculaires au sein du profil. Nous ne sommes donc pas dans les conditions où l'approche macro morphologique peut présenter son meilleur pouvoir séparateur. C'est pourquoi il est indispensable de compléter et de prolonger cette approche par l'obtention de données plus précises et permettant d'obtenir une représentation continue du phénomène.

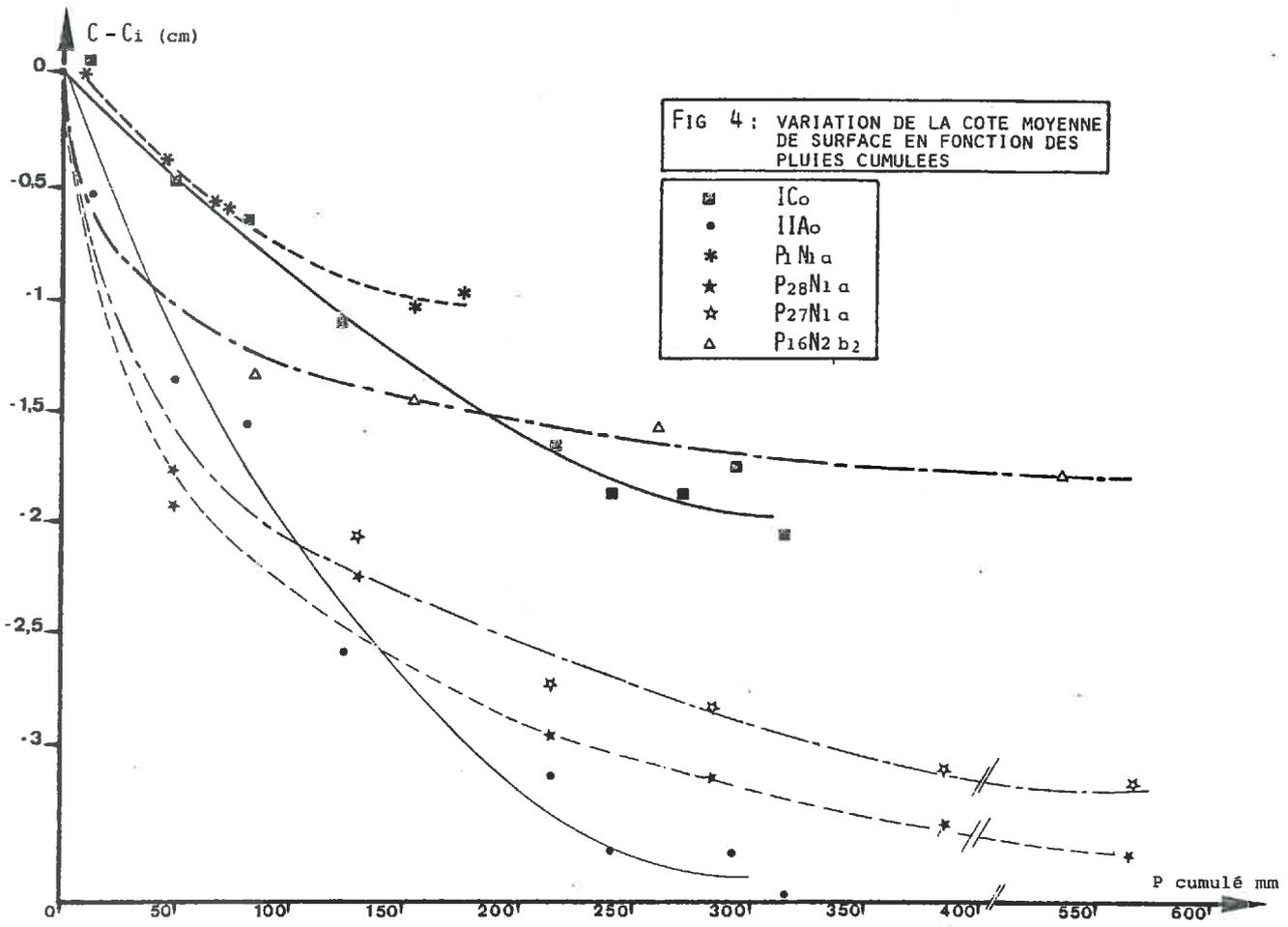
. Des données liées aux conséquences directes de l'assemblage des constituants

Il s'agit principalement de la cohésion et de la porosité. En utilisant la méthode pénétrométrique, HENIN (1939) avait pu suivre la prise en masse, après bêchage, de parcelles de stabilité structurale variable. Cependant, cette méthode est elle aussi assez perturbatrice, notamment parce qu'elle requiert de nombreuses répétitions. D'autre part, ses résultats sont très contingents de l'état hydrique du sol. Nous avons donc préféré nous limiter à suivre l'évolution du volume apparent, méthode qui avait également permis d'obtenir une description précise du phénomène de prise en masse et de distinguer des comportements liés à des différences de constitution organique (BOIFFIN, SEBILLOTTE, 1976). La variation du volume apparent est donnée par celle de la cote moyenne des points du relevé aspérimétrique (Annexe 3), mesurée à partir d'un niveau de référence constant. Il s'agit d'une donnée descriptive peu élaborée à laquelle il sera nécessaire, dans une étape ultérieure, d'associer d'autres déterminations pour accéder à l'analyse des systèmes de porosité et à la répartition des augmentations de compacité dans le profil.

B/ - Observation des profils culturaux

Les principales observations relatives à l'évolution morphologique des profils culturaux des 6 parcelles mentionnées en introduction sont récapitulées dans le Tableau 5. Plusieurs éléments s'en dégagent :

- une tendance générale à l'augmentation de compacité révélée aussi bien par l'évolution des critères morphologiques que par la diminution d'épaisseur des horizons (colonne 6).
- Parmi les critères morphologiques seuls ceux relatifs aux assemblages évoluent alors que les critères d'état interne ne sont pas modifiés (abstraction faite des fragments tout à fait superficiels). C'est bien ce



qu'avait observé MANICHON (1982) en comparant à trois mois d'intervalle en sol limoneux, deux profils disposés de la même manière et à peu de distance. Il notait d'ailleurs que les contours délimitant les zones homogènes étaient très voisins d'une date à l'autre.

- On ne perçoit pas de signes de désagrégation très poussée (allant jusqu'à la séparation des constituants élémentaires) permettant de dire que celle-ci aurait eu lieu au sein du profil. En effet, des inclusions de limons sont observées mais ce sont des accumulations ponctuelles toujours localisées dans de petites cavités communiquant avec la surface par une fissure ou un trou de ver.

- L'intensité des signes d'évolution structurale décroît nettement avec la profondeur. Cette évolution se révèle :

. très marquée dans les 5 à 20 premiers millimètres de surface. L'état initial fragmentaire fait place à un état final marqué par la présence de croûtes constituées de petites couches horizontales, de teinte alternativement claire et foncée.

. très nette quoique moins spectaculaire pour l'ensemble de l'horizon ameubli par les façons superficielles. Certaines différences se manifestent selon les parcelles, mais de manière relativement grossière.

. beaucoup moins marquée pour l'horizon sous-jacent (labouré non repris). Les états les plus continus au départ ne donnent lieu à aucune modification de notation alors que les horizons fragmentaires au départ présentent, à la fin, un degré de soudure peu accentué.

En définitive, les modifications morphologiques sont perceptibles sur toute la profondeur initialement meuble jusqu'au socle compact constitué selon les cas, soit par le fond de labour, soit par un fond de façons superficielles très tassé. Au sein de cette couche plus ou moins épaisse, il est nécessaire de distinguer l'évolution structurale de la mince couche superficielle (5 à 20 premiers mm) qui est très fortement remaniée, contrairement aux horizons sous-jacents.

C/ - Evolution du volume apparent du sol

La tendance à l'augmentation de compacité se traduit globalement par un abaissement régulier de la cote moyenne de la surface (Fig. 4) en fonction de la hauteur de pluie cumulée depuis la date d'exposition de la parcelle. La diminution du volume apparent est d'abord rapide, puis de plus en plus lente : on

retrouve la même allure de variation que lors d'observations précédentes (BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976), allure qui correspond également bien à celle des indices d'ameublissement observée par HENIN (1939). Réciproquement la transition entre les deux grands types de faciès de surface ne correspond pas à une modification sensible du rythme d'abaissement de cote.

A première vue, il n'y a donc pas lieu d'invoquer, comme pour l'évolution structurale de la surface, des phases différentes dans le déroulement de la prise en masse au sein du profil.

Par ailleurs, d'importantes différences se manifestent entre les parcelles étudiées, portant à la fois sur la vitesse de croissance et la diminution totale du volume apparent qui va de 1 à près de 4 cm³/cm². Il semble donc que nous disposons, là aussi, d'indicateurs assez sensibles du comportement structural, précieux pour des comparaisons expérimentales ultérieures.

1.2.2. - Approche micromorphologique

A/ - Démarche d'observation

L'approche micromorphologique présente pour notre travail un double intérêt. D'une part, grâce aux techniques de fixation des échantillons et d'observation systématisée à différents grossissements (BREWER, 1964 ; JONGERIUS et al 1972), elle permet d'identifier et de décrire avec précision certains traits morphologiques de très petites dimensions qui sont caractéristiques de la dégradation structurale sous l'action de la pluie. Ceci peut déboucher sur une meilleure compréhension du fonctionnement général du sol (KUBIENA, 1964), et tout particulièrement, en l'occurrence, du régime d'infiltration (Mc INTYRE, 1958). D'autre part, elle permet d'accéder à des niveaux assez fins d'organisation des constituants granulométriques, ce qui peut apporter des éléments d'interprétation quant à la nature des transformations subies par les assemblages. Cet aspect revêt un intérêt particulier dans le cas de l'action de la pluie qui se réalise par l'intermédiaire d'une infinité d'évènements microscopiques quasi instantanés (et donc très peu accessibles à l'observation directe) et cependant suffisamment complexes pour susciter diverses interprétations.

Ayant eu recours à la technique des lames minces, nous nous sommes limités au repérage de certains traits aisément perceptibles à de faibles grossissements (12,5 à 30) et pouvant être directement reliés aux hypothèses émises à partir de l'observation macromorphologique : caractère plus ou moins fragmentaire de la phase solide, configuration des vides, modalités d'association entre le squelette et le plasma. Indépendamment de

date du prélèvement, de la localisation et de la position du micro-horizon au sein du microprofil, les combinaisons des différentes modalités de ces critères amènent à distinguer trois principaux types de microhorizons (Tab. 6). Chacun d'entre eux présente une certaine variabilité ; portant sur différents caractères (colonne de droite du Tab. 6) :

- le microhorizon fragmentaire m_1 , présente avant tout une répartition dimensionnelle des fragments très variable d'un site à l'autre et il est, selon les cas, soit en contact direct avec la surface, soit recouvert par d'autres microhorizons. Il n'est limité vers le bas que par la base de la lame.
- le microhorizon m_2 semble présenter certaines variations systématiques : la variante m_{2a} se caractérise par une épaisseur de 1 à 3 mm et la présence de fines vésicules assez rares ; la variante m_{2b} est plus épaisse et présente des signes plus importants de disjonction squelette-plasma, la variante m_{2c} présente des caractères voisins de m_{2b} et de plus contient des vésicules plus nombreuses et plus grosses.
- le microhorizon stratifié m_3 est d'épaisseur variable. Par ailleurs le degré d'homogénéité des particules constituant les strates est également assez variable, y compris au sein d'une même lame mince.

B/ - Dates et localisation des prélèvements

17 lames minces ont été réalisées⁽¹⁾, donnant lieu, du fait de certaines subdivisions, à 24 descriptions systématiques. Elles ont été fabriquées à partir de prélèvements correspondant à trois séries :

- la plus détaillée (8 lames) provient de parcelles homologues de $P_1 N_{1a}$ (Cf. Tableau 1), c'est-à-dire situées à Montluel et évoluant au cours du printemps 82 ; les prélèvements sont réalisés à plusieurs dates et permettent de retracer l'évolution ayant eu lieu au cours de la période d'observation ;
- une deuxième provient de prélèvements réalisés le 14.10.82 sur le site de Montluel. Deux lames minces, provenant de

(1) Réalisées et observées au laboratoire de la Chaire de Pédologie de l'I.N.A. P-G à Grignon, avec le concours de L.M. BRESSON. Les modalités de réalisation sont présentées en annexe 5.

TABLEAU. 6 .- CARACTERES DES PRINCIPAUX TYPES DE MICROHORIZONS RENCONTRES.
SUR LES LAMES MINCES.

TYPE DE MICROHORIZON ou de LIMITE	CARACTERES STABLES	CARACTERES VARIABLES
m 1	<ul style="list-style-type: none"> . Fragmentaire . Porosité interstitielle importante constituant un réseau continu . Plasma et squelette intimement mélangés au sein des fragments 	<ul style="list-style-type: none"> Répartition dimensionnelle et forme dominante des fragments Volume respectif vide et matière solide Homogénéité du mélange, type d'organisation du plasma
m 2	<ul style="list-style-type: none"> . Continu. limites inter-agrégats peu ou pas perceptibles . Porosité interstitielle faible à nulle . Plasma et squelette intimement mélangés (caractère prédominant avec présence de petites zones de composition plus triées) 	<ul style="list-style-type: none"> Présence et abondance d'une porosité vésiculaire homogénéité du mélange, type d'organisation du plasma; fréquence, nature et disposition des petites zones à dominante squelette ou plasma.
m 3	<ul style="list-style-type: none"> . Continu. Disposition en stries horizontales ou subhorizontales. Structure à tendance particulière au sein des stries . Porosité pratiquement non perceptible à des grossissements $\times 40$. Disjonction importante entre plasma et squelette. Différences nettes de composition entre les différentes stries; certaines à dominante squelette, d'autres à dominante plasma 	<ul style="list-style-type: none"> Présence d'agrégats au sein des stries Présence et importance d'une porosité vésiculaire à la base de l'horizon Présence de fissures verticales. Degré d'isométrie des particules composant les stries : ex : Cl.VII g et h = stries de composition hétérogène Cl.VIII c = stries très contrastées de composition plus triée.
Contact m ₁ - m ₂	<ul style="list-style-type: none"> . Graduel. - pas de limite nette . m₂ surmonte toujours m₁ 	<ul style="list-style-type: none"> Epaisseur de m₂
Contact m ₂ - m ₃	<ul style="list-style-type: none"> . m₃ surmonte toujours m₂ 	<ul style="list-style-type: none"> Netteté de la transition Caractère discordant (le plus fréquent lorsque la limite est nette).
Contact m ₁ - m ₃	<ul style="list-style-type: none"> . N'existe pas - il y a toujours interposition de m₂ 	

parcelles homologues de P27 N1 et P28 N1, correspondent typiquement à un faciès macroscopique F2 bien développé ; alors que deux autres, provenant de parcelles homologues de P16 N2 b2 correspondent exactement au changement de faciès F1-F2.

- Les 5 lames restantes ont été prélevées le 23.01.82 à Palaiseau. 4 d'entre elles, provenant de la parcelle IC₀ correspondent à différents microsites caractéristiques du faciès F2 (zones de départ ou d'accumulation) ; la dernière correspond typiquement au faciès F1 observé sur une parcelle homologue de IC₀ mais moins dégradée⁽¹⁾. Il est à noter que le prélèvement fait suite à une période de gel intense qui, comme on l'a vu précédemment a fortement remanié la surface. Cependant, le sol avait entièrement dégelé et les faciès de surface avaient bien repris l'aspect antérieur au gel.

C/ - Résultats

La manifestation la plus évidente de la dégradation structurale est une différenciation verticale des microprofils. Elle est aisément perceptible en parcourant les planches photographiques VII et VIII dans l'ordre de numérotation des clichés : à l'état initial hétérogène et non orienté se substitue une succession de plus en plus complexe de microhorizons, séparés par des limites plus ou moins nettes.

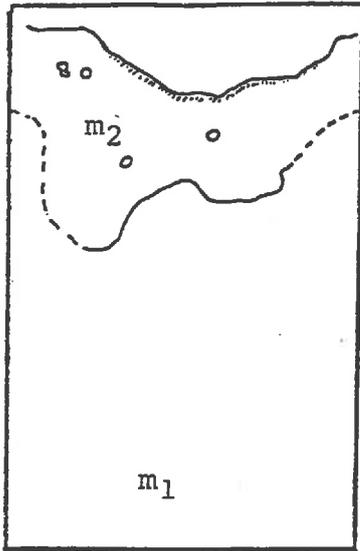
La typologie sommaire que nous avons présentée ci-dessus permet de décrire et de comparer les lames de diverses provenances : Chaque microhorizon délimité est identifié à un type, en précisant, dans chaque cas, les modalités des caractères variables. Les schémas de disposition des microhorizons correspondant aux clichés des planches VII et VIII sont donnés sur la Fig. 5. Le tableau 7 récapitule les principaux caractères des 24 lames ou parties de lames observées de façon distincte. Il s'en dégage les points suivants :

- Il y a une bonne correspondance entre l'aspect macromorphologique et la succession des microhorizons, qui peut être schématisée comme suit :

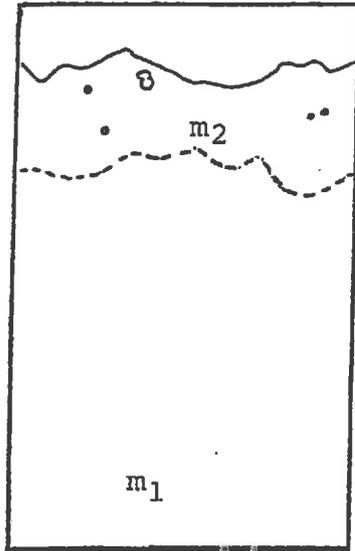
- . Faciès F₀ : m₁ sur tout le microprofil
- . Faciès F₁, - zone hors plaque = m₁ seul
- . " " , - zone de plaque = m_{2a}/m₁
- . Faciès F₂, - zone de départ = m_{2b}/m₁
- . " " , - zone d'accumulation = m₃/m_{2c}/m₁

(1) Cette dernière parcelle avait été protégée par un grillage.

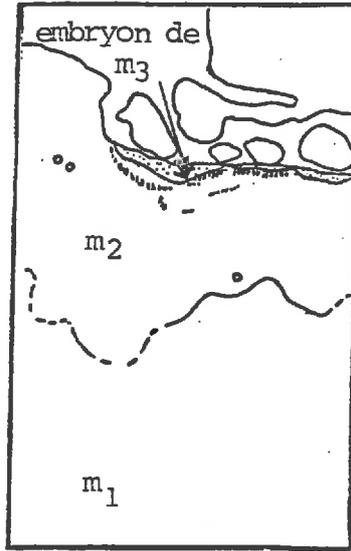
FIG5: SCHEMAS DE SUCCESSION DES MICROHORIZONS D'APRES LES CLICHES DE LAMES MINCES



Cl. VII c

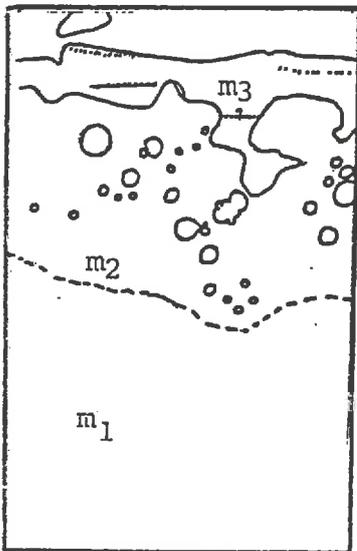


Cl. VII d

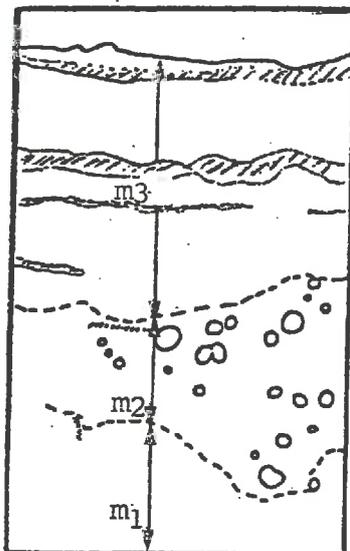


Cl. VII e

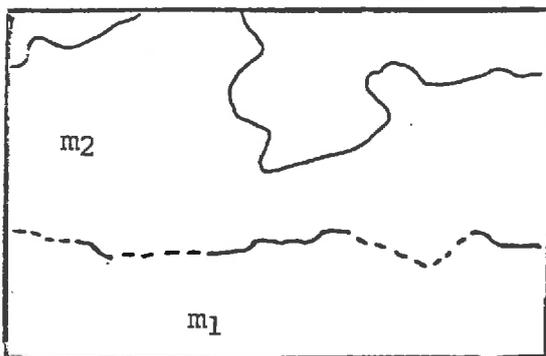
-  Strates à concentration de pl.
-  Liséré plasmic
-  Poches plus riches en squette
-  Vésicules
-  1 mm



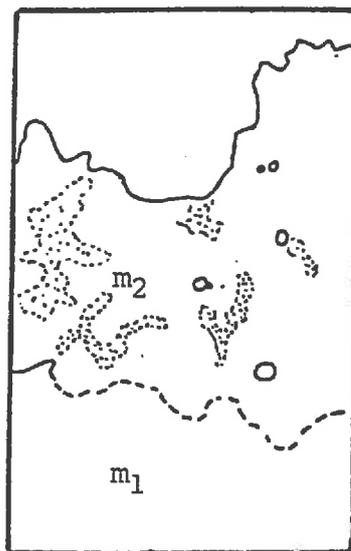
Cl. VII g



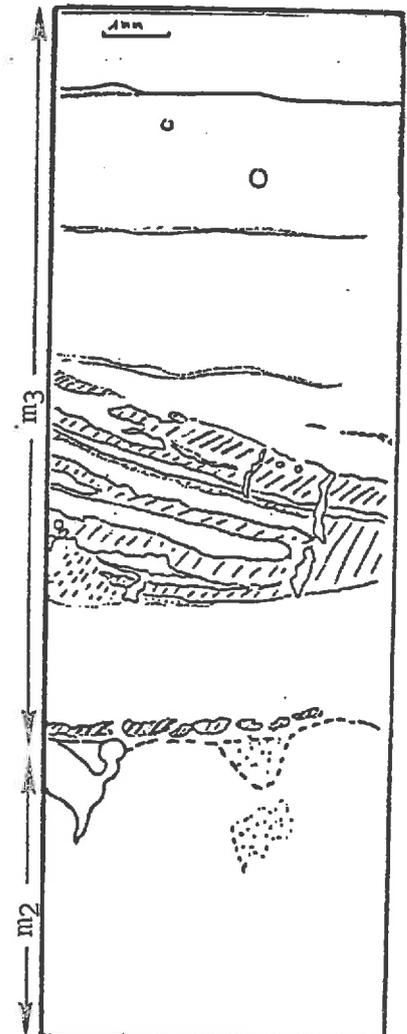
Cl. VII h



Cl. VIII a



Cl. VIII b



Cl. VIII c

TABLEAU. 7 .- DISPOSITION ET PARTICULARITES
DES MICROHORIZONS SELON LA SITUATION DU PRELEVEMENT.

MICROSITE de PRELEVEMENT			REFERENCE de LAME (1)	OBSERVATIONS SUR LAMES MINCES			
TYPE de FACIES	TYPE DE ZONE	POSITION MICROTOPO GRAPHIQUE		SUCCESSION et EPAISSEUR DES MICROHORIZONS(2)	N° PHOTOS CORRESPONDANTES		
Fo			Bo2 +	← m1 →	VII a et b		
F1	Début	HORS PLAQUE	point haut	Bo3 a +	m2 très discontinu 0 à 1 mm / m1		
		PLAQUE	plateau	Bo3 b +	m2 1 à 2 mm / m1		
			creux	Bo3 c +	m2 2 mm / m1	VII c	
	Stade plus avancé	PLAQUE	plateau	Bo4 +	m2 discontinu 1 mm / m1		
			HORS PLAQUE	plateau	Bo5 +	← m1 →	
			plateau	Bo6 a +	m2 1 à 2 mm / m1	VII d	
		PLAQUE	creux	Bo6 b +	Embryon de m3 très discontinu 0 à 0,3mm / m2 / m1	VII et et f	
			plateau	Bo17 ++	m2 1 à 2 mm / m1	VIII a	
			point haut	Bo27 a +++	m2 3 mm / m1		
TRANSITION F1 - F2	PLAQUE	creux	Bo27 b +++	m3 discontinu / m2 / m1 0 à 1 mm / 2 à 3 mm			
		Bo3 +++	m3 discontinu / m2 / m1 0 à 1 mm / 2 à 4 mm				
F2	ACCUMU- LATION	creux	Bo7 a +	m3 / m2 / m1 2 à 3 mm / 4 à 5 mm			
			Bo7 b +	m3 / m2 / m1 1 mm / 3 à 4 mm	VII g		
			Bo9 +	m3 / m2 / m1 3 à 4 mm / 2 à 3 mm	VII h		
			Bo15 ++	m3 / m2 / m1 2 à 10 mm / 3 à 4 mm			
			Bo16 ++	m3 / m2 / m1 2 à 10 mm / 3 à 4 mm			
			Bo21 ++	m3 / m2 / m1 4 à 12 mm / 3 à 4 mm	VIII c et d		
			Bo20 a +++	m3 / m2 / m1 2 à 4 mm / 4 à 5 mm			
			Bo23 +++	m3 / m2 / m1 2 à 4 mm / 3 à 5 mm			
	DEPART	point haut	Bo10 +	m3 discontinu / m2 / m1 0 à 2 mm / 2 à 6 mm			
			Bo19 ++	m2 / m1 3 à 4 mm			
			Bo21 b ++	m2 / m1 ≥ 8 mm			
			Bo20 b +++	m2 / m1 3 mm			

(1) Provenance :

- + : Montluel printemps
- ++ : Palaiseau automne
- +++ : Montluel automne

(2) de gauche à droite on va de la surface vers le bas de la lame :

- / : limite nette
- /: : limite peu nette

- L'état interne du microhorizon m_1 ne présente, lorsqu'il est noté en F_1 ou F_2 , aucune différence sensible par rapport à celui observé en F_0 ;
- les variantes du microhorizon m_2 sont en bonne correspondance avec la position de celui-ci dans le profil ;
- l'apparition de m_3 se réalise sous forme de petites poches discontinues et semble légèrement précéder l'établissement du faciès F_2 . Par la suite, l'épaisseur de ce microhorizon dépend essentiellement de la position microtopographique du prélèvement ; plus celle-ci est basse plus m_3 est épaisse ;
- le degré d'isométrie des particules constituant les structures s'avère lié au site et à la période climatique ayant précédé le prélèvement. C'est la série prélevée en cours d'hiver à Palaiseau (où les pluies peu intenses ont prédominé) qui présente le meilleur tri à l'opposé de celle prélevée au printemps à Montluel après des pluies d'orage extrêmement violentes.

D/ - Discussion

- L'apparition du microhorizon m_2 , première modification perceptible, semble pouvoir être interprétée comme une transformation de l'état fragmentaire initial m_1 sans redistribution spatiale importante. A la base de ce microhorizon, la transition avec le m_1 sous-jacent n'est jamais abrupte. Il y a toujours un gradient de porosité et on y devine encore les contours de certains agrégats. Outre qu'il n'y a aucun signe flagrant d'apport de matériau, c'est uniquement dans les zones de départ de terre que le microhorizon m_2 se maintient à la surface du sol. Enfin, son aspect correspond bien à celui des "structural crusts" décrites par CHEN et al (1980) à partir d'échantillons préservés de tout apport externe (1).

A partir d'un certain degré d'évolution, et surtout s'il est surmonté d'un étage m_3 , ce microhorizon présente une porosité vésiculaire, trait couramment mentionné. Selon

(1) Nous ne retrouvons que sporadiquement les figures de pavage superficiel que ces auteurs ainsi que Mc INTYRE (1958) ont observé et désignent sous le terme de "skin-seal".

plusieurs auteurs cités par VALENTIN (1981), il serait lié à l'emprisonnement de gaz dont le dégagement serait bloqué par une couche supérieure à très faible diffusivité.

- Au contraire, le microhorizon m_3 , d'après sa constitution et la position microtopographique où on le rencontre, semble bien être constitué essentiellement de matériaux d'apport externe au microsite. Les microstrates subhorizontales dont il est composé sont assez souvent nettement discordantes par rapport à l'horizon m_2 . D'autre part elles présentent des contrastes plus ou moins marqués de composition granulométrique. Ces différents points suggèrent très fortement que le microhorizon m_3 résulte de l'apport et du dépôt en phase liquide plus ou moins turbulente de particules solides. C'est d'ailleurs l'interprétation que donnent systématiquement tous les auteurs qui ont observé ce type de figures (EVANS et BUOL, 1968 ; BISHAY et STOOPS, 1975 ; DHIR et al, 1974 ; CHEN et al 1980 ; VALENTIN, 1981). Réciproquement, ce sont bien ces mêmes figures qui apparaissent dans les zones où les dépôts sédimentaires ont été provoqués expérimentalement (MUCHER et de PLOEY, 1977; MUCHER et al., 1981). Ces auteurs ont d'ailleurs constaté que la composition des strates formées en conditions de ruissellement sous pluies était plus hétérométrique que celle de strates de dépôts consécutifs au seul ruissellement ; ceci étant probablement dû au type de particules arrachées dans l'un et l'autre cas et aux variations de turbulence de l'écoulement.

Toutefois, ces mêmes auteurs ont aussi montré que des traits laminaires riches en particules grossières peuvent apparaître dans des zones de départ de terre ; Mc INTYRE (1958) a également observé la formation de petites accumulations d'argile sous jacentes à des lits grossiers, probablement dues à un entraînement vertical. Quoique de façon non systématique, nous avons observé certaines figures similaires : par exemple sur le cliché VIIe on voit assez nettement, à la base d'une petite poche de limons grossier, un fin liseré plasmique concordant avec l'ancienne surface. Dans d'autres cas, la base de m_3 n'est pas très distincte du sommet de m_2 qui représente en principe l'ancienne surface et le caractère discordant, critère de diagnostic du système sédimentaire, ne peut être démontré. Il est donc possible qu'une partie du microhorizon m_3 , et tout particulièrement sa base, provienne d'une séparation et d'un tri sur place des constituants. Il est d'ailleurs à noter que les signes de disjonction plasma-squelette sont assez importants au sein de certains microhorizons m_2 observés pendant la même période mais en zone de départ (variante m_{2b}).

En somme, l'étape de dégradation structurale correspondant au faciès F2 et au développement du microhorizon m3 ne se distingue pas exclusivement par l'intervention du processus sédimentaire (qui a très probablement lieu de manière importante), mais aussi par une désagrégation très poussée des assemblages terreux, allant jusqu'à la séparation des constituants granulométriques élémentaires(1).

- Le départ de terre se fait aux dépens d'un matériau initialement agrégé. Dans certains cas, ce départ semble d'ailleurs se réaliser sous forme d'arrachement de petits agrégats, dont on voit les traces sur les mottes, ces agrégats pouvant ensuite s'accumuler dans les zones de dépôt (Cf. Cl IIIc). Nous avons aussi vu que les zones de départ du faciès F2 présentaient certains signes de disjonction squelette-plasma. Il apparaît donc que le processus de séparation granulométrique peut se réaliser à toutes les étapes du trajet départ-accumulation.

E/ - Conclusion

A cette étape de l'analyse, le déroulement de la dégradation structurale de la couche immédiatement superficielle peut être schématisé comme sur la Fig. 6.

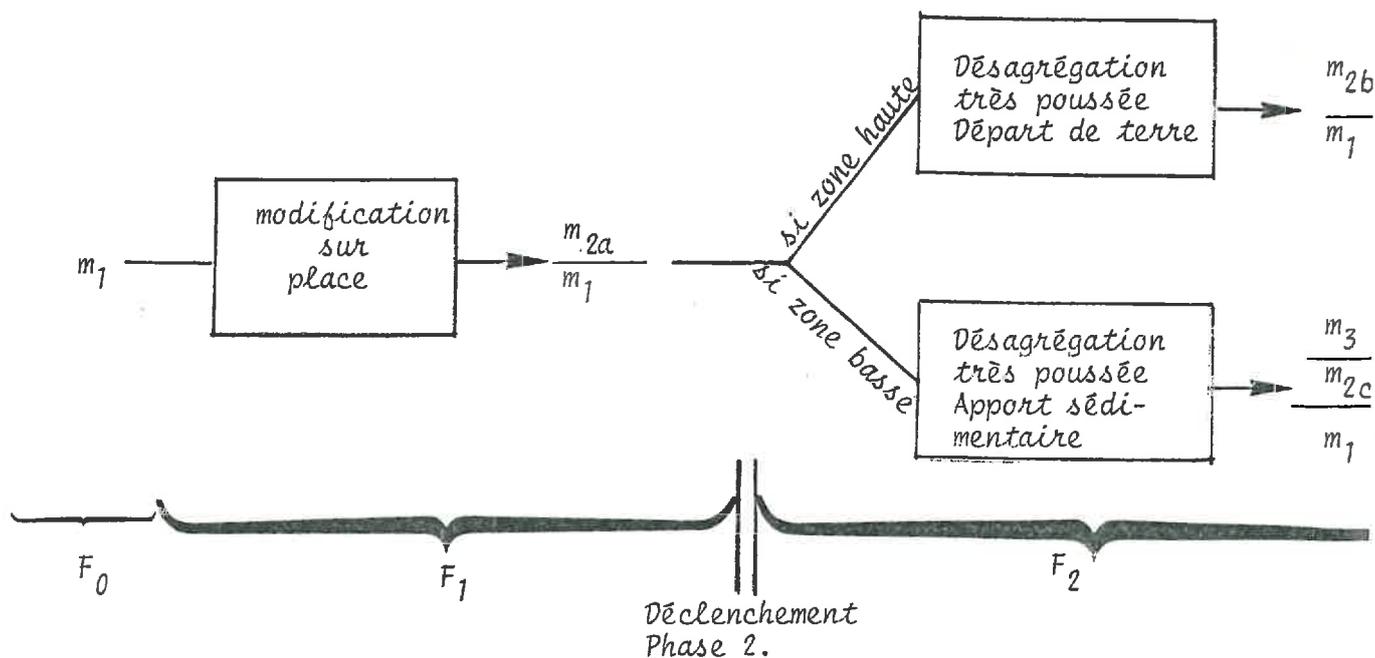


Fig. 6. - Schéma de dégradation de l'horizon immédiatement superficiel.

(1) Il n'est pas certain que l'on puisse parler de dispersion : nous ne sommes pas en mesure de dire que les colloïdes sont réellement dispersés dans la phase liquide.

Un tel schéma est très voisin de celui qu'avait établi VALENTIN (1981) à partir d'expériences sous pluies simulées intenses au cours desquelles la durée du faciès F_1 était vraisemblablement nettement plus courte que dans nos conditions d'observation.

La différence entre les deux faciès semble pouvoir s'interpréter en relation avec une modification sensible du régime hydrique à la surface du sol, c'est-à-dire à l'apparition d'excès d'eau importants et durables.

On peut donc penser que l'extension des plaques, constituées par un mince horizon très dense et continu, engendrerait une réduction des flux d'infiltration et, par suite, le passage à un nouveau régime de dégradation structurale.

Il y aurait donc bien deux phases qualitativement distinctes dans la dégradation structurale du sous-système constitué par les 10 ou 20 premiers millimètres du sol. En revanche, le maintien à la base des lames d'un horizon fragmentaire m_1 au sein duquel les modifications morphologiques sont pratiquement imperceptibles à 20 millimètres ou moins de la surface, confirme que l'évolution des couches sous-jacentes ne comporte pas, sauf apparition d'un excès d'eau important dans la masse du profil, de remaniement très intime des assemblages terreux, et il n'apparaît aucune raison majeure d'envisager une discontinuité qualitative dans cette évolution.

- EVOLUTION DU REGIME D'INFILTRATION

1.3.1. - Observations et position du problème

A/ - Comportement du sol sous la pluie : observation des flaques

L'observation directe de quelques épisodes pluvieux nous a permis de noter la présence ou l'absence de flaques à la surface du sol.

D'après le tableau 8, où cette notation est mise en relation avec l'intensité des pluies⁽¹⁾ et l'aspect de la surface, on constate que le flaquage n'est observé, en présence des faciès F_0 ou F_1 , que pour de très fortes intensités. Au contraire, en présence du faciès F_2 il est observé pour des intensités de l'ordre de 1 à 2 mm/h. Ceci signifie qu'une

(1) Cf. Annexe 6 pour les modalités d'enregistrement pluviographique.

TABEAU. 8. - FORMATION DE FLAQUES LORS D'EPISODES PLUVIEUX OBSERVES DIRECTEMENT.

site période n° observation	DATE de L'EPISODE PLUVIEUX	OBSERVATION DES FLAQUES (1)	INTENSITE PLUVIOMETRIQUE mm/h	ETAT DE LA SURFACE DU SOL		
				FACIES de la SURFACE	ETAT HYDRIQUE A DEBUT DE LA PLU (couleur)	
PALAISEAU AUTOMNE - (parcelles ICo et IIAo)	27.11.81	0	12	F1	Foncée mais mot de II Ao claire ↑ Foncée ↓	
	28.11.81	0	3			
	4.12.81	0	3,5			
	8.12.81	+	20			
	15.12.81	0	1,5			
	22.12.81	+	4	F2		
	5.01.82	++ ++	1 2			
	23.01.82	0	< 1			
	29.01.82	+	1			
	10.03.82	+	4			
	11.03.82	+	2,5			
	PRINTEMPS (parcelle P1N1a)	29.04.82	0	15		Fo
4.05.82		0	1,5	F1	claire	
5.05.82		0	5		foncée	
6.05.82		0	2,5		foncée	
16.05.82		0	2		claire	
MONTLUEL - AUTOMNE 1 (parcelles P27N1a et P28N1a)	6.10.82	0	< 1	F2	↑ Foncée. ↓	
	7.10.82	0	2			
	8.10.82	14h00	+			3
		16h00	+			4,5
	13.10.82	14h30	++			92
		15h00	+			4
		16h00	+			1,5
	14.10.82	16h00	0			1
	16h30	+	5			
MONTLUEL - AUTOMNE 2 (parcelles P16N2 b2)	13.10.82	14h30	++	92	↑ Foncée ↓	
		15h00	ε	4		F1
		16h00	ε	1,6		F2
	14.10.82	16h00	0	1		
		16h30	+	5		
	23.10.82		0	0,5		

(1) cf. Annexe 8.2.

proportion importante des pluies qui tombent au cours de la période correspondant au faciès F₂, stagne ou ruisselle sur de plus ou moins longues distances. Le faciès F₂ coïncide donc bien avec un régime d'excès d'eau à la surface du sol, ceci le distinguant du faciès F₁.

Une observation plus détaillée des flaques permet de mettre en évidence leur rôle particulier dans la mise en place et le développement du faciès F₂. On note les traits suivants :

- après un certain délai d'établissement, la dimension et la profondeur des flaques suivent avec un bref décalage (quelques dizaines de secondes) les variations d'intensité de la pluie. A la suite d'une pluie les flaques subsistant disparaissent immédiatement si l'on perturbe sur quelques millimètres la couche superficielle. Les flaques évoquées ici sont donc bien exclusivement liées à une mauvaise infiltration à la surface du sol, et non à la saturation d'une partie du profil.
- La localisation des flaques coïncide de façon stricte avec les petites cuvettes où est notée en surface la présence de petits amas de texture fine et de couleur foncée. A la fin de la pluie, on note que de nouveaux petits amas ont été formés à la périphérie et au centre des flaques.
- Les flaques sont approvisionnées par un ruissellement diffus de fines lames d'eau qui recouvrent de façon apparemment homogène l'ensemble de la surface non submergée. Dans les conditions de réalisation des observations ($0 < I \leq 92 \text{ mm.h}^{-1}$), nous n'avons jamais pu observer directement d'arrachement de particules par l'eau en mouvement et ceci correspond bien à l'absence de figures de type rigoles d'érosion. Par contre, on perçoit aisément les mouvements et le dépôt de certaines particules visibles à l'oeil nu : le long d'un versant de micro-dépression occupée par une flaque, on voit se déposer des sables en bas de pente et, en bordure de flaque où la vitesse d'écoulement de la lame d'eau s'annule, de petits débris organiques. On obtient alors la configuration typiquement sédimentaire illustrée par les clichés IXa et IXb.
- Lorsque l'intensité pluviométrique est modérée, les flaques sont limpides. Elles deviennent troubles sous l'effet du vent ou des gouttes de pluies lors d'un épisode de forte intensité. Ceci peut provenir d'une part de la projection par les gouttes de particules solides dans la flaque (effet splash), d'autre part de la remise en suspension de dépôts situés au fond ou autour de la flaque.

Ainsi les flaques jouent un rôle privilégié dans la mise en place des croûtes stratifiées typiques du faciès F₂. Mais ce

n'est pas exclusivement en leur sein que se réalisent la séparation et le tri des particules élémentaires, ceux-ci s'opérant au moins pour partie en amont, au sein des écoulements diffus qui les approvisionnent. Quoi qu'il en soit la variation des régimes d'infiltration apparaît bien à la fois comme une conséquence et comme une cause, de l'évolution morphologique. Ce lien complexe ne peut être analysé que si l'on caractérise de manière plus fine le régime d'infiltration et son évolution.

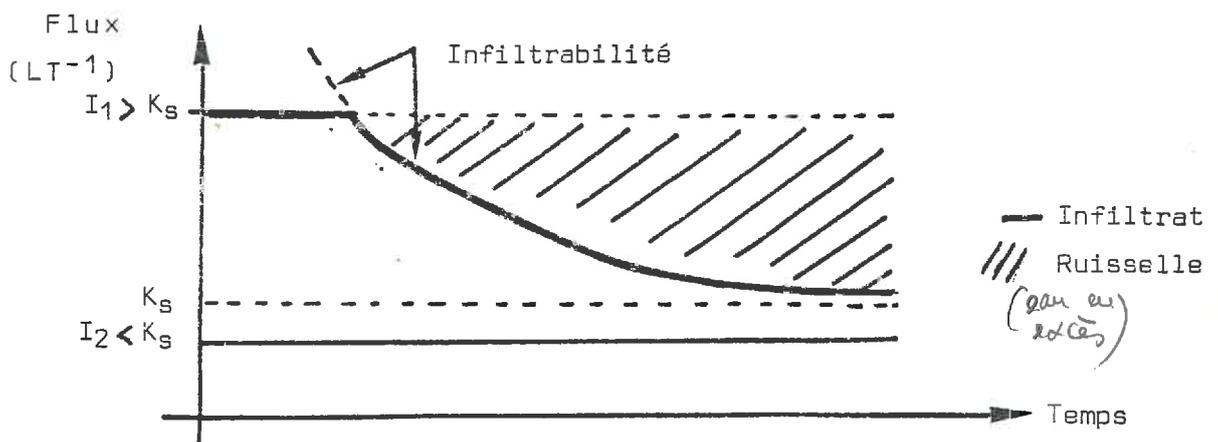
B/ - Schéma général de l'infiltration

La répartition de la pluie entre infiltration et excès d'e (détenu dans les flaques ou ruisselé) dépend :

- de l'intensité pluviométrique,
- des gradients de potentiel dans le sol et de leur évolution au cours de la pluie,
- de la conductivité hydraulique des couches où a lieu l'écoulement, qui dépend elle-même de leur état hydr que, de leur porosité et de sa configuration.

a) - Considérons un sol homogène initialement non saturé, soit K_s sa conductivité hydraulique en régime saturé. Nous supposons que ce sol ne se dégrade pas, K_s restant constant et homogène au sein du profil.

On peut représenter cette répartition selon le schéma ci-dessous où sont envisagés deux cas d'intensités pluviométriques, supposées constantes.



A chaque instant la surface du sol présente une certaine infiltrabilité, définie par HILLEL (1974) comme le flux maximum qu'elle peut absorber lorsqu'elle est maintenue en contact avec de l'eau à la pression atmosphérique. L'infiltrabilité tend vers K_s , au fur et à mesure que diminuent les gradients de succion. Pour une intensité pluviométrique donnée supérieure à K_s le délai d'apparition de l'excès d'eau en surface sera d'autant plus important que le sol sera plus sec au départ. Une des formulations les plus courantes pour décrire l'évolution de l'infiltrabilité est celle de PHILIP (1969) :

$$i = \frac{1}{2} s t^{-1/2} + K$$

avec i : infiltrabilité K : constante ($K \approx K_s$)

s : sorptivité, paramètre qui traduit l'évolution de la succion matricielle et de la conductivité, et dépend à la fois de l'état initial et de la constitution du sol.

- b) - Mais la dégradation de la structure du sol correspond à la formation en surface de couches de perméabilité plus faible que celle des couches sous-jacentes. On ne peut plus considérer le sol comme homogène. HILLEL (1964) exprime le flux d'infiltration q_i à la surface d'un sol croûté, non saturé au départ, en admettant l'établissement d'un régime d'écoulement stationnaire. Ceci revient à considérer, sous la croûte, une zone de transmission d'humidité constante. La croûte étant supposée saturée, on obtient :

$$q_i = K_s^C \cdot \frac{h_o + h_i + z_i}{z_i} = K^U \quad (\text{Rel. 1})$$

où K_s^C et K^U désignent les conductivités hydrauliques respectivement de la croûte (donc saturée) et de la zone de transmission (en principe non saturée) ; h_o est la hauteur de submersion, h_i le potentiel de succion qui s'exerce à la base de la croûte, c'est-à-dire correspondant à l'humidité de la zone de transmission ; z est la cote verticale comptée à partir de la surface de la croûte, z_i étant celle de la base de la croûte.

Selon ce schéma, si l'on part d'un sol sec, le système s'ajuste par l'intermédiaire du gradient de potentiel de $\frac{h_i}{z_i}$, les zones sous-jacentes restant non saturées⁽¹⁾. Par contre, si l'on part d'un sol humide, l'accroissement du gradient de potentiel au sein de la croûte peut se réaliser par augmentation de la charge hydrostatique à la surface du sol (flaquage), alors que la première modalité d'auto-régulation est impro-

(1) En effet, puisque $K_s^C < K^U$ le flux à travers la croûte serait forcément inférieur à celui traversant les couches sous-jacentes.

bable : on ne voit pas comment l'humidité du sol pourra diminuer sous la croûte alors qu'on apporte de l'eau.

- c) - Au cours du temps, la dégradation structurale engendre, priori, une évolution des paramètres K_s^C , z_i et, dans une certaine mesure, K^U , aboutissant globalement à une diminution de q_i . Nous devons nous efforcer d'appréhender cette évolution, en la dégagant des influences contingentes (termes h_0 et h_1) qui influent sur le régime d'infiltration.

1.3.2. - Elaboration d'une méthode d'étude du régime d'infiltration

A/ - Inconvénients des méthodes usuelles

Elles consistent selon les cas :

- à imposer une charge hydrostatique constante à la surface du sol (méthodes du type "double anneau" ou dérivées), et à mesurer les flux d'infiltration,
- à imposer les flux d'apport à l'aide d'un simulateur de pluie et à mesurer les débits de ruissellement (VALENTI 1981),
- à prélever des échantillons cylindriques de manière à déterminer leur conductivité hydraulique au laboratoire

Elles ont donc comme point commun de fortement perturber la surface étudiée. D'autre part, les méthodes employées au champ mettent en oeuvre des doses importantes dont l'apport est en lui-même facteur de dégradation (on ne caractérise donc pas l'état du sol à un instant donné), et qui par ailleurs humectent des profondeurs importantes. Il en résulte que l'influence propre de la surface peut être masquée par celle de discontinuités plus profondes. On a donc cherché à mettre au point une méthode de mesure des flux d'infiltration qui fasse intervenir de faibles apports d'eau, réalisés de façon rigoureusement non destructrice, c'est-à-dire sans énergie cinétique et sur sol déjà humide pour éviter les effets d'éclatement.

B/ - Principe de la méthode retenue

Elle consiste à apporter l'eau à débit constant à partir d'une source ponctuelle qui est l'orifice d'un tube capillaire ali-

menté à partir d'un réservoir à niveau constant. Cette source, placée au niveau de la surface du sol, débite au goutte à goutte ; la charge hydrostatique est nulle en l'absence de flaques. Il se forme autour du gouteur une zone mouillée au centre de laquelle on observe un disque saturé aisément repérable par un film d'eau brillant. Au bout d'un certain temps, ce disque ne s'étend plus. C'est la surface S (ou le diamètre D) de cette tache saturée, en état d'équilibre apparent, qui fait l'objet de la mesure.

Dans le sol, le volume où apparaît de l'eau libre a la forme d'un demi-ellipsoïde de révolution, d'autant plus proche d'un cylindre que l'humidité initiale est plus élevée et la dose totale apportée plus importante.

Si l'on suppose un écoulement homogène au sein de ce cylindre et l'établissement d'un régime stationnaire au bout d'un délai suffisant, la relation qui s'établit entre Q et D peut s'écrire :

$$Q = \frac{\pi \cdot D^2}{4} : (E + q_i)$$

ou E est le flux d'évaporation, q_i le flux d'infiltrabilité à travers la tache saturée.

Ainsi, si l'on place à la surface du sol des gouteurs de débits différents et constants, on aura au bout d'un certain temps, en négligeant l'évaporation⁽¹⁾ :

$$D = \left(\frac{4}{\pi} \cdot \frac{Q}{q_i} \right)^{1/2}$$

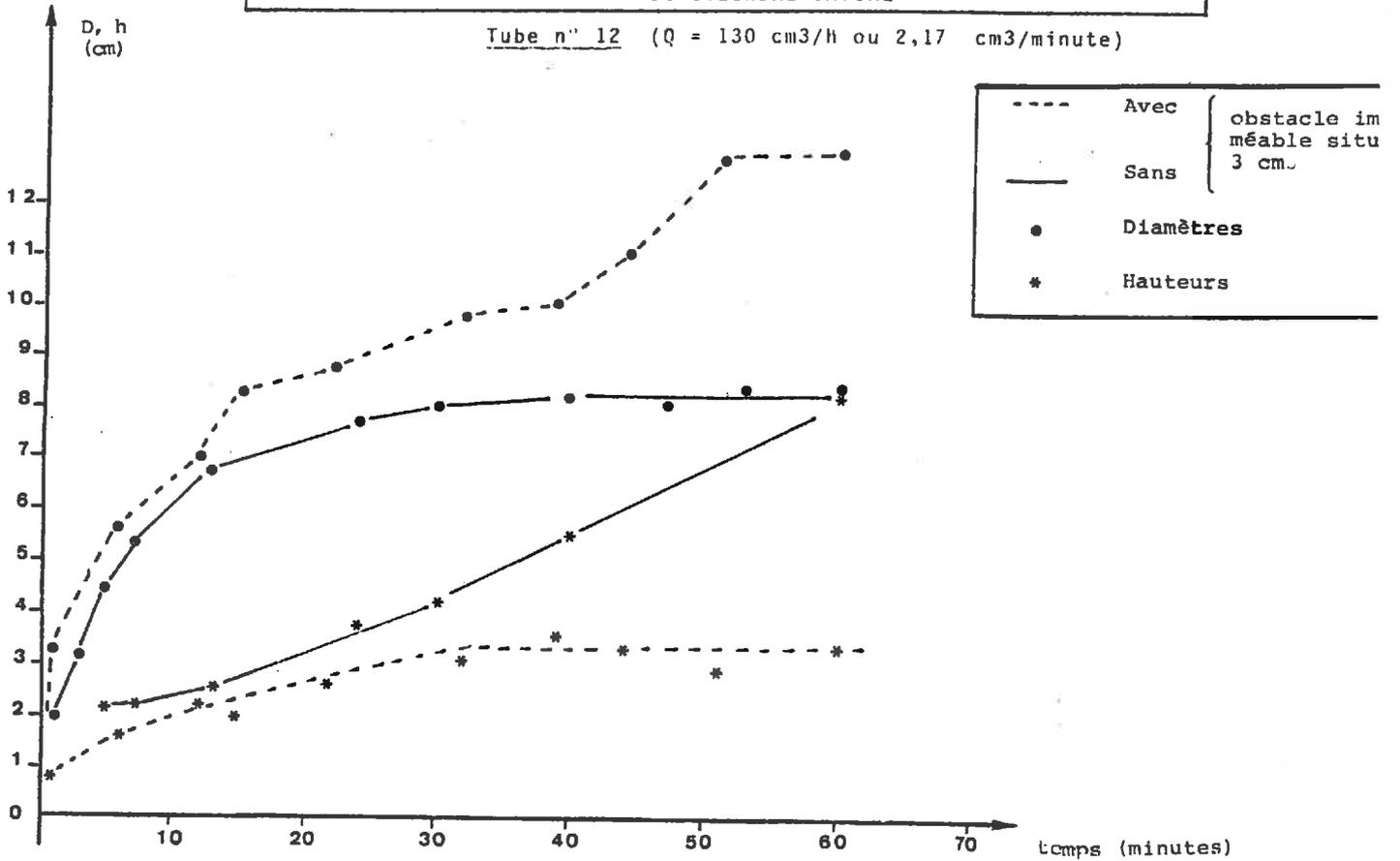
Si q_i est constant d'une tache à l'autre, on aura donc une relation de forme $D = u Q^{1/2}$ avec $q_i = \frac{4Q}{\pi \cdot u^2}$ (q_i en $\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$; D en cm, Q en $\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$). Un cas particulier remarquable satisfaisant à cette condition est celui pour lequel $q_i \approx K_s^C$ ce dernier terme étant supposé homogène dans l'espace. C'est en effet dans cette situation que l'on peut mettre en relation q_i et l'état structural du sol. Il faut pour cela que les gradients de potentiel hydrostatique (terme h_0) de la relation 1) et matriciel (terme h_i) soient nuls, c'est-à-dire qu'il n'y ait pas de submersion et que le sol soit initialement très humide.

La dégradation structurale doit entraîner, toutes choses restant égales par ailleurs (termes h_i et h_0 constants et, dans l'idéal, nuls), une augmentation du coefficient u.

(1) Pour les expériences dont les résultats seront finalement pris en compte, on a $E < 0,2 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ et toujours $E < 0,05 q_i$.

FIG7 : EVOLUTION DU DIAMETRE MOYEN D ET DE LA HAUTEUR EQUIVALENTE h DU CYLINDRE SATURE

Tube n° 12 (Q = 130 cm³/h ou 2,17 cm³/minute)



C/ - Modalités pratiques

Une gamme de débits de 7 à 270 cm³/heure est obtenue en utilisant des capillaires en Teflon de diamètre et de longueur variables alimentés à partir de cuves à niveaux constants. Les débits des tubes sont étalonnés en fonction de la température (dans l'intervalle 5-25°C on observe des relations linéaires), qui est mesurée dans les cuves lors de chaque opération sur le terrain. L'extrémité de chaque tube capillaire repose sur un petit support qui peut être fiché dans le sol, ainsi les gouttes se forment à proximité immédiate de la surface⁽¹⁾.

Au bout d'un délai de l'ordre de 30 minutes, un premier balisage des taches est effectué à l'aide de petites épingles. En général l'état initial étant humide, les dimensions des taches sont alors pratiquement fixées, et un balisage définitif a lieu au bout de 45 à 60 minutes. Si les taches sont bien centrées autour du goutteur et de forme circulaire, on mesure directement les diamètres. Si les taches sont excentrées et de forme irrégulière, on reproduit les contours sur une plaque transparente et les surfaces sont ensuite mesurées au planimètre ; on calcule ensuite le diamètre du disque de même surface.

Les incertitudes relatives sont d'environ :

- . 10 à 15 % pour les débits < 25 cm³/h
- . 5 % pour les débits > 25 cm³/h
- . 5 à 10 % pour les diamètres > 4 cm (soit plus de 75% des cas)
- . 10 à 15 % pour les diamètres < 4 cm

Le plus souvent 10 à 20 goutteurs sont disposés sur la même parcelle.

Il convient de s'interroger sur l'interférence éventuelle de discontinuités très peu perméables situées plus ou moins profondément.

Au temps t à partir de l'installation d'un goutteur de débit Q , la profondeur h du volume saturé supposé cylindrique et de diamètre D (qui lui même dépend de t) est donnée par la relation :

$$h = \frac{4}{\pi} \frac{Q}{P - \theta_i} \cdot \frac{t}{D^2(t)}$$

avec P porosité totale, θ_i humidité volumique initiale

(1) C'est à dire à environ 3-4 mm de hauteur, ce qui permet à la goutte de se former sans contact avec le sol.

Dans les conditions d'expérience de Palaiseau, où le problème se pose (fond de façons superficielles très compact situé de 6 à 8 cm sous la surface), on peut prendre, $P - \theta_1 \approx 0,30$. D'après les valeurs de diamètres obtenues dans les conditions de dégradation structurale la plus faible, on constate alors que, surtout pour les forts débits, un risque existe d'atteindre le fond de façon superficielle entre 30 et 60' lorsque celui-ci est peu profond. C'est ce qu'illustre la fig. 7, où sont reproduits les résultats d'une expérience complémentaire consistant à comparer les taches se formant avec ou sans interruption du drainage interne grâce à une plaque imperméable située à faible profondeur (les résultats d'ensemble de cette expérience figurent en annexe 11).

En fait, l'interférence du "fond" se traduit par une reprise nette de l'expansion des taches et est donc aisément détectable. Les quelques cas accidentels où cette interférence a eu lieu ont donc pu être éliminés sans difficulté.

1.3.3. - Résultats et discussions

A/ - Forme et variabilité des relations diamètre-débit

Les relations diamètre-débit sont étudiées en utilisant deux types d'ajustements :

$$D = a Q^b$$

et $D = u Q^{1/2} + v$ (régression linéaire $D = uQ^{1/2} + v$ sous contrainte $v = 0$)

Les résultats concernant les parcelles les plus régulièrement suivies dans les sites figurent dans le tableau 9 où ils sont mis en parallèle avec l'évolution de l'état hydrique de la surface.

Il apparaît d'emblée nécessaire de distinguer différents groupes de mesures qui ne peuvent a priori pas être interprétées sur les mêmes bases :

- a) - Tout d'abord on constate (colonne 4) que la dégradation de la surface entraîne à un moment donné une modification importante de l'aspect des taches (flaquage et écoulement)
- b) - D'autre part, il s'avère (colonne 3) que les mesures ont été réalisées dans des conditions hydriques variables malgré le souci de n'opérer qu'en conditions humides ; le terme h_1 de la relation 1 n'est pas constant lors de l'installation des goutteurs ; et ceci nous amène à exa-

TABLEAU.9.- EVOLUTION DES RELATIONS DEBITS-FORMES DES TACHES SATUREES

SITE et PERIODE OBSERVATION	DATE de MESURE	HUMIDITES MASSIQUES 0. ā-3 cm.	ASPECT des TACHES	Ajustement $D=a Q^b$			Ajustement $D=U Q^{1/2}$	
				a	b	r^2	u	$1 - \frac{s'^2}{s^2}$
PALAISEAU AUTOMNE	20.11	24,0	Bien circulaires, sans flaques, bien centrées	0,83	0,56	0,82	1,13	0,87
	24.11	24,0	id.	1,27	0,48	0,87	1,11	0,82
	26.11	22,8	id.	1,49	0,49	0,87	1,42	0,82
	30.11	24,4	id.	3,16	0,32	0,88	1,47	0,67
	9.12	25,9	id.	5,70	0,22	0,73	1,88	< 0
	17.12	30,8	Flaques excentrées par rapport au goutteur, coulant vers dépressions et orifices	5,09	0,27	0,58	2,40	0,61
	22.01	29,1	A nouvelle situation antérieure au 17.12	2,53	0,33	0,74	1,55	0,60
	2.02	26,5	Flaques sur la plupart des taches	3,68	0,26	0,55	1,66	< 0
	11.02	22,8	Flaquage très prononcé	4,70	0,21	0,66	1,70	< 0
	17.03	21,8	id.	1,73	0,43	0,74	1,38	0,55
MONTLUEL PRINTEMPS	30.04	19,9	Bien centrées et sans flaques	1,13	0,33	0,66	0,52	0,66
	6.05	20,0	id.	1,25	0,40	0,88	0,79	0,67
	10.05	15,3	Léger flaquage	0,57	0,47	0,77	-	-
	25.05	9,2	Flaques excentrées	0,64	0,53	0,86	-	-
	31.05	13,5	id.	0,74	0,47	0,73	-	-
	23.06	23,4	Tâches flaquées et excentrées et instables (Expansion et retrait)	0,07	0,99	0,81	-	-
MONTLUEL AUTOMNE 1	23.09	19,1	Bien centrées et sans flaques	0,54	0,50	0,86	0,53	0,78
	28.09		Taches flaquées et excentrées	mesures non réalisées				
	7.10	25,2	id. sur les goutteurs à fort débit	0,80	0,57	0,87	1,20	0,86
MONTLUEL AUTOMNE 2 (2)	26.10a	24,4	Bien centrées mais léger flaquage sous les goutteurs de gros débit	0,85	0,36	0,73	0,53	0,19
	26.10b	22,5		1,85	0,23	0,54	0,73	0,61
	10.11.	26,6	Flaques excentrées	2,36	0,34	0,79	1,34	0,74

(1) s'^2 : variance résiduelle ; s^2 : variance totale
 Pour les mesures d'automne à Montluel, ces ajustements sont réalisés uniquement pour les débits $\leq 100 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$

(2) Les 3 mesures correspondent à différents états similaires à ceux de P16.N2b2, obtenus à des dates antérieures puis préservés par des bâches.

miner dans quelle mesure des variations de ce terme ont pu subsister après mise en équilibre des taches, affectant les mesures d'infiltrabilité ainsi réalisées. Ne disposant pas de déterminations de potentiel à fortes humidités (qui auraient nécessité des mesures sur massifs non remaniés, puisque dans cette gamme de potentiels la structure influe sur la relation potentiel-humidité), nous nous contenterons de situer les humidités massiques initiales par rapport à la saturation des agglomérats (saturation de la porosité dite texturale, qui correspond à des teneurs respectivement de 19,7 et 24,8 % à Palaiseau et Montluel). En effet, on peut supposer que cette référence correspond à une discontinuité dans la relation potentiel-teneur en eau, et que, pour des teneurs en eau supérieures, l'eau apportée circule principalement dans une porosité de type structural de dimension millimétrique, la circulation se rapprochant alors d'un écoulement saturé. Cette condition est toujours remplie initialement à Palaiseau et rarement à Montluel, où cependant la teneur en eau initiale est dans 9 cas sur 12 supérieure à 19 %, valeur à partir de laquelle il est probable que les apports d'eau réalisés permettent de rapidement réaliser la condition susdite sur une profondeur de plusieurs centimètres⁽¹⁾

L'examen des relations diamètre-débit permet de distinguer 3 cas-types en relation avec ces deux facteurs de discrimination (a) et (b).

. 1er cas : l'humidité initiale correspond à la saturation de la porosité texturale ou n'en est pas très éloignée ; il n'y a pas de flaquage apparent (on peut donc admettre momentanément que le terme h_0/z_i est négligeable). Ceci correspond dans chaque site aux séries de mesure qui font suite à l'exposition du sol aux pluies (par exemple les 4 premières séries à Palaiseau). Les coefficients de détermination des deux ajustements sont alors le plus souvent assez élevés : c'est donc bien principalement par l'intermédiaire de la surface de la tache saturée que s'ajuste le système sol-goutteur ; de plus q_1 est sensiblement constant d'une tache à l'autre et vraisemblablement sinon égal, du moins étroitement lié à K_s .

. 2ème cas : la surface est initialement humide, mais les taches saturées correspondent à des flaques plus ou moins profondes (de 2 à 10 mm environ, éventuellement en communication avec des points d'infiltration privilégiée (trous de vers, fissures créées par le gel)). Ce cas est typiquement observé à Palaiseau les 17/12 ; 2/02 ; 11/02. Il correspond pour les ajustements diamètre-débit à des coefficients de détermination en général un peu plus faibles que dans le cas précédent, à des exposants b inférieurs à 0,5, et donc à une mauvaise

(1) à des profondeurs supérieures à 3 cm, les humidités sont toujours supérieures à celles indiquées ici.

adéquation du modèle $D = u Q^{1/2}$. L'ajustement du système sol-goutteur se réalise non seulement par l'intermédiaire de la section du filtre mais aussi par le terme h_0 c'est à dire la profondeur de la flaque. En corollaire, l'hétérogénéité d'une tache à l'autre est importante car les sites correspondant à chaque tache sont nécessairement, au champ, plus ou moins différents du point de vue microtopographique. Les flux d'infiltration que permettent de calculer ces résultats seront supérieurs à K_s . Ils n'ont pas nécessairement de signification par rapport à l'ensemble de la parcelle, car le rapport des surfaces soumises à l'apport d'eau vis à vis du nombre et de la taille des exutoires assurant l'infiltration peut être au niveau d'une tache très différent de ce qu'il est à l'échelle de toute la parcelle (échelle de quelques m^2).

. 3^{ème} cas : l'humidité est, avant le début de l'apport d'eau, relativement faible (cas des séances des 10, 25, et 31/05 à Montluel). Le terme h_1 est alors probablement prédominant; et il y a même peut être encore des flux latéraux non négligeables au moment où la mesure intervient, bien que la tache saturée semble figée. Les coefficients de détermination sont assez élevés, l'exposant b est proche de 0,5. Par contre, les coefficients a sont nettement plus faibles (indiquant des taches moins étendues pour un débit donné) que pour les dates où l'humidité initiale était supérieure alors même que la surface était moins dégradée (les faibles valeurs de a correspondent à des flux d'infiltration élevés). Un résultat analogue se retrouve le 17/03 à Palaiseau : la surface du sol étant alors plus dégradée que le 9/12, les taches sont plus petites. Les flux d'infiltration que permettent de calculer ces résultats seront supérieurs à K_s . Ils sont contingents de l'humidité initiale et ne peuvent être mis en relation de façon spécifique avec la structure de surface.

Abstraction faite des résultats correspondant à ce dernier cas type, on remarque que pour chaque site et période d'observation, il y a une évolution cohérente des résultats au cours du temps. Les premières séries de mesures correspondent au cas type n° 1 et il y a une transition plus ou moins graduelle (ceci apparaît particulièrement dans le cas du site de Palaiseau en consultant les 6 premières lignes du tableau 9) vers le cas type n° 2, avec augmentation des coefficients a et u et diminution de l'exposant b ⁽¹⁾.

(1) Cette diminution correspond probablement à l'intervention d'une charge hydrostatique, perceptible par un léger flaquage au centre des taches, pour les goutteurs de fort débit (nous avons nettement observé ceci le 9/12).

TABLEAU. 10.- CONFRONTATION DES FLUX D'INFILTRATION MESURES AVEC LE COMPORTEMENT SOUS LA PLUIE ET L'ETAT DE LA SURFACE DU SC

SITE	PERIODE D'OBSERVATION	DATES	FLUX MOYEN D'APRES LES TACHES SATUREES NON FLAQUEES mm/h	INTENSITE PLUVIOMETRIQUE I PROVOQUANT LE FLAQUAGE mm/h	ETAT de la SURFACE	
					FACTES	REMARQUES
PALAISEAU	AUTOMNE	23 au 24/11	10,0	I > 12	F1	Tout début de formation des plaques
		27 au 28/11	10,3	I > 12	F1	
		29/11 au 1/12	6,3 5,9	20 > I > 3,5	F1	Plaques bien formées
		15 au 16/12	3,7	6 > I > 1,5	F2	Tout début d'apparition des croûtes sédimentaires
		22/12 au 5/01	< 1	1 > I	F2	croûtes plus épaisses et étendues
		22 au 23/01	5,0	I > 1	F2	Désorganisation croûtes par le g
		11/02 au 11/03	2,2	2,5 > I	F2	Fissures refermé
MONTLUEL	PRINTEMPS	29 au 30/04	47,1	I > 15	F0-F1	Plaques encore non perceptibles
		30 au 16/05	20,4	I > 5	F1	Plaques biens formées
	AUTOMNE 1	10 au 23/09	45,3	pas d'observation	F0-F1	Plaques encore non perceptibles
		23/09 au 6/10	8,8	40 > I	F2	Tout début d'apparition des croûtes sédimentaires
	AUTOMNE 2	13 / 10	46,0	92 > I > 4	F0	Etat fragmentaire initial
			24,1		F1	Tout début de formation des croûtes
		25/10 au 10/11	7,1	21 > I	F2	Tout début d'apparition des croûtes sédimentaires

En définitive pour mettre en relation les flux d'infiltration mesurés avec l'évolution morphologique de la surface du sol, nous procéderons de la manière suivante :

- les résultats correspondant au cas type n° 3 seront écartés ;
- ceux correspondant au cas type n° 2 le seront également, mais nous valoriserons certaines mesures individuelles de diamètre faites sur des taches sans flaques : q_1 étant alors estimé au niveau d'une tache grâce à la relation :

$$q_1 = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

- ceux correspondant au cas type n° 1 seront utilisés en calculant q_1 à partir du paramètre u lorsque l'ajustement $D = uQ^{1/2}$ est satisfaisant, et à partir des couples surfaces-débits de taches individuelles non flaquées et correspondant à des débits inférieurs à $100 \text{ cm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ lorsque ce n'est plus le cas.

B/ - Première étude des flux d'infiltration sans flaquage

Correspondant à la définition de l'infiltrabilité, les valeurs ainsi calculées peuvent être confrontées d'une part aux intensités pluviométriques qui provoquent le flaquage⁽¹⁾, d'autre part à l'évolution de la morphologie de la surface. Cette confrontation est présentée dans le Tableau 10.

Il en ressort tout d'abord que les résultats de la méthode utilisée ne sont pas en contradiction avec ceux de l'observation du flaquage, qui bien entendu ne fournit pas toujours des fourchettes très précises (compte tenu des intensités pluviométriques effectivement enregistrées). En associant les deux types de données on aboutit à une description cohérente et continue de l'évolution de l'infiltrabilité du sol humide au cours de la dégradation structurale.

Il y a une bonne correspondance entre l'évolution morphologique de la surface et celle des flux d'infiltration observés. La diminution de l'infiltrabilité du sol humide est très importante dans les tout premiers stades de la dégradation, en relation avec la rapide disparition des fragments les plus fins et le développement des plaques caractéristiques du faciès F₁. Le cas type n° 2 précédemment indiqué correspond sensiblement au faciès F₂. Lors

(1) déterminées soit par observation directe (Cf. Tableau 8) soit par observation de symptômes de ruissellement.

de la transition entre les deux types de faciès, on observe des flux d'infiltration qui se situent respectivement à environ 2 h à Palaiseau et 8 mm/h à Montluel. Par la suite l'infiltrabilité continue vraisemblablement à diminuer par suite de l'épaississement et de l'extension des croûtes sédimentaires : on observe, notamment à Palaiseau des valeurs inférieures à 1 mm h⁻¹. Par contre, le gel peut à nouveau augmenter l'infiltrabilité qui rediminue ensuite, les fissures se rebouchant.

L'évolution de l'infiltrabilité du sol humide est donc progressive. Par contre, ses principales conséquences, le ruissellement et la formation de flaques, sont, par nature, discontinues. Elles correspondent à une condition à seuil ($I_p > q_i$) dont la réalisation est elle-même soumise :

- aux intensités I_p et hauteur de pluies
- à l'état de dégradation de la surface du sol

Cette réalisation devient de plus en plus probable puisque l'infiltrabilité décroît. D'après l'Annexe 6.3. où nous avons regroupé les épisodes pluvieux par classes d'intensité, il apparaît que la transition entre les deux faciès morphologiques correspond sur les deux sites à un accroissement très sensible des risques de flaquage et de ruissellement. Dès lors on comprend le caractère quasi définitif -sauf remaniement accidentel ou desiccation prononcée- de l'installation de la phase 2.

Nous reviendrons plus précisément dans la 2ème partie sur les relations entre état de la surface et infiltrabilité du sol humide. Mais d'ores et déjà la cohérence générale des résultats permet de conclure à l'intérêt de la méthode proposée et à son adéquation au type d'hétérogénéité spatiale et chronologique rencontrée.

1.4. - CONCLUSION DE L'APPROCHE DESCRIPTIVE : SCHEMA GENERAL DE DEROULEMENT DU PHENOMENE

Il s'avère possible de présenter une description commune de l'évolution structurale des différentes situations observées. De plus, la généralité des correspondances entre les différents signes morphologiques de la dégradation d'une part, entre ces signes et l'évolution du régime d'infiltration d'autre part, nous conduit à un schéma d'ensemble du déroulement du phénomène étudié. Celui-ci peut être résumé en trois points principaux.

- a) - Il convient tout d'abord de distinguer, d'une part la mince couche superficielle (0 à 15 mm maximum de profondeur par rapport à la surface initiale) qui subit directement l'impact des gouttes et la redistribution spatiale des particules solides ; d'autre part, les couches sous jacentes.

Ces dernières subissent une augmentation progressive de compacité essentiellement due à un rapprochement des fragments. Les phénomènes de désagrégation n'y semblent pas très poussés et il ne semble pas qu'il y ait, au cours de l'évolution, un changement marquant dans la nature des processus mis en jeu.

La couche superficielle présente une évolution plus complexe et plus poussée. Celle-ci peut être assimilée à la succession de trois grands types de faciès morphologiques qui se distinguent nettement à toutes les échelles d'observation.

- b) - Dans le temps il y a donc lieu de considérer deux grandes phases de dégradation :

- une phase initiale de fermeture de la surface, au cours de laquelle se forment, sans séparation des constituants élémentaires, des croûtes "structurales" de 1 à 3 mm d'épaisseur. Pendant cette phase, à laquelle correspond le faciès F₁, l'infiltrabilité décroît mais reste supérieure à l'intensité pluviométrique de la majorité des épisodes pluvieux.
- une phase ultérieure de type sédimentaire, au cours de laquelle, s'opèrent une séparation très poussée et un tri des constituants granulométriques, et se forment des croûtes stratifiées dans les zones de dépôt: on a alors le faciès F₂. Ces processus de désagrégation et de transfert sont liés à l'apparition fréquente et prolongée d'excès d'eau stagnants ou en mouvement à la surface du sol, l'infiltrabilité étant devenue plus faible que l'intensité de nombreux épisodes pluvieux.

- c) - La diminution progressive de l'infiltrabilité, interrompue ou ralentie uniquement du fait de facteurs extérieurs au système étudié (gel, dessiccation, faune du sol), est sans doute à la fois une conséquence et un moteur de la dégradation structurale et lui confère son caractère irréversible.

En effet, on peut penser que l'excès d'eau est tout d'abord en lui-même une condition favorable à la destruction des agrégats terreux : il permet une imbibition rapide des agglomérats sur toute leur périphérie, ce qui réduit les possibilités de dégazage et favorise l'éclatement ; et peut autoriser

localement une dispersion temporaire des colloïdes. Par ailleurs, l'apparition d'excès d'eau à la surface du sol rend possible l'entraînement et le dépôt en phase liquide de particules solides d'où un tri plus ou moins poussé de particules selon leur taille et de leur densité.

La conjonction de ces processus rend compte de l'importance de la séparation des constituants granulométriques pendant deuxième phase de la dégradation, et de la formation de croûtes stratifiées qui elles-mêmes présentent une très faible perméabilité comme l'attestent les mesures d'infiltration et la présence d'abondantes vésicules dans les microhorizons sous-jacents. La probabilité de réalisation d'excès d'eau est donc accrue et le phénomène s'auto-aggrave.

Bien que ce schéma général de la dégradation, succession de faciès et sa relation avec la dynamique de l'eau en surface apparaisse remarquablement uniforme⁽¹⁾, celle-ci n'en présente pas moins une grande variabilité : au cours des phases, l'évolution des critères d'état structural se déroule à des vitesses différentes selon les situations étudiées. Ceci signifie que certains caractères liés au sol, à l'histoire culturale ou au climat influent sur l'intensité des processus de la dégradation sans en modifier la nature.

(1) La relecture des résultats antérieurs (SEBILLOTTE, 1966 BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976) où la dynamique de l'eau n'avait pas été observée directement, s'avère très cohérente avec ce schéma.

2 - ELABORATION D'UNE DEMARCHE EXPERIMENTALE

Ayant mis au point des moyens de description du phénomène qui en donnent une première vision cohérente, nous devons à présent :

- définir les modalités expérimentales permettant de caractériser et faire varier les trois grands facteurs qui contrôlent la dégradation structurale : pluie, constitution des matériaux du sol, état structural initial.
- identifier et appréhender les variables intermédiaires permettant de relier la description de la dégradation aux variations de ces facteurs.

Sur chacun des deux sites précédemment mentionnés, le programme expérimental a été axé sur différentes catégories de facteurs : étude de l'effet des pluies et de l'état initial à Palaiseau ; étude du rôle de la stabilité structurale en interaction avec différentes périodes climatiques à Montluel.

2.1. - PRINCIPAUX FACTEURS A CONSIDERER, CONSEQUENCES POUR LES TRAITEMENTS ET CONTROLES EXPERIMENTAUX

2.1.1. - Variables liées au climat

A/ - Rôles et caractérisation des pluies

On peut distinguer :

- l'effet mécanique de l'impact des gouttes de pluie. Il est à mettre en relation avec leur énergie cinétique (MIHARA, 1951 ; WISCHMEIER et al., 1958 ; FREE, 1960) et avec leur quantité de mouvement (ROSE, 1960). Pour les pluies naturelles, la taille des gouttes qui détermine leur vitesse terminale (LAWS, 1941, GUNN et KINZER, 1949), est liée à l'intensité (LAWS et PARSONS, 1943, BEST, 1950 ; HUDSON, 1963). A partir de ces données expérimentales WISCHMEIER et SMITH (1958) ont proposé l'équation suivante :

$$E = 11,9 + 8,7 \log_{10} I \quad (\text{Re} 2)$$

Avec E en $J.m^{-2} . mm^{-1}$ et I en $mm.h^{-1}$

Cette relation permet de déterminer l'énergie cinétique des pluies à partir d'enregistrements pluviographiques⁽¹⁾. On peut discuter

(1) Cf. Annexe 6

sa fiabilité quant à l'évaluation exacte de l'énergie cinétique (HUDSON, 1981) mais ce mode de caractérisation s'est avéré très efficace pour la prédiction des pertes en terre.

- L'apparition d'eau libre en surface, dont nous avons précédemment mentionné les effets possibles. La réalisation de cet événement dépend des valeurs respectives des flux d'apport (intensité pluviométrique) et d'infiltration.
- Modification de l'état hydrique du sol. Celui-ci influe sur les propriétés mécaniques et structurales du matériau sur l'infiltrabilité et sur le volume d'air susceptible d'être comprimé lors de l'imbibition des fragments terre. Il conditionne donc l'efficacité des deux influences précédentes, et doit être contrôlé aussi fréquemment que possible. Cet enregistrement permet de prendre en compte sans les étudier en eux-mêmes, une grande partie du rôle des autres facteurs climatiques et l'ensemble de la dynamique de l'eau au sein du profil, qui ne font pas partie de notre objet d'étude. Les mesures sont réalisées par la méthode gravimétrique, les prélèvements étant effectués respectivement sur les fragments de surface, à un ou deux niveaux dans l'horizon ameubli par les façons superficielles H_1 ; à plusieurs niveaux dans l'horizon labouré non repris H_2 . Elles sont complétées par des notations visuelles de couleur de surface qui permettent de bien suivre les variations rapides d'humidité (Annexe 8.2.).

En définitive, il est assez difficile de distinguer les différents effets de la pluie par la simple observation puisqu'ils sont tous plus ou moins étroitement liés à l'intensité. On est au contraire tenté de rechercher une caractérisation globale, attitude qui a d'ailleurs prévalu en matière d'érosion. A la suite des travaux de WISCHMEIER et SMITH, deux indices se sont avérés étroitement corrélés aux pertes en terre et sont couramment utilisés pour évaluer l'érosivité d'un épisode ou d'une séquence de pluies :

- . l'indice EI, produit de l'énergie cinétique de l'ensemble de la pluie par l'intensité calculée d'après la plus forte chute de pluie survenant en 30 minutes au cours de l'averse. Pour une séquence de pluies on somme les indices EI correspondant à chaque averse.
- . l'indice KEx, qui consiste simplement à sommer les énergies cinétiques correspondant à des pluies d'intensité supérieure ou égale à un certain seuil $x^{(1)}$.

(1) En milieu tropical, on a souvent pris $x = 25$ mm/h (HUDSON, 1981, citant différents travaux). En milieu tempéré MOYER (1977), a proposé $x = 10$ mm/h.

La caractéristique commune de ces deux indices est de renforcer considérablement le poids du paramètre intensité par rapport à celui qu'il détient dans la relation 1. Nous avons retenu la deuxième forme, sans fixer a priori de valeur x , ce qui permet une description assez détaillée des séquences pluvieuses, les durées de pluie inférieures à 30' pouvant être prises en compte.

B/ - Obtention d'une variabilité

. Choix de pluies naturelles - caractéristiques des campagnes étudiées

Pour contrôler les caractéristiques des pluies la plupart des expérimentateurs ont recours à différents types de simulateurs de pluie, utilisables en laboratoire ou au champ.

Différents problèmes se posent dans l'utilisation de ces appareils, notamment la difficulté d'obtenir des énergies cinétiques aussi importantes, à même intensité, que celles des pluies naturelles (HALL, 1974 ; BRYAN, 1974 ; VALENTIN 1979). Pour s'en rapprocher, il faut émettre les gouttes sous pression et à une hauteur de plusieurs mètres. Même pour les appareils de terrain les plus rustiques (ASSELINE et VALENTIN, 1978), les opérations de montage et de déplacement sont assez compliquées surtout s'il faut protéger le dispositif contre le vent. De plus, si l'on utilise au champ le simulateur de pluie, a contrario il faut soustraire les parcelles expérimentales aux pluies naturelles. Ces difficultés pratiques constituaient un inconvénient rédhibitoire dans notre cas compte tenu de la surface des unités d'observation, et du nombre des traitements expérimentaux.

Opérant sous pluies naturelles, nous avons donc été amené à utiliser, sur un site donné, la variabilité de répartition chronologique des pluies et de leurs caractéristiques. Pour cela, nous avons étudié, sur chaque site, plusieurs groupes de parcelles différant par la date d'exposition aux pluies. La variabilité ainsi obtenue porte d'une part sur les caractéristiques propres des épisodes pluvieux subis par le sol, à un stade donné de son évolution, mais aussi sur la position relative de ces épisodes et des autres éléments du climat (gel, évaporation). Les principaux traits de l'histoire climatique et de l'histoire hydrique du sol au cours de ces différentes périodes d'observation sont présentés sur les Fig. 8a, b, c.

FIG 8a : HISTOIRE HYDRIQUE ET CLIMATIQUE DES PARCELLES
SUIVIES À PALAISEAU (AUTOMNE-HIVER-PRINTEMPS 1981-82)

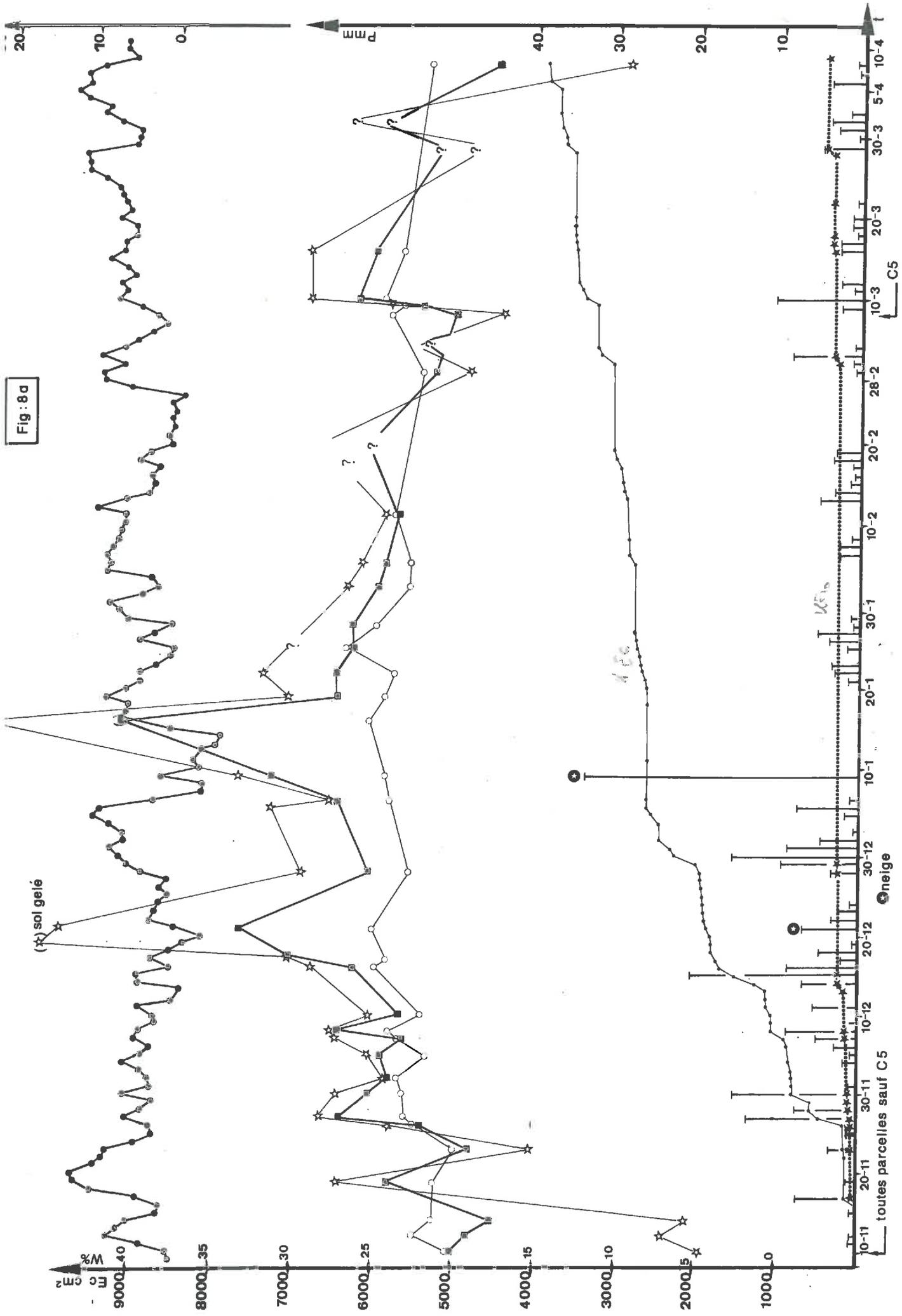
LEGENDE :

- T PLUIES JOURNALIERES (P)
- ENERGIE CINETIQUE CUMULEE (Ec)
- * INDICE KE_{10} CUMULE (même échelle que Ec)
- TEMPERATURES MOYENNES JOURNALIERES (O)
- * HUMIDITE MASSIQUE (W), FRAGMENTS DE SURFACE
- " " " , HORIZON H_1
- " " " " H_2

Les humidités correspondent aux parcelles non protégées

▲
└─ DATE DE DEBUT D'EXPOSITION AUX PLUIES D'UN
GROUPE DE PARCELLES.

Fig : 8a



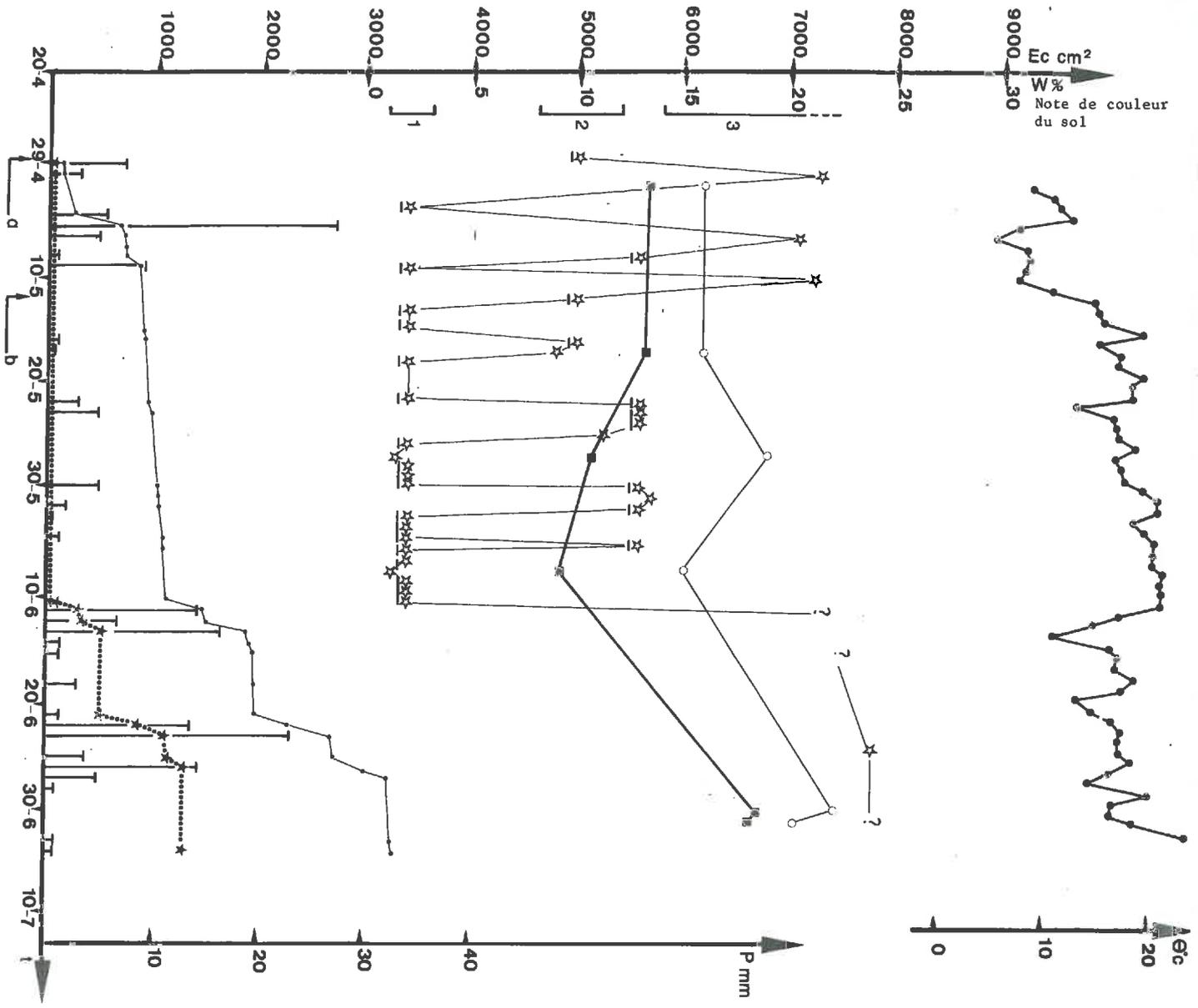


FIG 8b : HISTOIRE HYDRIQUE ET CLIMATIQUE DES PARCELLES SUIVIES À MONTLUEL (PRINTEMPS 1982)

Même légende que fig. précédente
 ☆ Humidité évaluée d'après notation de couleur en surface.

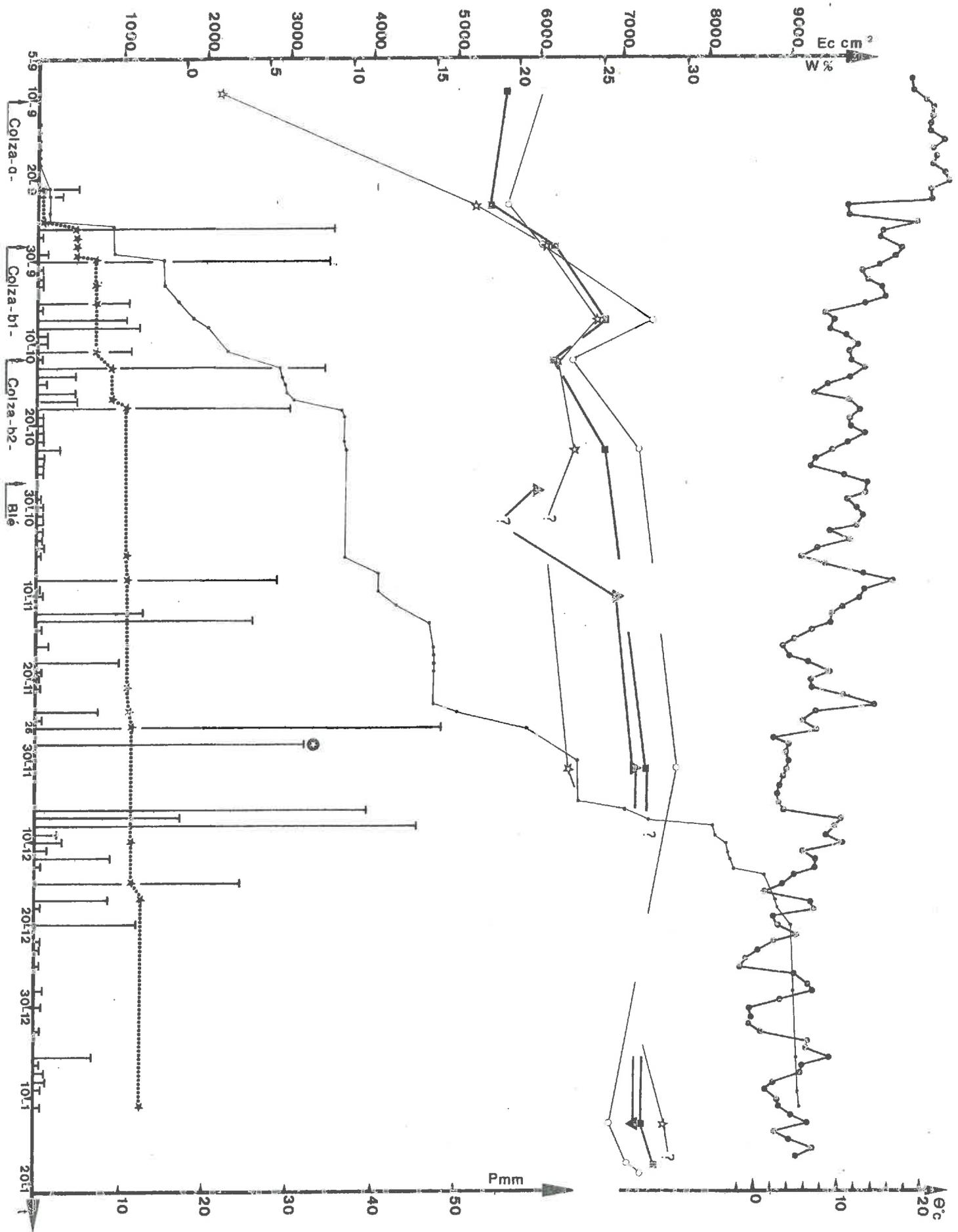


FIG 8c : HISTOIRE HYDRIQUE ET CLIMATIQUE DES PARCELLES SUIVIES
 A MONTLUEL (AUTOMNE-HIVER 1982-1983)

■ * c Même légende que figure précédente. (2) défaut d'enroulement du 26 au 30 / 11)
 ■ * c Humidités sur parcelles Colza; ▲ sur parcelles Blé

A Palaiseau, la majeure partie des précipitations sont tombées pendant la première moitié de la période d'observation. Globalement, les épisodes très intenses ont été rares. Le sol initialement très desséché en surface se réhumecte progressivement avec cependant une alternance de phases humides et de courtes périodes de dessiccation. A partir du 16.12 les fragments superficiels atteignent un maximum de teneur en eau d'environ 30 %, dépassé seulement en cas de gel dont un des effets majeurs est de porter la surface à un état de très forte humidité. Ensuite le rayonnement et la température augmentant, la surface du sol se dessèche progressivement avec de courtes phases de réhumectation consécutives aux averses du mois de mars. L'horizon H₂ présente une histoire hydrique beaucoup moins contrastée que les couches sus-jacentes.

La campagne d'observation réalisée au printemps à Montluel se caractérise par une première période de faibles pluies éparses, suivie d'une période d'orages très intenses. La température étant élevée, l'histoire hydrique des fragments de surface se présente comme une succession très rapide d'alternances d'humectation et de dessiccation très prononcée.

La campagne d'observation réalisée à l'automne à Montluel se caractérise par une hauteur de pluies très importante obtenue sous forme de pluies journalières d'intensité moyenne à forte et de longue durée. La surface du sol est constamment humide avec cependant des alternances d'humectation et de dessiccation (celle-ci restant assez peu marquée) jusqu'au début du mois de novembre.

L'annexe 6-3 montre la répartition très différente des caractéristiques des pluies entre les trois campagnes. On trouvera dans le tableau 16 en conclusion de ce chapitre, un résumé chiffré sommaire de ces données, et des gammes de variation obtenues en réalisant différentes dates d'exposition du sol aux pluies.

Essai de distinction des effets liés à l'apport d'eau et des effets mécaniques

Une approche pour réaliser cette distinction consiste à obtenir avec les mêmes caractéristiques d'apport (volume, intensité) :

a) différents niveaux d'énergie cinétique,

b) différents états hydriques du sol au moment des pluies

Les traitements expérimentaux correspondants ont été réalisés sur le site de Palaiseau :

- 1) - en protégeant certaines parcelles par des grillages placés au-dessus de la surface. L'idée de ce procédé revient à MIHARA (1951) et HUDSON (1963) qui l'avaient utilisé pour démontrer le rôle de l'énergie cinétique des pluies vis-à-vis de l'érosion. Nous l'avons reprise dans une optique d'analyse, en employant différents types de grillages qui ont permis d'obtenir 4 niveaux d'interception, correspondant respectivement à des proportions de l'énergie incidente de 100 % (parcelles non protégées), 70 %, 30 % et 20 %. Les modalités de calcul de ces évaluations sont présentées en annexe 7. Mais en modifiant l'énergie cinétique reçue on risque de changer toute l'histoire structurale de la parcelle. Par conséquent, même si le régime d'apport est inchangé, l'infiltrabilité et la dynamique de l'eau en surface sont a priori modifiées dans les parcelles protégées. Pour compléter les comparaisons, on a donc introduit deux traitements expérimentaux supplémentaires consistant à placer (ou au contraire enlever) les grillages protecteurs en cours d'évolution ce qui revient à introduire une variante "stade de dégradation de la surface" parmi les parcelles protégées et non protégées.

- 2) - en plaçant sur certaines parcelles à la base de l'horizon ameubli par les façons superficielles une bâche imperméable⁽¹⁾. Il en résulte (Annexe 8) une sensible modification de l'histoire hydrique. En période sèche (au tout début et à la fin de la période d'observation), la bâche interrompt les transferts en provenance des couches sous-jacentes, et la dessiccation de la couche superficielle est plus prononcée. En période humide il y a au contraire engorgement au contact de la bâche et les mottes de surface sont un peu plus humides. S'agissant de l'histoire hydrique il est à noter qu'on n'a pu éviter un certain effet d'ombrage des grillages (bien que ceux-ci aient été enlevés aussi souvent que possible lors des périodes ensoleillées), dont résulte un net ralentissement du rythme de dessiccation en période sèche.

2.1.2. Propriétés liées à la constitution des matériaux du sol

A/- Rôles et modalités de caractérisation

La connaissance de la composition granulométrique et de la teneur en matière organique totale des terres permet de prévoir les

(1) Préalablement déblayée, la terre de l'horizon H₁ a été ensuite replacée au dessus de la bâche. Réalisée avec précaution et sur de la terre fortement desséchée cette opération n'a engendré par rapport aux parcelles témoin qu'un léger affinement, les densités apparentes étant par ailleurs identiques sur les parcelles ainsi remaniées ou non.

comportements intrinsèques dans leurs grandes lignes (MONNIE et STENGEL, 1982 a et b), sous réserve que les matériaux considérés présentent des caractéristiques minéralogiques et ioniques moyennes, ce qui est le cas pour les deux sites où nous avons opéré. Sur le site de Montluel où la constitution organique était plus variable, on a déterminé les fractions libres et liées de la matière organique (MONNIER et al., 1962).

La stabilité structurale, propriété la plus directement concernée d'après l'ensemble des travaux relatifs au thème étudié, a été caractérisée de manière plus précise par l'intermédiaire du test d'analyse d'agrégats (HENIN et al., 1969). Les modalités de prélèvement des échantillons et de réalisation des tests sont indiquées en annexe 9.

B/ - Obtention d'une variabilité

. Choix de deux sites

Ce choix correspond avant tout à la nécessité de vérifier dans diverses conditions la stabilité des relations qui se dégagent entre le climat et la dégradation structurale. Pour cela, il était souhaitable d'expérimenter sur deux sols de caractère battant résultant de combinaisons différentes de l'influence de la constitution minérale et organique.

Les principales caractéristiques moyennes des sols des deux sites retenus sont présentées dans le Tableau 11. On note que :

- dans les deux cas existe, de par la composition granulométrique de la couche superficielle, une nette prédisposition à la battance (lignes 20 et 21). Elle est particulièrement accentuée pour le sol de Montluel.
- L'instabilité d'origine texturale est plus ou moins corrigée par la teneur en matière organique. A Palaiseau celle-ci est plutôt faible par rapport à la teneur en argile ; par contre à Montluel elle est relativement élevée (lignes 9 et 11). Ce contraste serait encore plus net en excluant les matières organiques libres (ligne 10).
- Les tests d'analyse d'agrégats rendent bien compte de ces différences entre sites : la terre de Palaiseau présente des taux d'agrégats après prétraitement alcool (ligne 14) et benzène (ligne 15) respectivement plus élevés et plus faibles que ceux de la terre de Montluel.

TABLEAU. 11. - CARACTERISTIQUES MOYENNES DES SOLS ETUDIES.

CARACTERE			SITE		
			PALAISEAU	MONTLUEL	
TOPOGRAPHIE			plane	1 partie plane + 1 partie en légère pente (4)	
FAMILLE PEDOLOGIQUE DU SOL			Sol brun lessivé sur limon	Sol lessivé dégradé à tendance glassi- que sur limon	
POSITION DANS LE PAYSAGE			Plateau	Plateau	
CARACTERES DES HORIZONS DE SURFACE	ELEMENTS GROSSIERS		Abondance (% terre totale)	environ 5	
	COMPOSITION DE LA TERRE SECHE	GRANULOMETRIE SANS DECALCIFICATION (p. mille)	Nature	gravillon siliceux	concrétions ferromanganiques
			Argile > 2 µm	203	106
			Limon 2- 20 µm	263	253
			20- 50 µm	442	425
			50- 200 µm	72	170
			200-2000 µm	20	27
	DOSAGE (p. mille)	Calcaire total	0	0	
		Carbone total	10,5	8,8	
		Carbone des fractions légères	1,6	0,9	
	100. MO. (2 fois C)/Argile			10,3	16,6
	Capacité d'échange meq/100 g			12,7	5,6
	pH (eau)			6,6	6,1
	Résultats du Test d'analyse d'agrégats			AG A %	19,3
				AG B %	3,1
AG E %				5,4	
ALM %				24,4	
Taux de dispersion : ALM/Argile + limon				0,52	
log 10 Is			1,50	1,30	
Prévision des comportements intrinsèques.			Texture (Triangle GEPPA)	Limono-Argileux	
			Classe de stabilité structurale a	instable	
			Classe d'aptitude à la fissuration a (1) b	moyenne faible et incertaine	
			Humidité à l'entrée en plasticité % (au test Proctor standard) (2)	8,7	
			Humidité équivalente % (Formule de GRAS)	21,7	
Relation Potentiel. Humidité			(1 Bar	18,6	
			(2 Bar	15,2	
			(3 Bar	8,3	
			14,0	10,0	
			5,5		

(1) D'après MONNIER et STENGEL (1982)

a : en l'absence de matière organique

b : en tenant compte de la teneur en matière organique

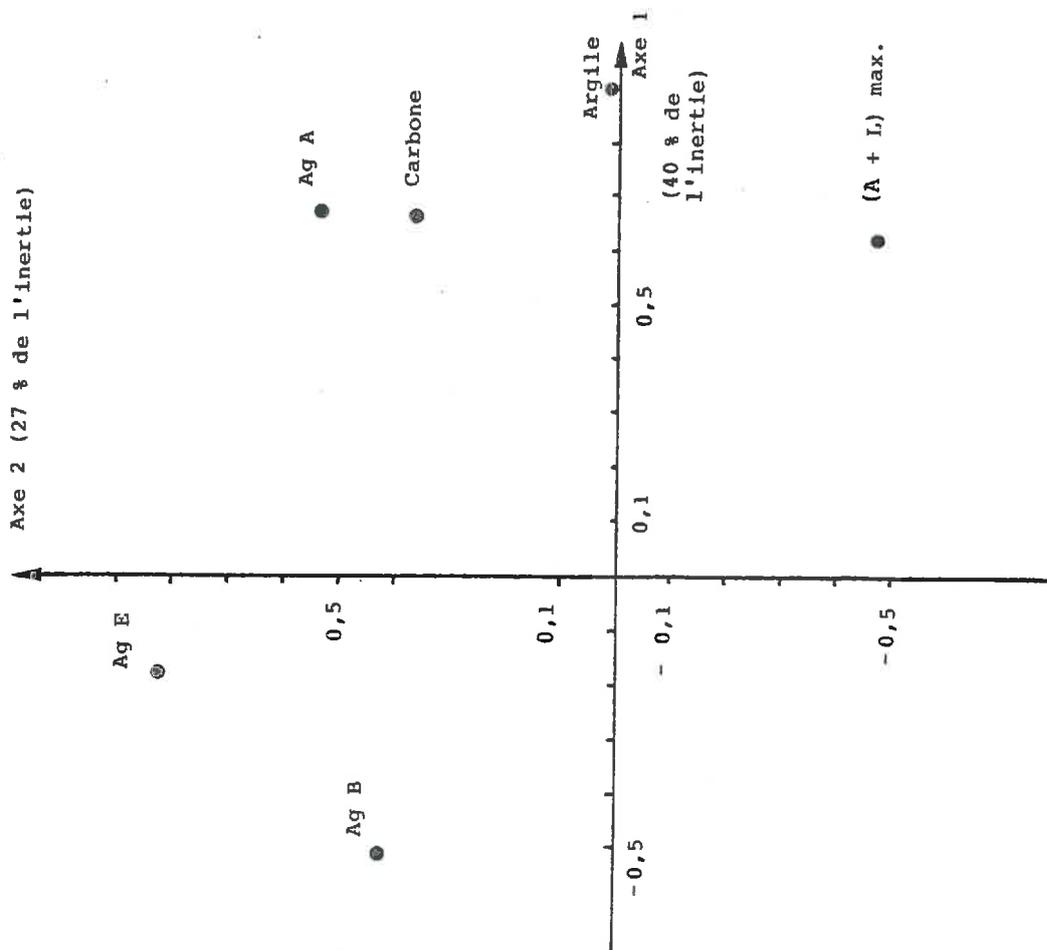
(2) D'après les résultats de GUERIF et FAURE (1979)

(3) D'après les relations établies par BRUCKLER (1983)

(4) La majorité des parcelles expérimentales ont été situées dans la partie plane.

FIG 9 : ANALYSES EN COMPOSANTES PRINCIPALES SUR LES CARACTERES ANALYTIQUES DES PARCELLES ETUDIÉES (Variables normées): CORRELATIONS DES VARIABLES AVEC LES COMPOSANTES 1 ET 2

a) SITE DE PALAISEAU (6 variables, 22 parcelles)



- Au total, l'indice I_s est plus élevé pour la terre de Palaiseau qui, si l'on s'en tenait à ce critère, devrait donc être considérée comme plus instable. Cette inversion du classement prévu d'après les références texturales, ne correspond pas aux résultats des enquêtes et observations préliminaires au choix des sites. Elle résulte en fait de l'importance accordée au paramètre $(A + 1)$ (ligne 17) dans le calcul de l'indice I_s . Ce paramètre dépend pour partie de la teneur du matériau testé en particules $\leq 20 \mu\text{m}$ ($A + 1$ matériau), ce qui défavorise ici la terre de Palaiseau plus argileuse. En fait, le véritable indice de dispersion s'obtient en établissant le rapport $(A+1)_{\text{max}} / (A+1)_{\text{matériau}}$ (ligne 18). Ce rapport n'est que légèrement supérieur pour la terre de Palaiseau.

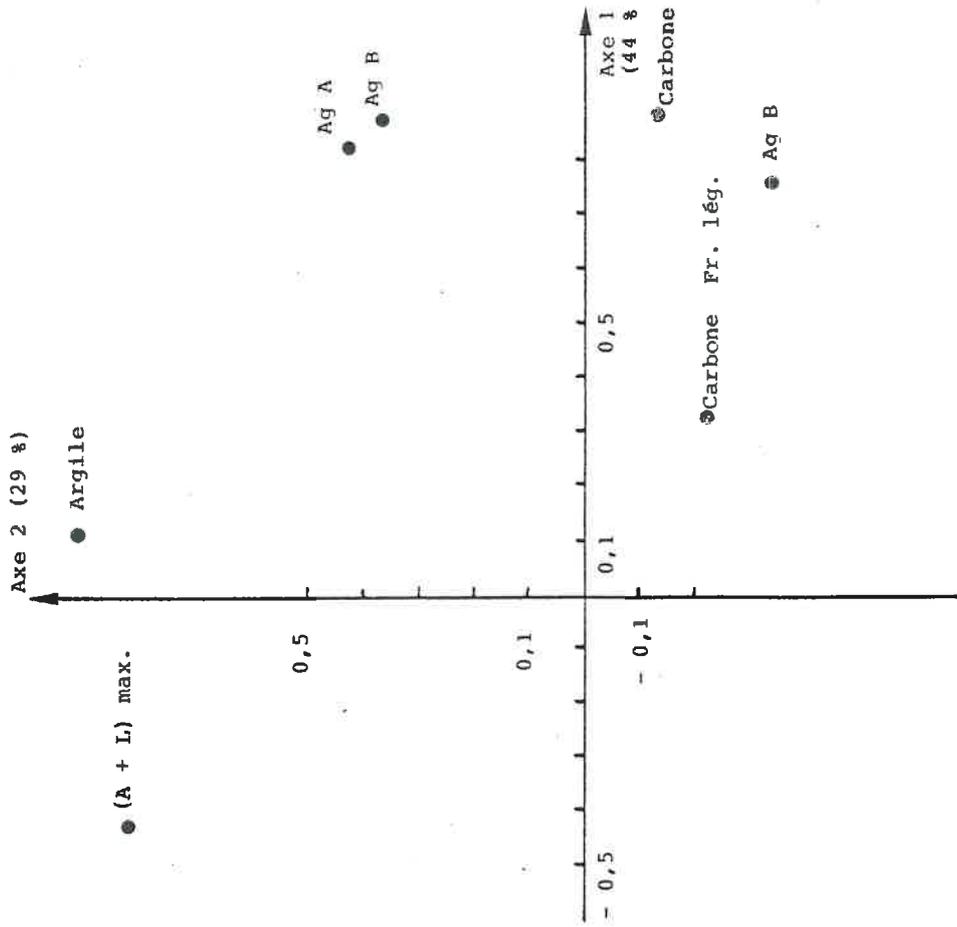
Le classement des autres propriétés hydriques et structurales est déterminé essentiellement par la différence de teneur en argile. On remarquera que, du fait de la différence de relation potentiel-teneur en eau (ligne 25) le comportement plastique au compactage dynamique correspond pour les deux terres sensiblement à la même gamme de potentiels (ligne 23).

Variabilité intra-site

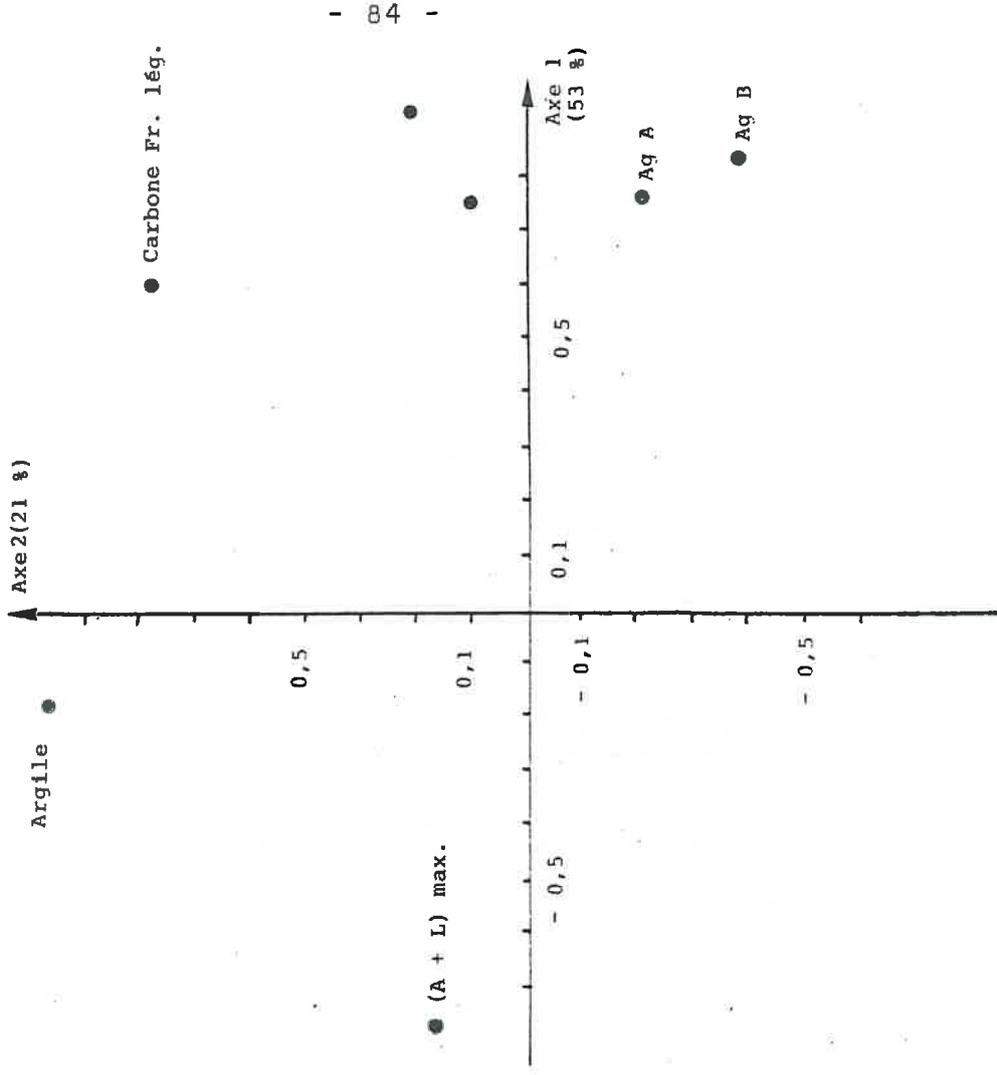
Au sein de chaque site, il y a entre les différentes unités expérimentales une certaine variabilité de constitution, ayant des répercussions plus ou moins marquées sur la stabilité structurale.

- A Palaiseau, cette variabilité est subie et correspond à celle du terrain d'expérience. L'analyse en composantes principales (Fig. 9 a) des principaux caractères analytiques concernés montre que les parcelles observées se distinguent principalement (Axe 1) par la teneur en argile et par les caractères qui lui sont liés (teneur en carbone et taux d'agrégats alcool), et secondairement par la stabilité structurale (Axe 2). La configuration des points sur le graphe de projection des individus (Annexe 10) montre que le premier axe discrimine les deux blocs du dispositif, le Bloc I étant plus argileux.
- A Montluel, la variabilité de stabilité structurale est délibérément recherchée comme traitement expérimental. Elle est obtenue en situant l'expérimentation au sein d'un champ d'essai de longue durée (SEBILLOTTE, 1968 ; BOIFFIN, SEBILLOTTE, DUBY, 1975), qui comporte trois régimes d'entretien organique du sol : rotations céréalières avec exportation ou enfouissement des pailles (respectivement A et B), rotation avec prairie (C), chaque parcelle recevant la fertilisation minérale à deux niveaux (respectivement N_1 et N_2). Ces traitements expérimentaux, mis en oeuvre depuis 1963, aboutissent à une différenciation assez marquée des statuts organiques du sol (BOIFFIN, SEBILLOTTE, TAGAUX, 1982). Nous avons donc placé nos propres unités expérimen-

b) SITE DE MONTLUEL, Printemps 1982 (7 variables, 12 parcelles)



c) SITE DE MONTLUEL, automne-hiver 82-83 (7 variables, 10 parcelles)



rimentales à l'intérieur de certaines des parcelles de l'essai, au moment de l'implantation des diverses cultures, en choisissant au sein de ces grandes parcelles des zones d'état structural aussi semblable que possible.

L'analyse en composantes principales, réalisée de manière distincte sur les deux groupes de parcelles observées au printemps et à l'automne, confirme (Fig. 9 b et c) que les unités étudiées se distinguent avant tout par la stabilité structurale et la teneur en carbone (axes 1) et secondairement par une composante qui oppose la teneur en argile et le taux d'agrégats Benzène (axes 2). Les graphes de projection des individus (Annexe 10) montrent que le premier axe distingue les parcelles de rotation A, plus pauvres en matière organique et moins stables que celles des deux autres rotations.

1.3. - Etat initial

A/ - Rôles et modalités de caractérisation

Il convient de distinguer :

- . D'une part, les relations entre la taille des fragments et leur sensibilité individuelle aux différents processus de division auxquelles nous consacrerons une étude particulière dans la troisième partie. De ce point de vue, un état structural donné se caractérise par la distribution pondérale des calibres de fragments. Celle-ci est obtenue par tamisage à sec.
- . D'autre part, l'influence des modalités de juxtaposition de ces fragments (elles-mêmes conditionnées par leur taille et leur forme). Ce sont alors des critères relatifs aux assemblages qu'il faut utiliser : participation des différentes classes de calibres de fragments au recouvrement de la surface, description morphologique et densité apparente des différents horizons de la couche labourée. Les modalités d'obtention de la plupart de ces données ont été évoquées dans le chapitre précédent. La densité apparente a été déterminée par atténuation d'un rayonnement γ à l'aide d'une sonde à transmission (SOANE et al., 1971). La principale difficulté d'emploi de cet appareil réside dans sa géométrie, le volume scruté étant un ellipsoïde de grand axe horizontal de 14 cm de long, et d'environ 2 cm de petit diamètre. Il est parfois difficile de placer ce faisceau sans rencontrer un accident structural d'où une forte variabilité des mesures.
- . Enfin, le rôle propre de la microtopographie sur les transferts d'eau et de matière solide, l'aspérimétrie étant l'instrument

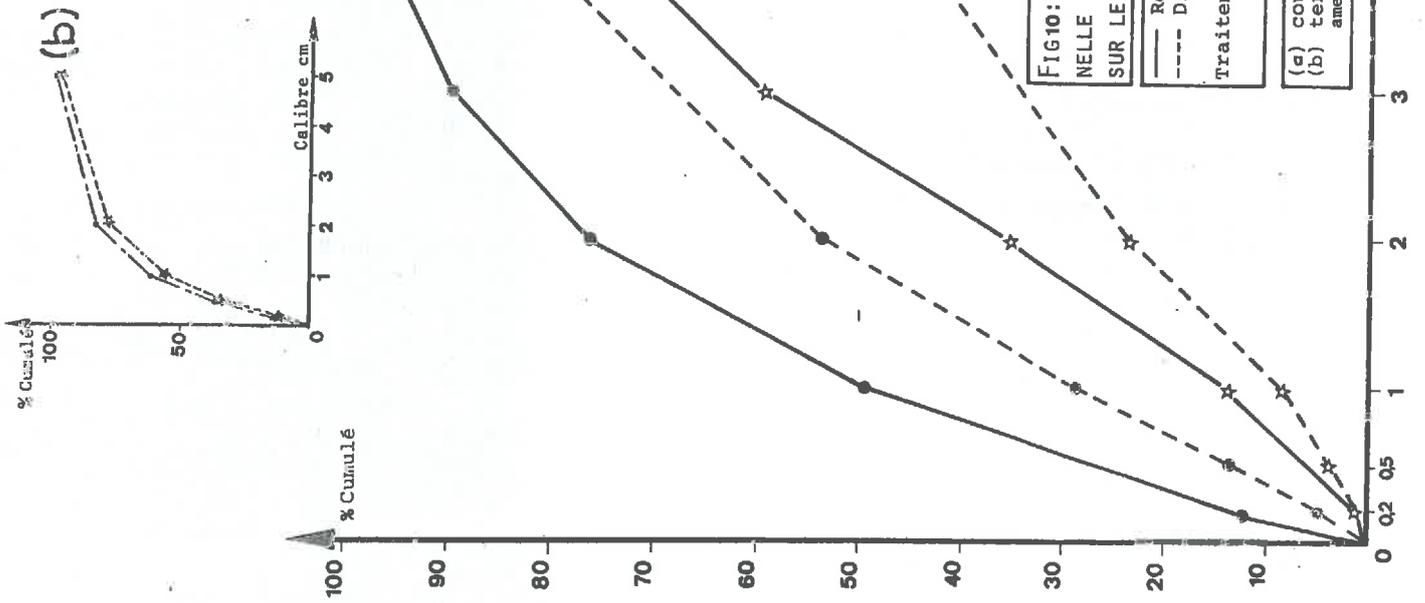


FIG 10: DISTRIBUTION DIMENSIONNELLE INITIALE DES FRAGMENTS SUR LE SITE DE PALAISEAU

— Recouvrement (% surface totale)
 --- Distribution pondérale

Traitement A *
 C ●

(a) couche superficielle
 (b) terre sous-jacente (horizon H1 ameubli par les façons superficielles)

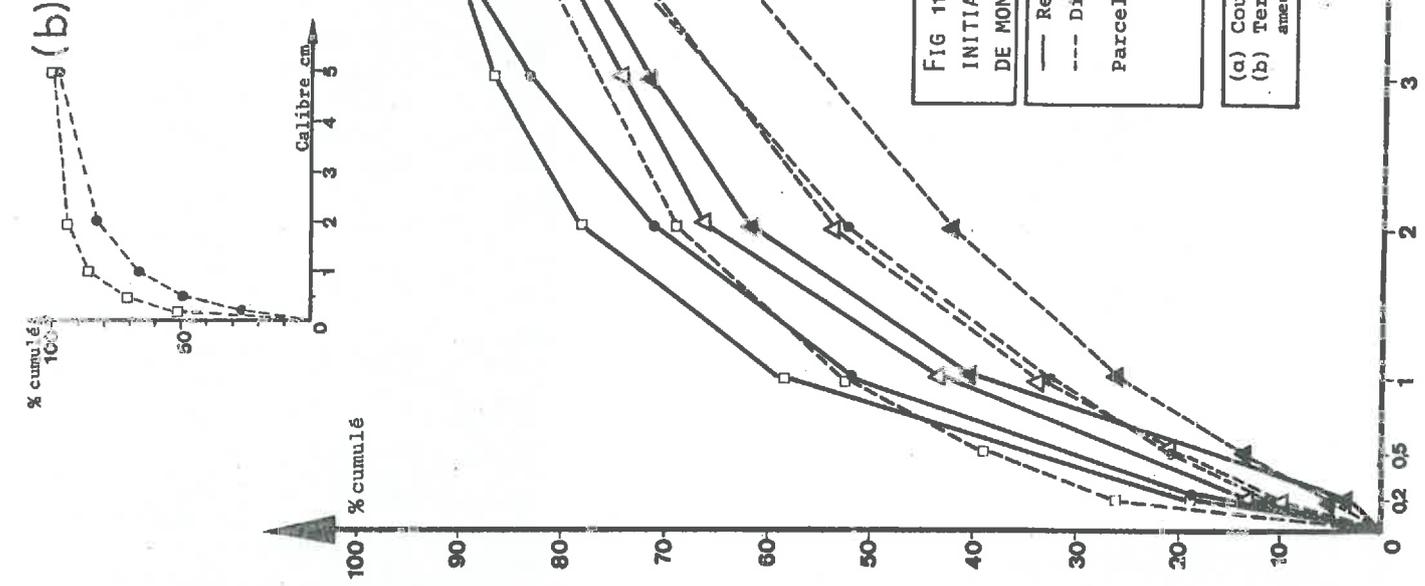


FIG 11: DISTRIBUTION DIMENSIONNELLE INITIALE DES FRAGMENTS SUR LE SITE DE MONTLUEL.

— Recouvrement (% surface totale)
 --- Distribution pondérale

Parcelles préparées pour Maïs □
 Colza ●
 Blé/Colza △
 Blé/Maïs ▲

(a) Couche superficielle
 (b) Terre sous-jacente (horizon H1 ameubli par les façons superficielles)

privilegié pour la décrire (Cf. Annexe 3.1.) et fournissant deux indices de rugosité (Ir et écart type des cotes, cf. § 1.1.1. B).

B/ - Obtention d'une variabilité

. Expérimentation spécifique réalisée à Palaiseau

Trois types d'états initiaux de l'horizon superficiel ont été réalisés grâce à différentes modalités de travail du sol. Leurs principales caractéristiques sont présentées sur la Fig. 10 et dans les Tableaux 12 et 13. On distingue :

- Un état de référence (C) sur lequel sont testés toutes les autres variantes expérimentales (pluie, histoire hydrique...). Il se caractérise par des fragments de taille réduite et une microtopographie plane et peu rugueuse.
- Un état plus motteux (A) dont la surface est plane mais beaucoup plus irrégulière.
- Un état (B) correspond au même degré de fragmentation que l'état de référence C, mais dont le microrelief présente une alternance de billons et de creux, d'où un écart-type des cotes de la surface particulièrement élevé.

Le contraste entre les états structuraux fins et grossiers est très net au niveau de la couche superficielle, et beaucoup moins accentué dans la couche sous-jacente (horizon H₁) qui est en moyenne plus affinée. Par contre, l'horizon H₂ (labouré non repris) présente dans tous les cas un aspect massif voisin de celui décrit dans le premier chapitre (Cf. Tableau 5) avec une limite supérieure très marquée que traduisent bien les mesures de densité apparente.

. Etats structuraux des autres expérimentations : site de Montluel

Sur ce site, les états structuraux des différents groupes de parcelles observées résultent des opérations d'implantation de trois cultures : maïs, colza, blé sur précédent maïs ou colza⁽¹⁾. Les principaux points à noter sont les suivants :

(1) Une fois le semis réalisé un épandage d'herbicide adéquat détruit les plantes avant la levée, au sein des unités expérimentales.

TABLEAU. 12.- INDICES DE RUGOSITE INITIAUX.

<u>S I T E</u>	<u>TYPES de PARCELLES</u> (nombre de résultats)	I_r % (écart type de I_r)	ECART TYPE MOYEN DES COTES (cm)
<u>PALaiseAU</u>	A (6)	33,5 (5,2)	2,00
	B (2)	29,0 (7,8)	2,62
	C (16)	18,3 (2,1)	1,38
<u>MONTLUEL</u>	Mais (15)	15,7 (3,1)	2,2
	Colza (10)	19,6 (5,2)	2,3
	Blé/Colza (2)	22,9 (1,1)	2,8
	Blé/Mais (2)	23,9 (1,7)	2,8

TABLEAU. 13 .- PROFILS DE DENSITE INITIAUX.

Densité moyenne
Ecart type (nombre de mesures)

SITE	TYPE de PARCELLES	POSITION PAR RAPPORT AUX PASSAGES DE ROUE EN SURFACE	PROFONDEUR des MESURES			
			HORIZON H1 (mesures à 2,5 et 5 cm)	MESURE à 7,5 cm	HORIZON H2	
					(mesure à 10 et 12,5cm)	mesures + profondes
PALAISEAU	A	Hors roue	1,05 0,07 (16)	1,47 0,10 (9)	1,47 0,09 (20)	-
	C	Hors roue	1,08 0,09 (31)	1,43 0,09 (16)	1,46 0,08 (31)	-
MONTLUEL	MAIS	Hors roue	1,18 0,08 (24)	1,20 0,15 (12)	1,30 0,14 (24)	1,24 0,13 (30)
		Roue (trace non reprise)	1,44 0,08 (12)	1,49 0,07 (6)	1,46 0,09 (12)	1,39 0,14 (12)
	COLZA	Hors roue	1,12 0,12 (12)	1,28 0,04 (6)	1,28 0,14 (12)	1,21 0,18 (24)
		Roue (Trace reprise)	1,22 0,16 (6)	1,44 0,12 (3)	1,45 0,13 (6)	1,46 0,07 (10)
	BLE/COLZA	Hors roue	1,15 0,08 (7)	1,27 0,17 (4)	1,34 0,18 (4)	1,20 0,22 (8)
		Roue (Trace reprise)	1,24 0,23 (4)	1,48 0,02 (2)	1,42 0,08 (2)	1,45 0,05 (4)
	BLE/MAIS	Hors roue	1,12 0,09 (8)	1,28 0,13 (4)	1,27 0,15 (4)	1,19 0,22 (8)
		Roue (trace reprise)	1,29 0,20 (4)	1,53 0,07 (12)	1,49 0,16 (2)	1,42 0,13 (4)

- La distribution dimensionnelle des fragments en surface (Fig. 11 a) est assez voisine de celle du traitement C' (fin, plat) de Palaiseau. Il y a cependant des variations entre les groupes de parcelles : l'état structural est d'autant plus affiné que les travaux du sol ont eu lieu en conditions plus sèches et à partir d'un état moins compact. On oppose ainsi les parcelles de blé sur maïs, plus motteuses aux parcelles préparées pour maïs, très affiné
- Les indices de rugosité (Tableau 12) sont compris dans la gamme des valeurs obtenues à Palaiseau. Les parcelles présentent un certain modelé de surface dû surtout au passage du semoir qui se traduit par un écart type des cotes relativement élevé.
- Au sein des profils, les horizons H₂ dont on avait signalé l'aspect beaucoup plus fragmentaire qu'à Palaiseau, (Cf. Tableau 5), sont effectivement beaucoup moins denses (Tableau 13) en dehors des traces de roue du dernier passage (soit sur 75 à 80 % de la surface). On notera que les mesures les plus profondes présentent une hétérogénéité particulièrement forte, due notamment à la rencontre de cavités ou de zones très poreuses dans les interbandes ou sur le fond du labour.

. Variabilité intra-parcellaire

Sur le site de Montluel où les modalités de travail du sol utilisées aboutissent à une hétérogénéité plus importante qu'à Palaiseau, des cartes d'état initial de surface de chaque parcelle ont été dressées permettant de repérer 2 ou 3 types de surface. Les placettes d'observation morphologique sont situées délibérément dans ces zones. On obtient ainsi (mais dans ce cas au niveau de la placette et non plus de la parcelle de dimension métrique) une variabilité supplémentaire qu'il sera possible de valoriser en tant que source d'information.

2.1.4. - Conclusion : récapitulation des dispositifs réalisés et des gammes de variation obtenues

Les traitements expérimentaux appliqués et la nomenclature des parcelles correspondantes sont récapitulées dans les Tableaux 14 et 15. Les gammes de variation de certains critères caractérisant de façon marquante les facteurs de variation étudiés sont présentées dans le Tableau 16.

La démarche d'ensemble recourt de façon combinée à l'expérimentation proprement dite et à l'enquête sur des situations pré-existantes. Cette combinaison nous est apparue comme le meilleur moyen pour obtenir l'effectif voulu d'unités expérimentales de dimension suffisante, différenciées suivant plusieurs facteurs de variation

TABLEAU 14.- RECAPITULATION ET NOMENCLATURE DES PARCELLES DU DISPOSITIF DE PALAISEAU.

DATE D'EXPOSITION AUX PLUTES	ETAT INITIAL de la SURFACE	MODIFICATION DE L'HISTOIRE HYDRIQUE (Bâche à la base de l'horizon superficiel)	TYPE de PROTECTION PAR LES GRILLAGES : % DE L'ENERGIE CINETIQUE INCIDENTE RECUE						
			100	70	30	20	30 % puis 100 % (changement le 8.01.82)	100 % puis 30 % (le 8.01.82)	
10.11.81	A : grossier, plat	non	I Ao	/	/	/	/	/	
		oui	I A6	/	/	/	/	/	
	B : fin, billonné	non	I B0	/	/	/	/	/	
		C : fin, plat	non	I Co	I C4	I C3	I C7	I C1	I C2
oui	I C6		/	/	/	/	/		
8.03.82	C : fin, plat	non	I C5	/	/	/	/	/	
← - - - -	mêmes traitements répétés (indice II)	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - -	- - - - →	

TABLEAU 15.- RECAPITULATION ET NOMENCLATURE DES PARCELLES DU DISPOSITIF DE MONTLUEL.

PERIODE D'OBSERVATION	CULTURE PREVUE DANS LES PARCELLES	DATE d'EXPOSITION aux PLUTES	TRAITEMENTS EXPERIMENTAUX DU CHAMP D'ESSAI											
			ROTATION A				ROTATION B				ROTATION C			
			Bloc 1		Bloc 2		Bloc 1		Bloc 2		Bloc 1		Bloc 2	
N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	
PRINTEMPS 1982	MAIS	a. 29.04.82	10.1a	10.2a	20.1a	20.2a	1.1a	1.2a	19.1a	19.2a	12.1a	12.2a	22.1a	22.2a
		b. 12.05.82	-	10.2b	-	-	-	1.2b	-	-	-	12.2b	-	-
AUTOMNE-HIVER 1982-83	COLZA	a. 10.09.82	-	16.2a	28.1a	-	-	14.2a	24.1a	-	-	3.2a	27.1a	-
		b ₁ . 28.09.82	-	16.2b ₁	-	-	-	-	-	-	-	3.2b ₁	-	-
		b ₂ . 12.10.82	-	16.2b ₂	-	-	-	-	-	-	-	3.2b ₂	-	-
	BLE	précédent Maïs	a. 27.10.82	-	10.2a	-	-	-	-	-	-	12.2a	-	-
		précédent Colza		-	4.2a	-	-	-	-	-	-	2.2a	-	-

TABLEAU. 16.- GAMMES DE VARIATION OBTENUES.

<u>CRITERES</u>		<u>PALaiseAU</u>		<u>MONTLUEL</u> PRINTEMPS		<u>MONTLUEL</u> AUTOMNE	
		Maxi	Mini	Maxi	Mini	Maxi	Mini
<u>PLUIES</u> <u>RECUES</u> (1)	Hauteur Totale mm	315,1	46,4	177,5	122,2	563,4	350,0
	Ec totale J/m ²	3819	596	3.225	2.334	9.135	5.501
	KE 10 total J/m ²	418	48	1.312	1.276	1.208	207
<u>CARACTE-</u> <u>RISTIQUES</u> <u>DU SOL</u> (2)	Argile ‰	22,1	18,0	12,1	9,7	11,4	8,1
	Carbone ‰	11,4	9,8	9,5	7,4	11,8	7,6
	Ag A %	24,1	13,9	17,3	10,4	18,0	9,9
	Ag B %	3,6	2,7	12,4	6,0	11,9	5,9
<u>ETAT</u> <u>INITIAL</u> <u>DE LA</u> <u>SURFACE</u> (3)	Indice de rugosité Ir	40,5	14,5	23,3	10,1	27,5	9,7
	% surface couverte \ll 0,2 cm	25,0	0	40,0	10,0	36,0	0
	par fragments \ll 2 cm	85,0	30,0	90,0	60,0	90,0	55,0

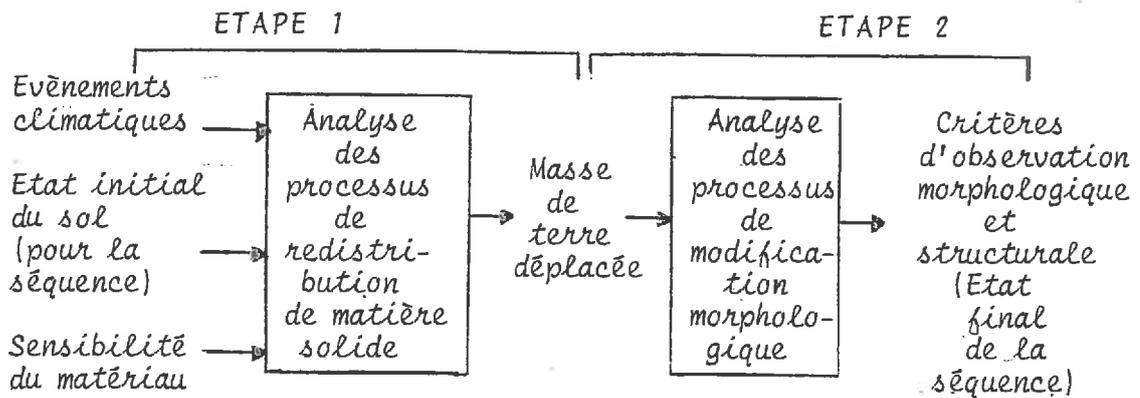
- (1) : Variabilité entre groupes de parcelles
 (2) : Variabilité entre parcelles (3 x 2 m²)
 (3) : Variabilité entre placettes (0,50 x 35 m²)

En contrepartie de la grande diversité des situations ainsi obtenues, nous devons nous attendre à rencontrer certaines complications dans la séparation des variables, nécessitant des précautions dans l'interprétation des résultats.

2.2. - Principes et modalités d'analyse du phénomène

2.2.1. - Principes de la démarche d'analyse

L'approche descriptive et la première analyse qui ressort de sa confrontation avec le régime d'infiltration nous ont fourni les principaux éléments de décomposition spatiale (deux sous-systèmes verticaux, l'un superficiel de 10-15 mm d'épaisseur, l'autre sous-jacent limité par la première couche non meuble rencontrée en profondeur) et chronologique (deux phases successives de dégradation) du système étudié. Il convient à présent d'examiner quelles sont les données et les méthodes qui peuvent nous permettre de réaliser les deux étapes que nous nous sommes tracées pour analyser le phénomène de dégradation structurale⁽¹⁾, étapes que l'on peut représenter selon le schéma ci-dessous :



En fait, cette démarche n'est pas applicable de la même façon aux différents domaines spatiaux considérés car la notion de "masse de terre déplacée" est selon les cas plus ou moins réaliste.

(1) Cf. § 4 de l'introduction

- A la surface du sol le déplacement de matière solide semble relativement accessible à la description. D'une part la morphologie initiale peut être observée avec une certaine précision et sans destruction ; d'autre part, la redistribution spatiale des particules de terre est nettement perceptible. En schématisant à l'extrême, on peut admettre que l'évènement élémentaire de la dégradation structurale est une séparation de particules (une petite quantité de terre étant extraite de sa situation initiale) suivie d'un transfert selon des modalités et des distances variables (de l'infiniment petit à quelques dizaines de centimètres), et aboutissant à une nouvelle position. On peut donc, au moins conceptuellement, distinguer différents sites présentant des bilans de terre respectivement négatif et positif, et établir entre ces sites des équations de transfert.

- Au sein des couches sous-jacentes, la situation initiale n'est pas précisément définie (cette opération serait évidemment destructrice). Les observations mettent en évidence des réarrangements ou déformations de fragments, mais ne permettent d'invoquer ni rupture de liaisons entre particules, ni apport significatif en provenance de la surface. Dès lors, on voit mal comment localiser, même dans l'abstrait, des compartiments qui perdraient ou gagneraient de la terre. A défaut d'accéder à la répartition spatiale proprement dite de la matière solide, et à ses modifications, on ne peut caractériser celles-ci que par l'intermédiaire de leurs conséquences. Les deux étapes du schéma ci-dessus seront donc amalgamées.

En définitive il y a lieu d'appréhender deux types de variables intermédiaires :

- . les quantités de terre déplacées à la surface du sol,
- . les données permettant de décrire indirectement et globalement le remaniement structural au sein du profil

2.2.2. - Evaluation des quantités de terre déplacées à la surface du sol

A/ - Modalités du déplacement et méthodes courantes d'évaluation

Les travaux expérimentaux concernant l'érosion se réfèrent classiquement à deux modalités principales (ELLISON, 1954 ; FEODOROFF, 1963 ; KIRKBY, 1980) : le rejaillissement de particules solides lors de l'impact des gouttes ; le transport par le ruissellement. Dans ces travaux le déplacement correspond à la sortie des particules hors d'une surface émettrice bien délimitée. Il y a ainsi deux types de perte

celles qui sont entraînées par le ruissellement, et les projections qui sont recueillies indépendamment de celui-ci. Les dispositifs utilisés permettent un contrôle très précis des quantités de terre exportées et de la surface émettrice, mais différents problèmes se posent vis-à-vis de l'interprétation des résultats :

- les deux fractions recueillies ne correspondent pas de manière distincte aux modalités de déplacement : la fraction captée avec le ruissellement, est constituée pour une part indéterminée de terre préalablement déplacée par "effet splash",
- une certaine quantité de terre projetée est recyclée au sein de la surface émettrice. Elle dépend de la géométrie du dispositif (hauteur des bordures, forme et importance de la surface émettrice). Les résultats concernant le "splash" ne sont donc comparables que si les dispositifs sont standardisés (BISAL, 1950 ; ELLISON, 1947 ; KINNEIL 1974 ; de PLOEY et GABRIELS, 1980). Il est théoriquement possible de tenir compte de la géométrie des surfaces émettrice et réceptrice (FARREL et al., 1974 ; REEVE, 1982 ; SAVAT et POESEN, 1981), mais cette démarche n'a guère été mise en pratique.

En tout état de cause, opérant au champ il était exclu de recourir aux mêmes principes de collecte de matière solide. Nous avons donc été amenés à mettre au point des méthodes d'évaluation spécifiques.

B/ - Méthode d'évaluation des quantités de terre projetée

Le principe adopté consiste à placer des récepteurs à l'intérieur de la surface émettrice. Soit m_p la masse de terre projetée par unité de surface émettrice supposée constante dans l'espace pour une séquence climatique donnée, S la surface du récepteur. En l'absence du récepteur (Fig. 12 a) la surface S aurait émis une quantité de terre $m_p.S$ dont une partie A aurait été recyclée au sein de la surface, le complément C étant exporté et compensé par une quantité importée B, en moyenne équivalente s'il n'y a pas d'érosion à proprement parler au niveau de la surface étudiée

Ayant placé le récepteur, on recueille B et on cherche :

$$m_p = \frac{A + C}{S} = \frac{A + B}{S} \quad \text{en moyenne sous l'hypothèse précédente.}$$

Les quantités de terre recueillies dans le récepteur sont évidemment inférieures à m_p puisqu'on a diminué la surface émettrice.

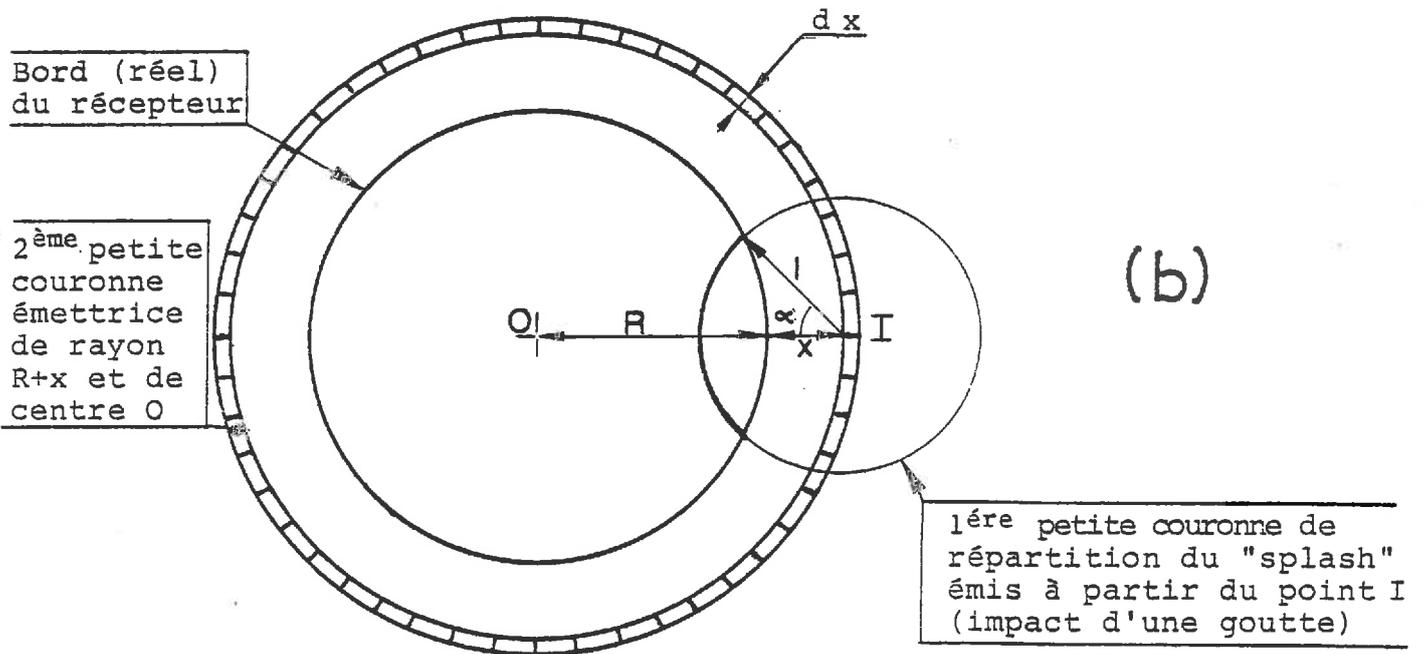
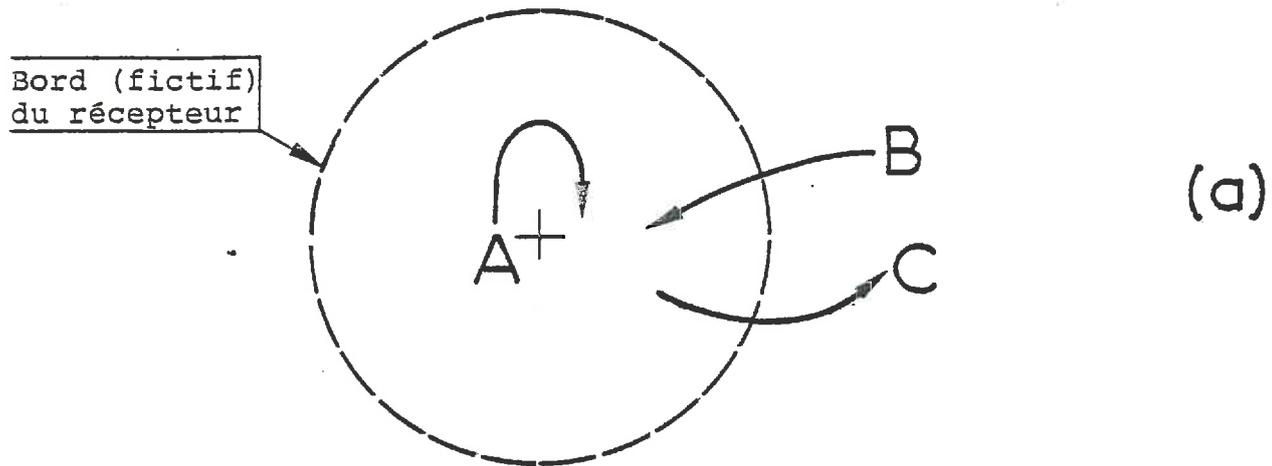


Fig 12 : SCHEMA DE L'ÉMISSION ET DE LA RÉCEPTION DES PROJECTIONS DE TERRE

- (a) En l'absence d'un récepteur
- (b) En présence d'un récepteur : éléments de modélisation de la fonction f

On a :

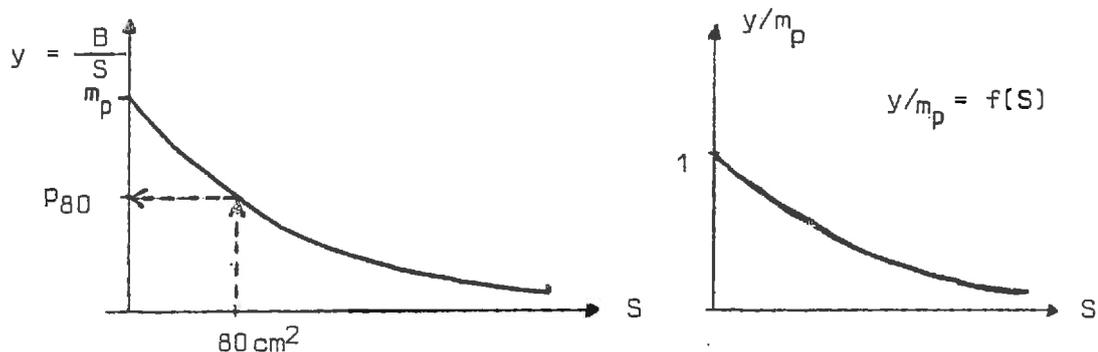
$$\frac{B}{S} = m_p - \frac{A}{S} \quad (\text{rel. 3})$$

Le terme $\frac{A}{S}$ est inconnu ; mais on peut penser que :

. si $S \rightarrow \infty$ $\frac{A}{S} \rightarrow m_p$ (une surface infiniment grande n'a plus d'échange avec l'extérieur)

. si $S \rightarrow 0$ $\frac{A}{S} \rightarrow 0$ (pour une surface infiniment petite, la terre projetée est entièrement exportée)

On est donc conduit à supposer que la relation 3 prend l'allure donnée par les schémas ci-dessous :



D'où l'idée d'utiliser un jeu de récepteurs de surface variable permettant de reconstituer cette courbe et de déterminer m_p par extrapolation en utilisant un ajustement de forme :

$$y = a e^{-bs}$$

où a serait un estimateur de m_p et e^{-bs} une approximation de la fonction f . Intuitivement on peut penser que b dépendrait de la distance de projection des particules. Cette démarche rejoint celle de BOLLINE (1975, 1980, 1982) qui, s'étant lui-aussi orienté vers un système de récepteurs interne à la parcelle, met en évidence l'influence de la surface du récepteur sur les résultats mais préfère s'en tenir à une seule surface standard.

. Réalisation

L'utilisation de récepteurs de taille variable n'engendrant pas à nos yeux, de complication majeure et étant susceptible d'apporter une information supplémentaire, nous avons disposé au sein de chaque unité expérimentale (parcelle) 12 récepteurs circulaires amovibles⁽¹⁾ relevés à différentes

(1) Correspondant à 6 rayons de 2,7 à 7 cm (surfaces de 22 à 154 cm^2).

dates. Le bord des récepteurs est très légèrement surélevé (1 à 2 mm) par rapport à la surface du sol afin de ne pas collecter le ruissellement. Dans la gamme des surfaces utilisées les quantités pesées vont de 0,1 g à 10 g environ, ce qui permet de considérer comme très secondaires les erreurs dues aux manipulations et aux pesées vis-à-vis de l'hétérogénéité spatiale des projections recueillies. En contrepartie, la valeur α de surface réceptrice est assez éloignée de la moyenne des valeurs expérimentales, ce dont résulte un intervalle de confiance important sur la valeur α , d'autant que la variabilité résiduelle de y est assez importante. Ceci nous conduit :

- d'une part, à caractériser chaque courbe par une valeur p_{80} correspondant à un récepteur de 80 cm², surface moyenne des récepteurs pour laquelle l'intervalle de confiance est minimum.
- d'autre part, à tenter d'approcher la fonction f par une autre voie de manière à préciser la signification des différents paramètres issus de l'ajustement empirique.

Essai de modélisation de la fonction f

A titre d'hypothèses simplificatrices, nous admettons que :

- l'impact d'une goutte projetée la terre détachée sur une 1^{ère} petite couronne de rayon l ,
- toutes les directions de projection sont équiprobables
- l est constant et caractéristique d'une séquence pluvieuse déterminée (de même que m_p).

Sous ces hypothèses et selon les notations indiquées sur la Fig. 12 b, la probabilité u pour une particule de tomber dans un récepteur circulaire de rayon R dont le bord est situé à une distance x du point I peut s'écrire :

$u = \frac{2\alpha}{2\pi} = \frac{\alpha}{\pi}$ et cette probabilité est identique pour tous les points de la petite couronne émettrice de largeur dx et de rayon $R + x$ centrée en O .

Si dM_e est la masse émise par cette 2^{ème} petite couronne, la fraction de dM_e interceptée sera :

$$dM_r = u dM_e = \frac{\alpha}{\pi} dM_e, \text{ avec}$$

$$dM_e = m_p \cdot 2 \pi (R + x) dx$$

$$\text{d'où : } dM_r = 2 m_p \alpha (R + x) dx$$

Par ailleurs, on peut montrer que :

$$\cos \alpha = \frac{l^2 + 2Rx + x^2}{2l(R+x)}$$

La quantité totale M_r reçue dans le godet est la somme des quantités reçues en provenance des petites couronnes élémentaires, x variant de 0 à l si $l < 2R$ et de $(l - 2R)$ à l si $l > 2R$. D'où :

$$M_r = 2 m_p \int_{0 \text{ ou } l-2R}^l \alpha(x, l, R) \cdot (R+x) \cdot dx$$

Et enfin, si on se ramène à la surface du récepteur, on a :

$$y = \frac{M_r}{\pi R^2} \quad \text{soit,}$$

$$\frac{y}{m_p} = \frac{2}{\pi R^2} \int_{0 \text{ ou } l-2R}^l \left[\arccos \frac{l^2 + 2Rx + x^2}{2l(R+x)} \right] (R+x) dx$$

Le calcul numérique de cette intégrale a été réalisé pour différentes valeurs arbitraires de l et R . On peut donc retrouver l'allure de la fonction f sous l'ensemble des hypothèses précédemment émises. Deux exemples sont donnés pour $l = 1$ et 5 cm (Fig. 13) : on vérifie que pour de très faibles valeurs de S , le rapport y/m_p est très voisin de 1. Lorsque S croît, la décroissance de y/m_p est d'abord très rapide, puis se ralentit. Dans la gamme des surfaces correspondant aux valeurs expérimentales, le tracé concorde de manière très satisfaisante avec une fonction exponentielle mais la valeur a/m_p de l'ajustement est, lorsque $l = 1$, assez nettement inférieure à 1.

Lorsque l varie, la concordance avec les ajustements exponentiels est toujours excellente dans la gamme des surfaces de récepteur testées. On peut donc calculer, pour différentes valeurs l les paramètres des ajustements exponentiels, en considérant les valeurs y/m_p données par le modèle comme des valeurs expérimentales (Fig. 14). On voit clairement apparaître que :

- l'exposant b décroît très sensiblement en fonction de l ,
- l'ordonnée à l'origine a n'est un bon estimateur de m_p que pour des distances de projection supérieures ou égales à 5 cm.
- le coefficient correcteur à appliquer au paramètre p_{80} dépend de la distance de projection.

FIG 13: ALLURE DE LA FONCTION f POUR 2 VALEURS ℓ

• Calculs numériques d'après la relation 3.
 * Ajustement exponentiel des calculs numériques dans la gamme de surface des récepteurs utilisés (a/m_p ordonnée à l'origine)

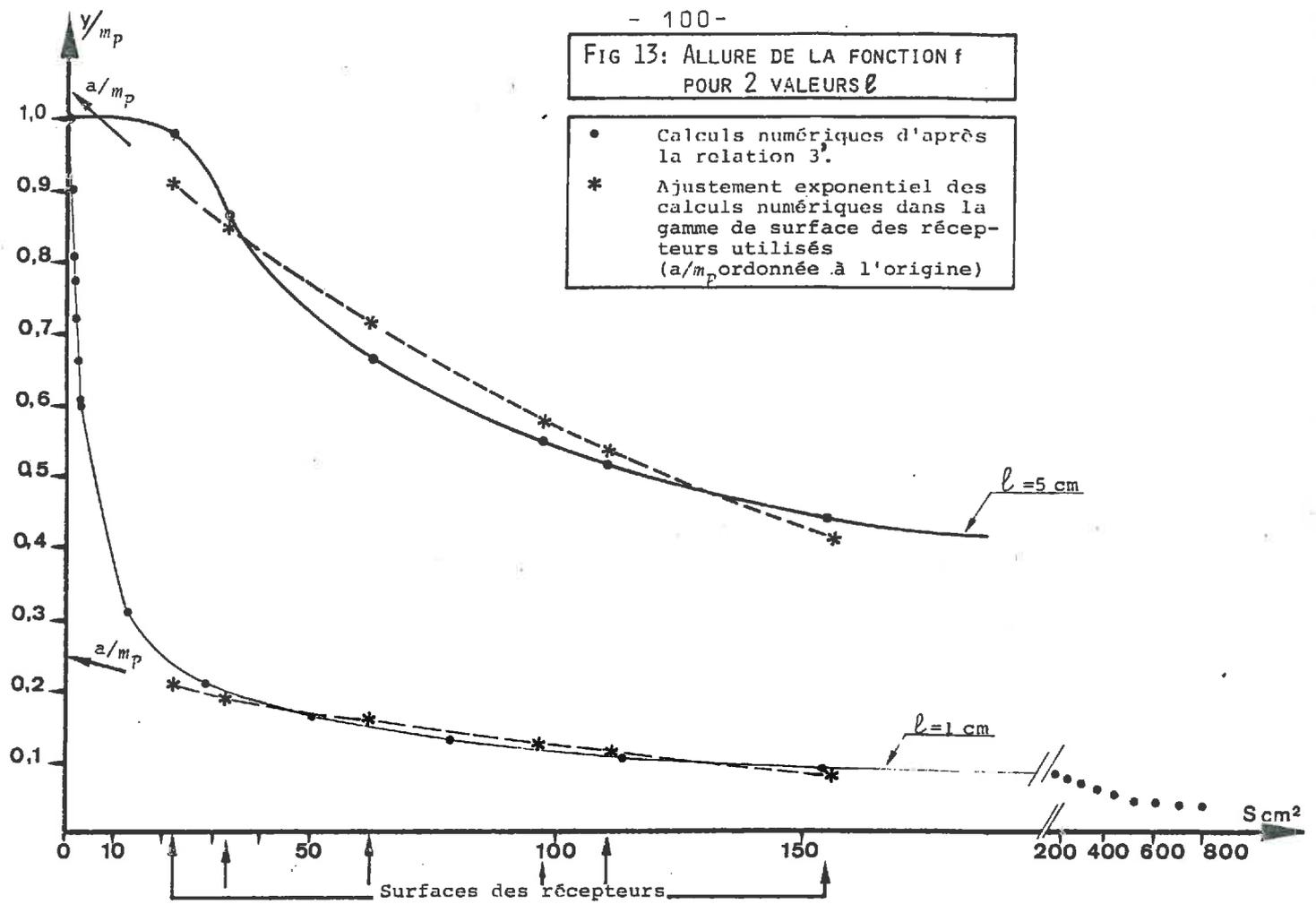
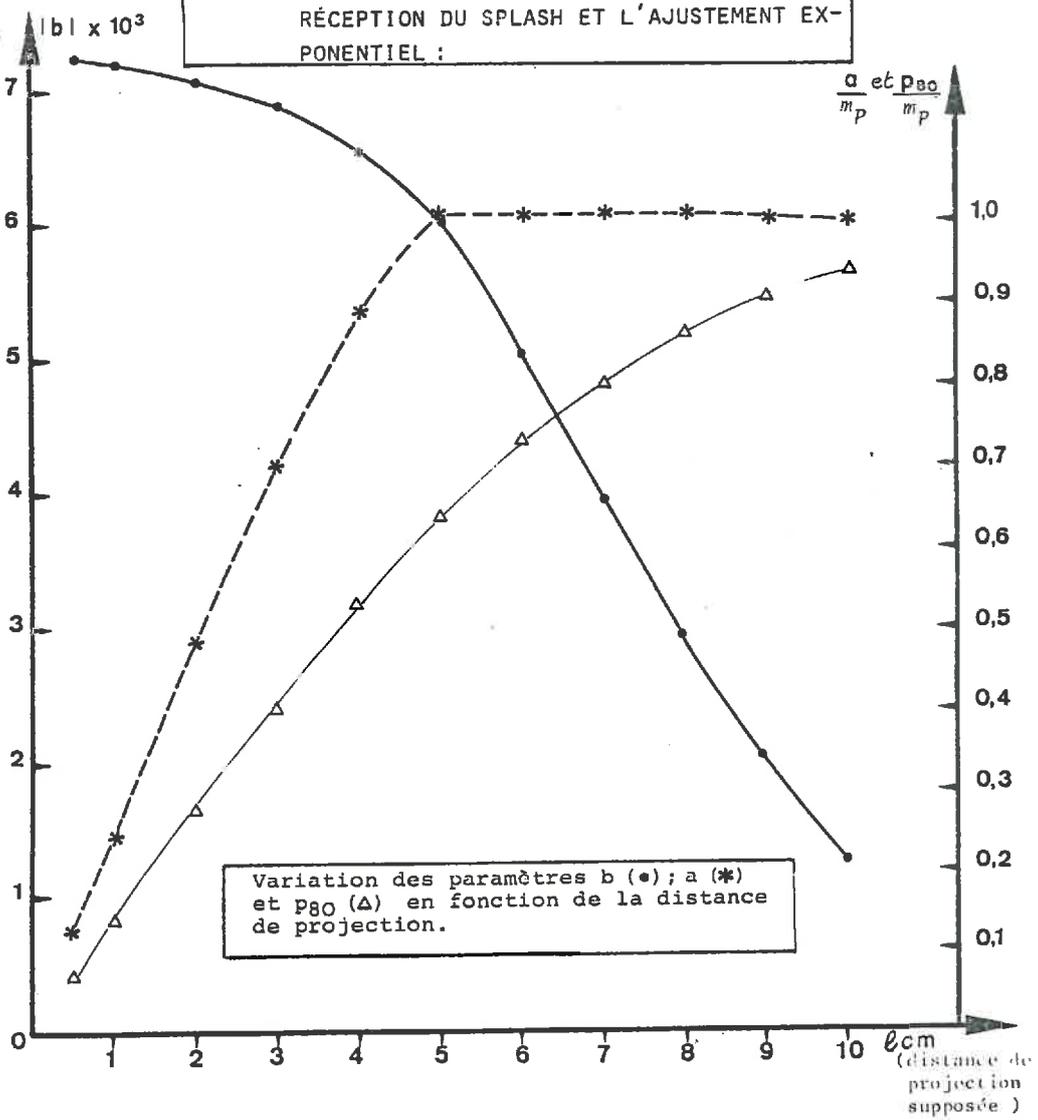


FIG 14 : RELATIONS NUMÉRIQUES ENTRE LE MODÈLE DE RÉCEPTION DU SPLASH ET L'AJUSTEMENT EXPONENTIEL :



Variation des paramètres b (•); a (*) et p_{80} (Δ) en fonction de la distance de projection.

Cette approche vient donc confirmer les considérations intuitives sur lesquelles ont été basées le système de recueil et de traitement des données relatives aux masses de terre projetées. Elle nous apporte en outre des éléments d'appréciation critique des résultats obtenus. De façon très négative, on pourrait dire que les paramètres a ou p_{80} ne sont jamais vraiment comparables d'une parcelle et surtout d'une séquence de pluie à l'autre. Mais la cohérence des résultats acquis dans ce domaine par de très nombreux chercheurs va à l'encontre de ce point de vue extrême, qui n'est justifié que si l'hypothèse de constance de l est strictement juste, ce qui n'est pas le cas : dans des conditions déterminées d'impact des gouttes, il y a une distribution de valeurs l (MUTCHLER, 1970 ; MOSLEY, 1973 ; SAVAT et POESEN, 1981). Ceci nous amène à des conclusions plus modérées :

- la comparaison des indices p_{80} acquis dans des conditions différentes revient à privilégier la fraction des particules qui sont projetées à des distances importantes,
- corollairement, la connaissance de cet indice nous renseignera mal sur des déplacements à très faible distance.

On devra constamment avoir présentes à l'esprit ces deux conclusions lorsqu'on étudiera par la suite, à l'aide de l'indice p_{80} , les variations des masses de terre projetée.

C/ - Méthodes d'évaluation des transferts décimétriques au cours de la phase ?

. Intérêt et principe

Une des différences essentielles entre le déplacement par projection et le déplacement par ruissellement est le fait que, à l'échelle de quelques dizaines de cm^2 et en l'absence de pente, on peut raisonnablement faire l'hypothèse que le solde des échanges de terre avec l'extérieur est nul dans le premier cas, alors que la deuxième modalité a pour spécificité de différencier des zones de départ et d'accumulation.

L'étude des bilans de terre internes à la parcelle constitue donc une approche indirecte des déplacements de terre par ruissellement. Pour cela nous avons transposé à échelle réduite le procédé classique consistant à placer en terre des jalons gradués et à mesurer les variations de cote de la surface par rapport à ces jalons. Si on suppose que les jalons suivent l'affaissement général de la surface, les variations

de cote positives (vers le haut) traduisent un apport et les variations négatives un départ de terre.

. Réalisation

Les jalons utilisés sont de petites aiguilles en matière plastique (de longueur totale 4 cm) présentant de petites encoches espacées de 5 mm. L'encoche centrale (cote 0), plus marquée, est placée au niveau de la surface au moment de l'installation, qui a lieu une fois que la surface est suffisamment continue, c'est à dire quelque temps après le début de l'exposition aux pluies. Les mesures se font par simple lecture avec un pas de 2,5 mm (une demi-graduation).

Pour disposer les jalons au sein de la parcelle, une première solution consistait à délimiter et quadriller de petits bassins-versant. Elle s'est rapidement avérée très difficilement réalisable et risquait notamment de perturber les transferts eux-mêmes. On a donc préféré placer les aiguilles sur un transect linéaire de 2 m perpendiculaire à l'orientation du modelé dominant des parcelles. L'effectif est de 100 aiguilles et sauf exception, il n'y a qu'un seul transect par unité expérimentale. Celui-ci est implanté sensiblement au début de la phase 2, moment où la surface du sol est suffisamment continue pour que l'on puisse placer l'encoche centrale sans ambiguïté.

. Utilisation des données

Au sein de la parcelle considérons deux types de zones : de départ (indices D), et d'accumulation (indices A). Soient respectivement B_D , B_A les soldes des échanges de terre entre ces zones pour une séquence donnée, et S_D , S_A les surfaces (au début de la séquence) de ces zones ; ρ les masses volumiques des matériaux exportés dans leur disposition initiale ou des matériaux accumulés dans leur disposition finale.

Si x_k est la $k^{\text{ème}}$ classe de variation de cote d'un jalon et n_k le nombre de jalons correspondant à cette classe, et si les indices i et j désignent respectivement les valeurs de k positives et négatives, les estimations de B_A et B_D seront données par :

$$B_A = S_A \cdot \rho_A \cdot \frac{\sum_i n_i x_i}{\sum_i n_i}$$

$$B_D = S_D \cdot \rho_D \cdot \frac{\sum_j n_j x_j}{\sum_j n_j}$$

Ceci est vrai sous réserve (condition 1) que le transect échantillonne correctement les zones D et A. Si (condition 2) le transect est représentatif de la parcelle (de surface totale S_t) on a :

$$\frac{S_A}{S_t} \approx \frac{\sum n_i}{N} \quad \text{et} \quad \frac{S_D}{S_t} \approx \frac{\sum n_j}{N} \quad ; N \text{ étant le nombre total de jalons.}$$

Sous ces conditions, on peut alors écrire :

$$\frac{B_A}{S_t} \approx \rho_A \cdot \frac{\sum n_i x_i}{N} \quad \text{et} \quad \frac{B_D}{S_t} \approx \rho_D \cdot \frac{\sum n_j x_j}{N}$$

Or, la parcelle étant plane et clôturée, on a globalement :

$$B_a = |B_D| = B.$$

Pour estimer B à partir de l'ensemble des données on peut écrire :

$$\frac{B}{S_t} = \frac{B_A}{S_t} = \frac{|B_D|}{S_t} = \frac{B_A + |B_D|}{2S_t}$$

L'approximation $\rho_D \approx \rho_A$ étant acceptable comme on le verra plus loin⁽¹⁾, on obtient finalement, si on note B/S_t sous le sigle m_T :

$$\frac{B}{S_t} = m_T \approx \rho_{A \text{ ou } D} \cdot \frac{\sum n_k |x_k|}{2N}$$

Numériquement, avec x_k en mm, et B/S_t en $T.Ha^{-1}$; $N = 100$, γ_t densité texturale, on a :

$$m_t \approx 0,05 \gamma_t \frac{\sum n_k |x_k|}{N} \quad (\text{Rel.4})$$

Rappelons que cette relation n'est applicable que si les conditions 1 et 2 sont respectées. Une vérification globale de ces deux conditions consiste à s'assurer que la moyenne algébrique des variations de cotes est nulle, ce qui nous conduira comme nous le verrons par la suite à éliminer certains résultats.

D/ - Conclusions

Les deux méthodes exposées ci-dessus permettent d'évaluer, d'une part les masses de terre déplacées par projection, d'autre part celles qui sont transférées à l'échelle de l'ensemble de la parcelle d'un site de départ à un site

(1) Cf. 2ème partie § 3.2.1.; numériquement ceci revient à admettre $\rho_D \approx \rho_A \approx \gamma_t$ densité texturale alors que ρ_A est légèrement inférieur.

d'accumulation. Dans ce dernier cas, on peut penser que l'agent principal du transfert est le ruissellement. Les résultats de ces deux approches sont acquis de manière indépendante au sein de la même unité d'observation. Leur confrontation permettra donc d'étudier les relations entre ces deux modalités de déplacement, sans pour autant procéder à une étude approfondie du ruissellement lui-même, à nos yeux trop complexe et d'intérêt secondaire dans nos conditions expérimentales, position que nous justifierons plus loin.

2.2.3. - La réorganisation verticale du profil

A/ - Principes de caractérisation : analyse des systèmes de porosité

L'évolution du volume apparent donnée par les relevés aspérimétriques n'apporte pas d'information sur la répartition dans le profil des variations de compacité, et ne permet pas de comparer les états de compacité obtenus d'une parcelle à l'autre. Pour obtenir une représentation encore globale mais déjà plus interprétable de la prise en masse, il convient de déterminer pour les différentes couches concernées l'indice des vides e (rapport entre le volume des vides et le volume de solide, soit :

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} - 1$$
 si γ_s et γ_a sont les densités respectivement de solide et de l'échantillon).

Pour caractériser plus finement l'évolution de l'espace poreux il s'avère intéressant de distinguer en son sein la porosité liée à l'assemblage des constituants granulométriques, dite texturale, de celle liée à l'action de différents agents externes (climat, interventions culturales, faune du sol...) dite structurale (STENGEL, 1976 ; 1979). En dehors de cas exceptionnels ces agents ne mettent pas en jeu d'énergies ou de pressions suffisantes pour modifier de façon sensible la densité texturale, qui dépend donc essentiellement de la texture et de l'état hydrique du sol (FIES et STENGEL, 1981). La mise au point de techniques de mesure de la densité texturale γ_t (MONNIER et al., 1973 ; FIES et STENGEL, 1981) débouche sur la possibilité d'évaluer les deux systèmes de porosité. L'indice des vides structural (e_s) utilisé par GUERIF (1982) pour analyser le compactage d'un massif d'aggrégats, apparaît également dans le cas étudié comme un indicateur sensible et pertinent. On a :

$$e_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_a} - \frac{\gamma_s}{\gamma_t}$$

En associant les déterminations de densité apparente du sol en place et de densité texturale, les relevés aspérimétriques au cours du temps et l'observation des discontinuités dans le profil on peut obtenir une description continue de ces indices. En effet, supposons pour simplifier que la prise en masse affecte de manière homogène une seule couche du sol, dont la cote de surface C est relevée à différentes dates t, et dont la base a pour cote C₀. Sous l'hypothèse C₀ = constante, on a :

$$\gamma_a(t) = \frac{K}{C(t) - C_0} \quad K \text{ étant une}$$

constante numériquement égale à la masse de terre par unité de surface dans la couche considérée. Si l'on détermine au temps t₁ (généralement mais pas nécessairement initial) la densité apparente γ_{ai} on a :

$$\gamma_a(t) = \gamma_{ai} \cdot \frac{C_i - C_0}{C(t) - C_0} ; \text{d'ou finalement :}$$

$e(t) = \frac{\gamma_s}{\gamma_{ai}} \cdot \frac{C(t) - C_0}{C_i - C_0} - 1$	
$e(t) = \frac{\gamma_s}{\gamma_{ai}} \cdot \frac{C(t) - C_0}{C_i - C_0} - \frac{\gamma_s}{\gamma_{ai}} \quad (\text{Rel. 5})$	

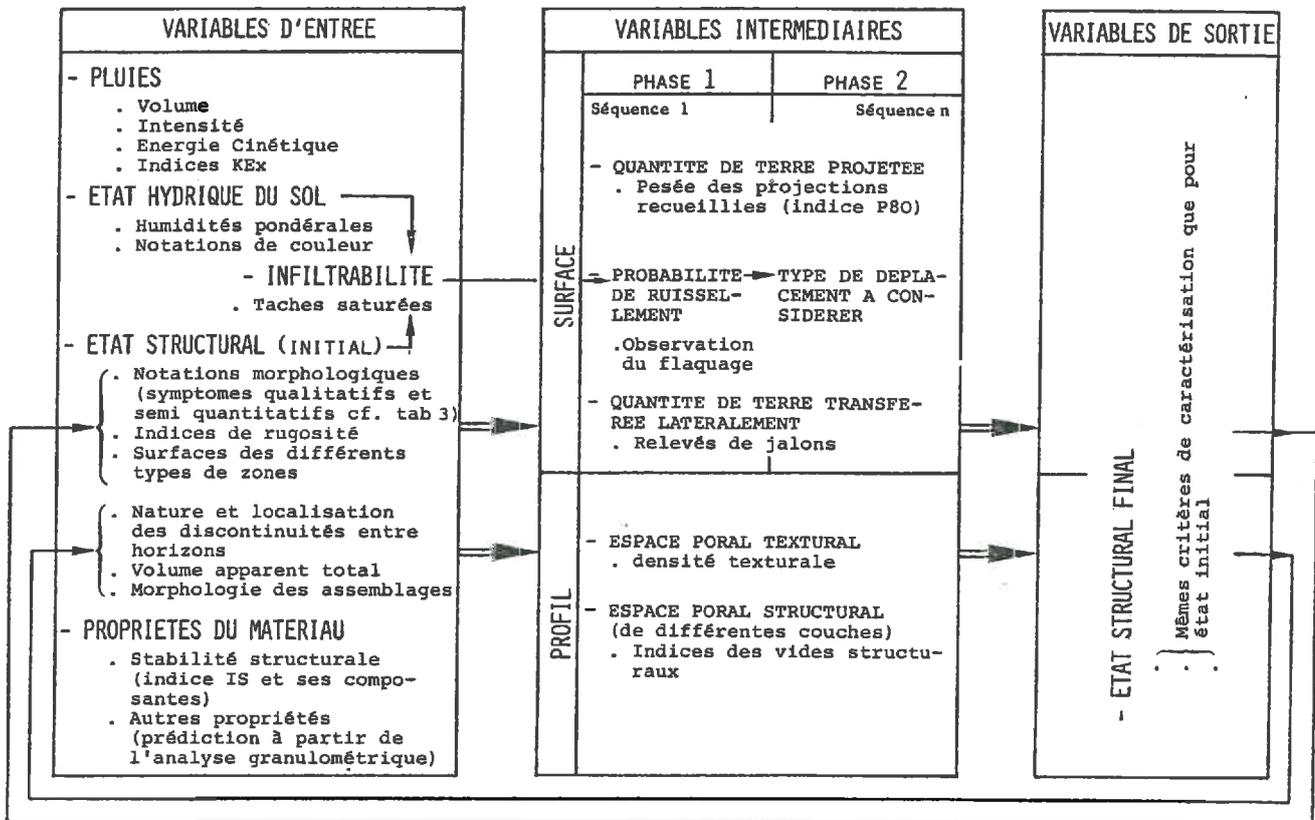
Dans le cas de deux ou plusieurs couches se tassant de manière différente les indices des vides de chacune des couches peuvent être exprimés à condition de déterminer les limites initiales et finales des différentes couches et d'en déduire une hypothèse de répartition des augmentations de compacité au cours du temps. Ce point sera discuté lorsque nous exposerons les résultats obtenus.

B/ - Modalités de réalisation

Avec la sonde γ , 2 ou 3 profils de mesures de densité sont réalisés dans chaque unité expérimentale, avec pour chaque profil 6 à 10 mesures de 0 à 25 cm, dont toujours 4 mesures de 2,5 à 10 cm inclus.

Le paramètre h est déterminé grâce aux relevés aspérimétriques (moyenne de 156 cotes de surface). La détermination du paramètre h₀ implique que l'on identifie le sommet de la zone supposée non déformée du profil, ce qui est obtenu par observation morphologique. Il peut s'agir selon les cas de la base de l'horizon H₁ (contact avec H₂ si celui-ci est très

Fig 15 : RECAPITULATION DES CONTROLES EXPERIMENTAUX REALISES



compact) ou de la base de H_2 (fond de labour). On déblaie alors la terresous-jacente et on cote ces fonds avec l'as-périmètre. Cette détermination s'effectue donc obligatoirement à la fin de la période d'observation.

2.2.4. - Conclusion

Le graphe de la Fig. 15 récapitule l'ensemble des contrôles effectués, ce qui revient à expliciter le graphe donné en introduction (Fig. 1).

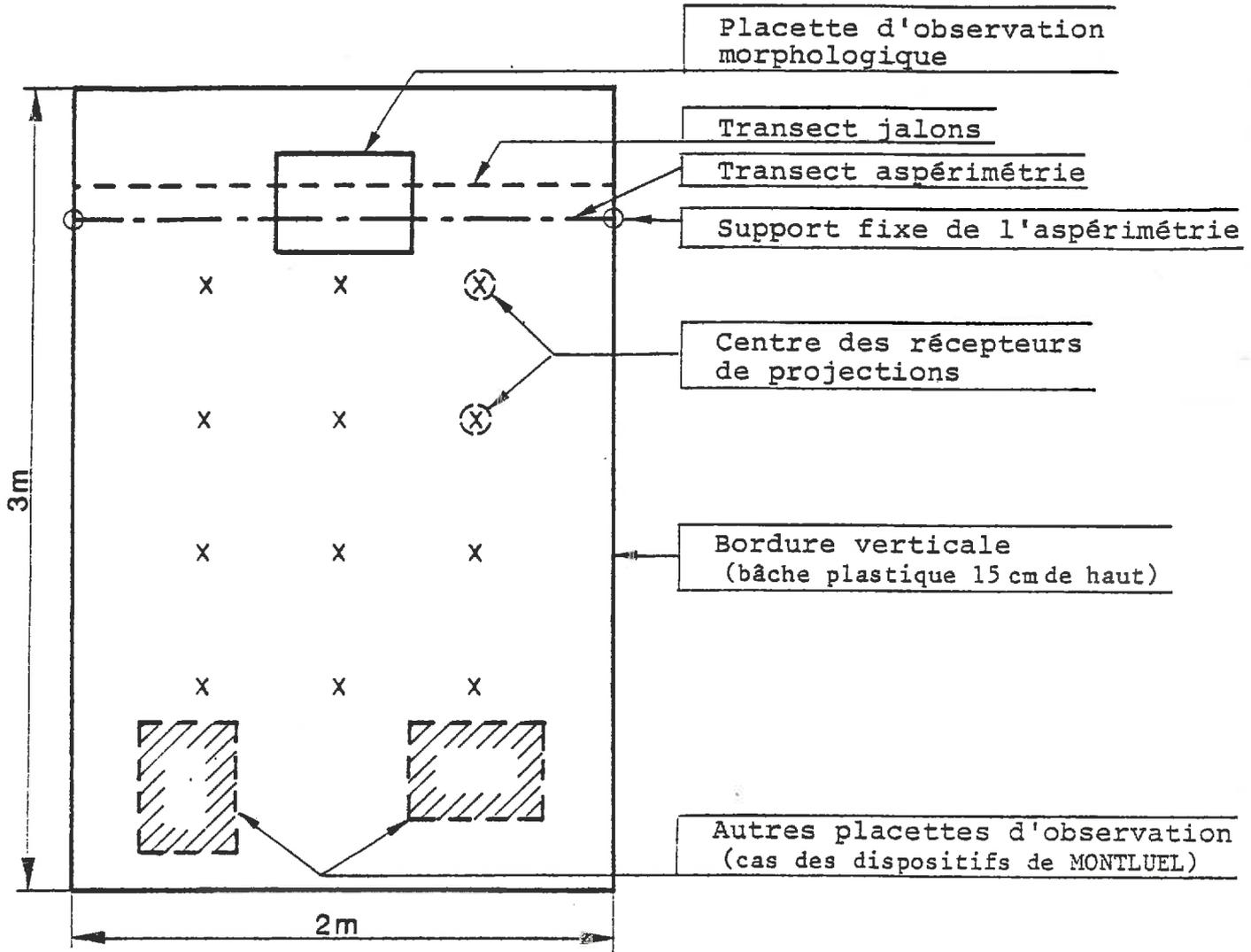
Concrètement, les contrôles expérimentaux mentionnés s'appliquent à une unité spatiale clôturée dont le plan est donné par la Fig. 16 avec les emplacements des différents relevés. L'unité expérimentale est subdivisée en deux sous-parcelles où sont réalisés respectivement l'ensemble des relevés non destructifs et devant être effectués à emplacement fixe, et l'ensemble des relevés qui risquent d'introduire une perturbation plus ou moins marquée.

On remarquera que le problème de l'appréhension spatiale du système "parcelle de dimensions métriques", n'a pas été formellement résolu : aucun relevé ne porte à strictement parler sur l'unité expérimentale dans son intégralité. Chacun d'entre eux porte sur une unité spatiale plus réduite et est selon les cas répété au sein de la parcelle ou localisé de manière systématique, de façon à prendre en compte le mieux possible l'hétérogénéité de maille décimétrique. Ce qui fonde la possibilité de mettre en relation les différents contrôles expérimentaux (donc la notion même d'unité expérimentale), c'est d'une part la proximité des sites de mesure qui garantit que différents facteurs peuvent être considérés comme invariants (notamment ceux relatifs à la constitution et à l'histoire hydrique), d'autre part, leur appartenance à un même périmètre clôturé donc sans échange de terre ni d'eau de ruissellement avec l'extérieur⁽¹⁾.

Il en résulte que dans la plupart des relations qui seront présentées ultérieurement dans l'étude des résultats expérimentaux, la variabilité résiduelle comportera une composante intraparcél-laire, qui ne sera explicitable que si les unités intraparcél-laires de saisie des données ont fait l'objet d'une caractérisation individuelle (cas des placettes d'observation morphologique).

(1) Pour une parcelle plane et de dimension métrique, ces échanges pourraient de toute façon être négligés si les multiples observations autour de la parcelle ne créaient pas de perturbations (zones piétinées, etc...). La preuve en est qu'au sein des unités expérimentales les effets de bordure à proximité des clôtures sont le plus souvent peu perceptibles.

SOUS-PARCELLE A RELEVES FIXES ET NON DESTRUCTEURS



SOUS-PARCELLE A RELEVES DESTRUCTEURS

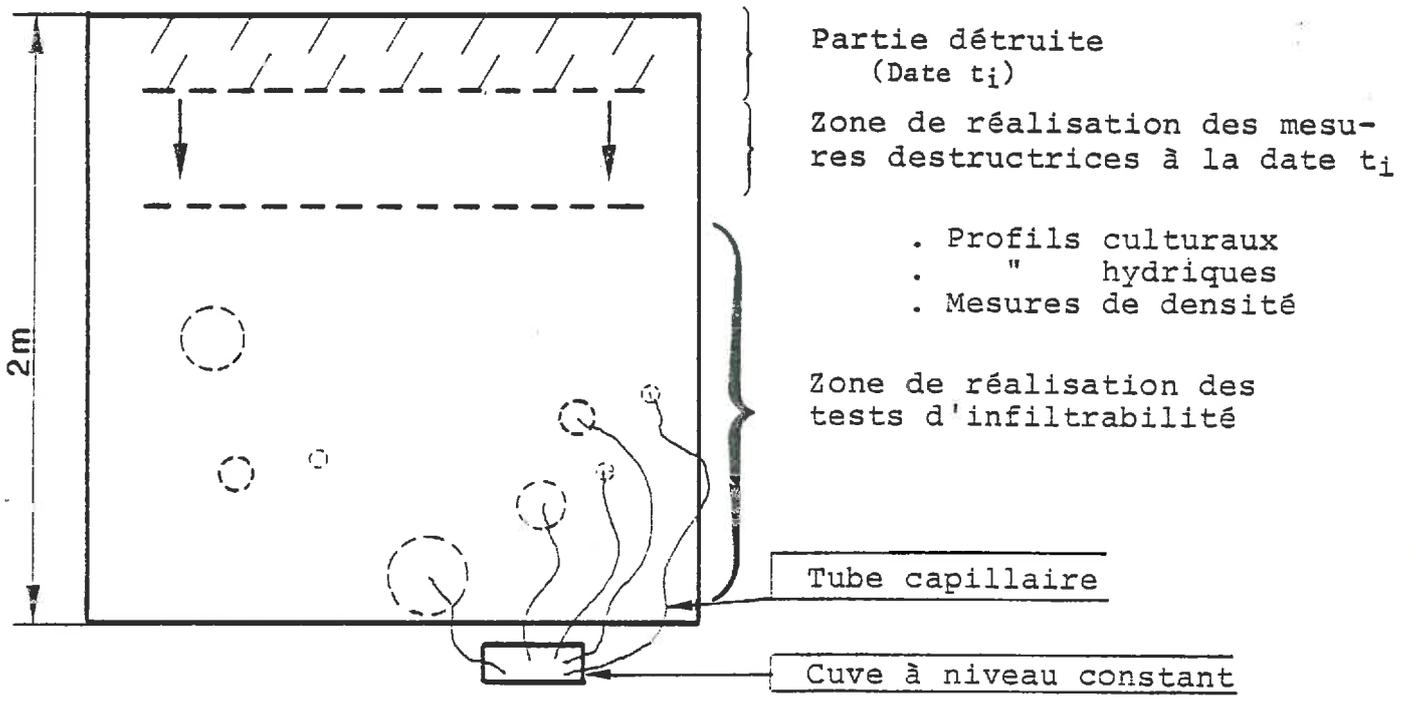


FIG 16 : PLAN D'UNE UNITÉ EXPÉRIMENTALE

DEUXIÈME PARTIE :

LES PROCESSUS INTERVENANT DANS LE DEROULEMENT
DE LA DÉGRADATION

	<u>PAGE</u>
<u>INTRODUCTION</u>	113
<u>1 - LA REDISTRIBUTION SPATIALE DU MATERIAU A LA SURFACE DU SOL ET SES PRINCIPAUX FACTEURS</u>	113
1.1. - <u>Considérations générales : modalités et agents du déplacement</u>	113
1.1.1. - Modalités	113
1.1.2. - Rôles du ruissellement	116
1.1.3. - Rôles de l'impact des gouttes de pluies	119
1.1.4. - Premières conclusions	120
1.2. - <u>Les masses de terre projetée</u>	122
1.2.1. - Obtention et expression des résultats	122
1.2.2. - Quantités cumulées : ordres de grandeurs et hiérarchie des sources de variation	127
1.2.3. - Analyse de l'influence des facteurs climatiques	131
A/ - Principales références acquises concernant l'érosivité des pluies	
B/ - Résultats expérimentaux	
1.2.4. - Analyse de l'influence du sol et des interactions sol-climat	136
A/ - Principales références relatives à l'érodibilité	
B/ - Résultats expérimentaux	
1.2.5. - Discussion générale	142
1.3. - <u>Les masses de terre transférée</u>	144
1.3.1. - Position du problème et ébauche de modélisation	144
1.3.2. - Confrontation avec les données expérimentales	145
A/ - Principe de la démarche et données utilisées	
B/ - Relations synchroniques entre m_T et p_{80}	
C/ - Relations diachroniques entre m_T et p_{80}	
1.3.3. - Conclusion	151
<u>2 - RELATIONS ENTRE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE DU SOL ET LA REDISTRIBUTION SPATIALE DU MATERIAU</u>	153
2.1. - <u>La phase 1, phase de fermeture de la surface</u>	153
2.1.1. - Caractères généraux de l'évolution morphologique pendant la phase 1	153
2.1.2. - Analyse de l'extension des plaques continues : schéma d'incorporation progressive des fragments	155

A/ - Origine et présentation du modèle	
B/ - Confrontation avec les données expérimentales	
2.1.3. - Evolution morphologique et déplacement de terre : modèle de colmatage interstitiel	163
A/ - Modèle géométrique de base, définition géométrique du paramètre D_{lim}	
B/ - Signification de D_{lim} par rapport à l'encombrement des interstices	
C/ - Transposition du modèle à l'étude de l'évolution de la surface du sol : détermination d'un calibre D_{lim} équivalent	
2.1.4. - Etude des variations du calibre équivalent D_{lim}	169
A/ - Principe de la démarche	
B/ - Discussion des résultats obtenus sur le site de Palaiseau	
C/ - Discussion des résultats obtenus sur le site de Montluel	
D/ - Conclusion : valeur d'indicateur du paramètre D_{lim} ; rapport entre déplacement et projection	
2.1.5. - Conséquences de l'évolution morphologique sur le régime d'infiltration des pluies	179
A/ - Position du problème, observations et mesures réalisées	
B/ - Résultats	
C/ - Discussion	
2.2. - <u>La phase 2, phase de formation des croûtes stratifiées</u>	186
2.2.1. - Le déclenchement de la phase 2	186
A/ - Principales hypothèses	
B/ - Premier type de confrontation avec les résultats expérimentaux : variabilité des délais d'apparition du faciès F_2	
C/ - Deuxième type de confrontation avec les résultats expérimentaux : analyse de la structure des pluies précédant l'établissement de la phase 2	
2.2.2. - Caractères généraux de l'évolution morphologique pendant la phase 2	194
2.2.3. - Réduction des surfaces de départ et diminution de la rugosité	195
A/ - Modèle géométrique adopté - conséquences	
B/ - Confrontation avec les résultats expérimentaux	

2.2.4. - Relation entre évolution morphologique et transfert de terre 199
A/ - Considérations géométriques
B/ - Confrontation avec les données expérimentales

3 - LA REORGANISATION VERTICALE DES COUCHES SUPERFICIELLES

3.1. - Considérations générales 203

3.2. - Résultats et discussion 203

3.2.1. - Répartition dans le profil des augmentations de compacité, conséquences pour le volume apparent des couches superficielles 206

- A/ - Mesures de densité
- B/ - Variations de cote ; cohérence globale avec celles des densités apparentes
- C/ - Variations entre parcelles de la diminution du volume apparent

3.2.2. - Variations de l'indice des vides structural au cours de la dégradation 213

- A/ - Remarques préalables
- B/ - Evolution dans le temps : tendances générales
- C/ - Variations entre parcelles de la diminution de es

3.3. - Eléments de synthèse 219

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE 221

INTRODUCTION

Dans cette deuxième partie, nous tentons d'appréhender l'évolution structurale des couches superficielles comme la résultante géométrique:

- des quantités de terre déplacées lors des pluies ;
- des conditions de réinstallation du matériau déplacé, se traduisant notamment par une certaine densité apparente et donc un certain volume occupé dans la nouvelle disposition ;
- de la géométrie initiale des assemblages terreux, qui conditionne, elle aussi, la répartition spatiale du matériau redistribué.

Pour chacun de ces groupes de variables, nous disposons d'indicateurs quantitatifs qui doivent être mis en relation les uns avec les autres et avec les facteurs et conditions de la dégradation. Une difficulté à souligner provient de l'existence d'une covariable commune à presque tous ces indicateurs, (et surtout à ceux qui sont de nature cumulative) : le temps. Ceci peut être la source de corrélations non causales qui risquent d'être interprétées comme des règles de fonctionnement stables du système étudié. C'est pourquoi nous nous efforcerons d'envisager les résultats obtenus à la fois de manière diachronique, en comparant les résultats obtenus sur une même parcelle pour des séquences climatiques différentes et synchronique, en comparant des résultats obtenus au même moment sur des parcelles soumises à des traitements expérimentaux différents

C'est à partir du moment où une relation rendra compte sous la même forme de ces deux types de variations que nous pourrons la considérer comme stable : telle est l'utilisation principale que nous ferons des traitements expérimentaux mis en oeuvre, dont l'intérêt majeur est de provoquer une variabilité de déroulement du phénomène, selon diverses modalités indépendantes.

1 - LA REDISTRIBUTION SPATIALE DU MATERIAU A LA SURFACE DU SOL ET SES PRINCIPAUX FACTEURS

1.1. - CONSIDERATIONS GENERALES : MODALITES ET AGENTS DU DEPLACEMENT

1.1.1. - Modalités

Nous avons déjà fait allusion au rejaillissement et présenté des méthodes d'appréhension des quantités de terre concernées. Or, cet inventaire et ces méthodes sont hérités des travaux relatifs à l'érosion, pour lesquels la notion de déplacement n'a de sens qu'en rapport avec une exportation, potentielle ou réalisée, à relativement longue distance. Pour ce

qui concerne notre objet d'étude, c'est la redistribution interne à un périmètre métrique qui nous intéresse. La notion de déplacement doit alors s'étendre à un ensemble beaucoup plus complexe et diversifié de modalités. Par exemple, dans certaines circonstances, on voit apparaître sur les faces inclinées et les plus exposées des mottes de petits bourrelets correspondant à l'amorce de coulées boueuses. Ces figures sont restées exceptionnelles au cours de nos observations (1) mais elles sont courantes en hiver et en sol limoneux (SEBILLOTTE, 1966 ; BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976).

Il apparaît clairement dans ce cas un déplacement de matière solide à très faible distance et qui contrairement aux deux premiers cas cités se réalise pratiquement sans véritable séparation des particules déplacées par rapport aux fragments d'origine. Pour dresser l'inventaire complet des modalités de redistribution spatiale, on peut donc considérer celle-ci comme résultant de la conjugaison de deux fonctions élémentaires (également distinguées par SAVAT et POESEN, 1981, pour appréhender le problème de l'érodibilité) :

- la modification des liaisons qui attachent les particules ou groupes de particules à leurs fragments d'origine ;
- la modification de leur position spatiale.

Chacune de ces fonctions peut elle-même être accomplie selon différentes modalités : ainsi les particules peuvent ou non être détachées des fragments d'origine, dans le premier cas elles le sont sous forme d'agrégats ou de groupes de particules plus ou moins préindividualisés, ou encore de constituants granulométriques. Quant au déplacement, il peut comporter différentes étapes ; schématiquement on peut distinguer une étape initiale de mise en mouvement, et une étape secondaire facultative de redéplacement, par exemple au sein d'une lame d'eau. Chacune de ces étapes peut se réaliser à différentes distances selon l'agent responsable et les conditions de son intervention.

L'inventaire des modalités de déplacement est donc constitué par un tableau à double entrée (Tableau 17) dont nous nous occuperons, au cours de l'analyse qui va suivre, de progressivement renseigner les cases.

(1) Nous les avons précisément observées (Cf. cl. IXd et IXe) à Palaiseau le 21.12.1981 en cours de dégel sous pluie, l'humidité des mottes (40 à 60 % massiques) se situant alors très au-delà de la limite de liquidité.

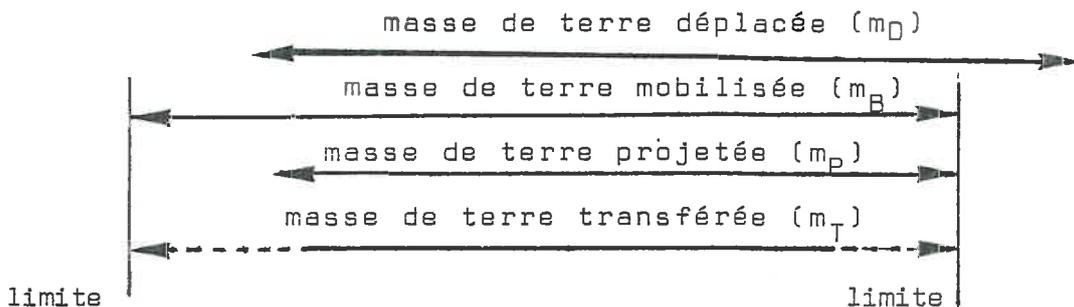
TABLEAU 17. - COMBINAISON DES DIFFERENTES MODALITES DE DETACHEMENT ET DEPLACEMENT DES PARTICULES SOLIDES.

DEPLACEMENT	<u>INITIAL</u>	0	^ε (distances millimétriques)	⁺ (distances décimétriques ou métriques)
	<u>SECONDAIRE</u>	0 +	0 +	0 +
DETACHEMENT	0			
	+			

En ce qui concerne l'évaluation des quantités de terre affectées par la redistribution spatiale, on perçoit la nécessité de distinguer plusieurs notions :

- la masse de terre déplacée, qui inclut l'ensemble des particules détachées ou non, ayant changé de position ;
- la masse de terre mobilisée regroupant l'ensemble des particules qui ont subi un détachement et se trouvent donc disponibles pour un déplacement, que celui-ci se réalise immédiatement ou non ;
- la masse de terre projetée par les gouttes de pluie, qui correspond à l'intersection des deux sous ensemble précédents ;
- la masse de terre échangée entre les surfaces de départ et d'accumulation, à laquelle nous réserverons le terme de "masse de terre transférée", l'échange étant désigné sous le terme de "transfert décimétrique".

Ceci peut être représenté comme suit⁽¹⁾ :



(1) par convention d'écriture le symbole m écrit en minuscules désigne des masses par unité de surface totale du périmètre considéré. Sauf exception l'écriture m désigne une quantité cumulée sur plusieurs séquences, précédée de Δ elle se réfère aux résultats obtenus au cours d'une seule séquence.

Pour appréhender l'ensemble de la redistribution spatiale la surface du sol, il nous faudra donc :

- tenter d'élucider les rapports entre ces différentes quantités ;
- préciser leurs liens avec les données qui nous sont accessibles compte tenu des moyens expérimentaux mis en oeuvre ;
- étudier le déterminisme de chacune d'elles.

Ces trois objectifs supposent que soient identifiés et précisés les rôles respectifs des différents agents responsables de la redistribution spatiale, et tout spécialement ceux qui sont classiquement considérés comme prépondérant le ruissellement et l'impact des gouttes de pluie.

1.1.2. - Rôles du ruissellement

Le ruissellement peut, dans certaines conditions, assurer non seulement le transport mais aussi l'entraînement initial des particules solides. Les variables à considérer dans l'un et l'autre cas sont :

- a) - Les caractéristiques de l'écoulement : vitesse linéaire v , qui dépend elle-même de la pente α , de l'épaisseur de la lame d'eau, de la friction exercée par la surface du sol et du caractère turbulent ou laminaire de l'écoulement (ou débit unitaire) q , (SAVA 1977) ; force tractrice τ qui dépend elle-même de α et q (MEYER et MONKE, 1965) ; déficit de charge solide par rapport à la capacité de transport totale (MEYER MONKE, 1965 ; WILLIS, 1971, cité par THORNE, 1980) caractère turbulent qui, non seulement, modifie la vitesse mais crée également des poussées verticales faisant le détachement des particules (SAVAT et de PL 1981).

La capacité érosive du ruissellement (incluant arrachement et transport) est exprimée en termes de débit solide par unité de largeur q_s . Cette variable est, le plus souvent par voie empirique, mise en relation avec les précédentes, en prenant en considération de seuils (v_c , q_c ou τ_c) en deçà desquels il n'y a pas détachement ou de transport possibles (MEYER et MONK 1965). Des références classiques sont celles obtenue par HJÜLSTROM (1935) concernant le comportement des

particules dans le lit des rivières. Elles sont reportées sur la Fig. 17 d'après laquelle on voit que pour les particules de dimension importante le détachement et le transport n'ont lieu que pour des vitesses élevées. Pour les particules les plus fines, il faut également des vitesses élevées pour réaliser le détachement mais cette vitesse peut décroître jusqu'à des valeurs très faibles sans qu'il y ait dépôt. Pour les particules les plus sensibles au détachement (sables fins), les vitesses minimales sont de l'ordre de 20 cm.s⁻¹.

Selon SAVAT et DE PLOEY (1981), s'appuyant sur des considérations théoriques et des résultats expérimentaux, le paramètre pertinent pour la prédiction de l'érosion par le ruissellement est le nombre de Froude, soit :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gd}}$$

Toujours d'après ces auteurs, l'érosion en rigoles peut être déclenchée par $Fr > 1,2$ sur des sols de limons à la limite de liquidité, et pour des valeurs de l'ordre de 2 à 3 dans des conditions hydriques moins extrêmes. Les valeurs de Fr pour des écoulements laminaires ou turbulents de faible épaisseur peuvent être déduites des résultats expérimentaux de SAVAT (1977) qui a étudié les variations de d en fonction du débit par unité de largeur q et de la pente .

Pour évaluer les effets du ruissellement dans nos conditions expérimentales, nous pouvons envisager deux échelles : celle de la petite parcelle expérimentale de pente générale très faible, et celle du microversant éventuellement très incliné . Si I et i sont respectivement l'intensité pluviométrique et l'infiltration (mesurées par rapport à la surface horizontale), L la longueur de pente considérée, en régime stationnaire, on peut déterminer :

$$q = \frac{1}{36 \cdot 10^4} (I - i) \cdot L \cdot \cos \alpha \quad (q \text{ en cm}^2/\text{s}, I \text{ et } i \text{ en mm/h ; } L \text{ en cm})$$

Comme par ailleurs $q = v \cdot d$, on peut évaluer v et $Fr = \frac{q}{\sqrt{gd^3}}$

En effet, les valeurs de d, qui dépendent aussi de q et α , peuvent être approchées d'après les données de SAVAT (1977) (1). Les résultats de ces calculs sont donnés dans le Tableau 18. Pour $I - i = 50$ mm/h ce qui correspond à des pluies déjà exceptionnelles dans nos conditions expérimentales, on obtient des ordres de grandeur nettement inférieurs aux seuils critiques de détachement des particules. Réciproquement pour obtenir ces seuils, il faudrait des intensités pluviométriques jamais atteintes.

(1) Avec une grande incertitude car les valeurs de q sont très faibles et sortent de la gamme des valeurs expérimentées par cet auteur. Cependant, il est à noter que les vitesses d'écoulement déterminées par VALENTIN (1981) dans des conditions se rapprochant de celles indiquées dans la première colonne du Tableau 18 sont du même ordre de grandeur (2 à 6 cm/s) que le résultat du calcul.

vitesse de
l'eau en cm/sec.

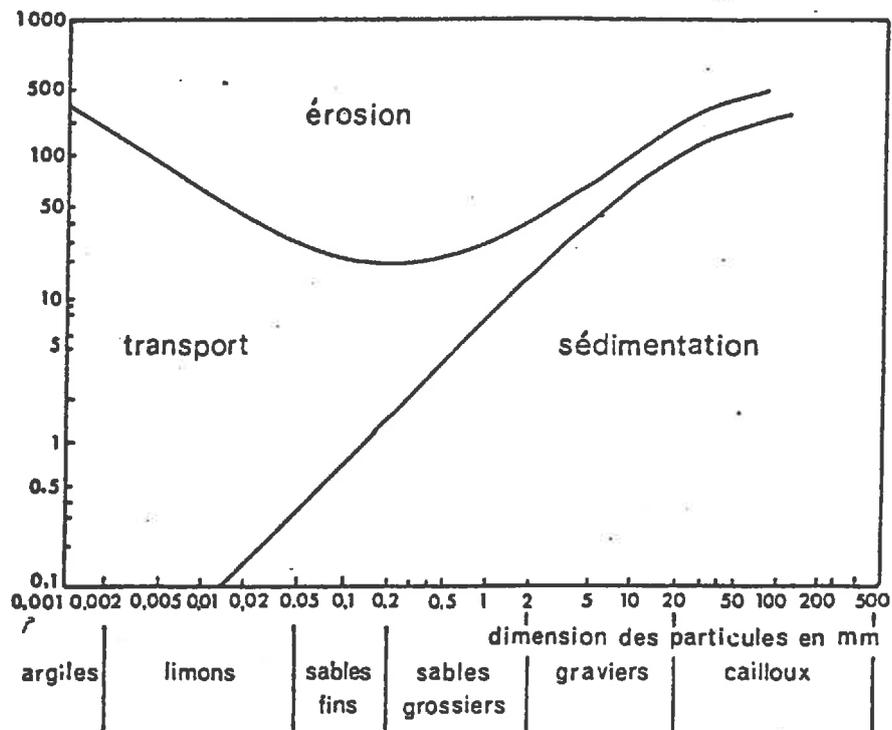


FIG 17: INFLUENCE DE LA VITESSE DE L'EAU
SUR LE COMPORTEMENT DE PARTICULES
SOLIDES DE DIFFERENTES TAILLES
(HJULSTRÖM, 1935, repris de BOULAINÉ, 1978)

TABLEAU 18.- CALCULS D'ORDRES DE GRANDEUR CONCERNANT LE RUISSELLEMENT.

$\frac{a}{L}$ (cm)	ECHELLE METRIQUE (petite parcelle)	ECHELLE DECIMETRIQUE (microversant)
	200	10
I- i (mm/h)	50	50
q (cm ² /s)	0,3	0,007
d (cm)	0,05 à 0,1	0,01 ?
v (cm/s)	3 à 6	0,7 ?
Fr	0,3 à 0,9 ?	0,2 ?
I- i (mm/h) nécessaire pour obtenir Fr = 1	270	720

Ainsi dans les conditions où nous avons opéré, les pentes et les longueurs de pente sont trop faibles pour que le ruissellement puisse réaliser le détachement initial des particules⁽¹⁾. Par contre, même avec des vitesses d'écoulement très faibles, correspondant à des valeurs $I - i$ de l'ordre de 2 à 5 mm/h assez fréquentes en cours de phase 2, le ruissellement peut assurer le transport de l'argile et d'une partie variable des limons, une fois ces particules mises en suspension.

- b) - La constitution et les propriétés de la surface du sol, le plus souvent appréhendées en termes de taille de particules supposées non agrégées. BRYAN (1976) souligne qu'un sol agrégé peut être plus sensible au ruissellement qui ne le laissent prévoir des références ainsi établies, ce que confirme VALENTIN (comm. pers.). Tous deux mettent en évidence une part modeste mais significative de pertes en terre spécifiquement liée au ruissellement et ce même à de faibles vitesses d'écoulement. Mais dans les deux cas, ces auteurs incriminent des processus de détachement préalables, ou liés non pas à la force tractrice, mais à l'effet d'imbibition. Le ruissellement ne ferait donc qu'extérioriser (par un déplacement) un détachement dont il ne serait pas à proprement responsable, dans ces conditions de faibles pentes et/ou longueurs de pente.

1.1.3. - Rôles de l'impact des gouttes de pluie

L'énergie cinétique totale représentée par l'impact des gouttes est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle de la masse d'eau qui ruisselle (MIHARA, 1951 ; HUDSON, 1981) puisque les vitesses sont beaucoup plus élevées dans le premier cas (de l'ordre de 8 m/s contre moins de 1 m/s). Cette comparaison met en jeu la surface totale sur laquelle tombe la pluie et n'a de sens qu'en l'absence de concentration des filets liquides, c'est-à-dire dans les zones d'inter-rigoles ou en l'absence de rigoles. Dans de telles conditions, il est donc universellement admis que l'effet de l'impact des gouttes est très largement prépondérant sur celui du ruissellement vis-à-vis de la mobilisation de matière solide (KIRKBY, 1980).

Plus généralement et dans une large gamme de circonstances, le processus de rejaillissement joue un rôle capital dans l'érosion comme le démontre l'expérience de HUDSON (1957) où l'interception d'une partie de l'énergie cinétique des pluies par une toile de moustiquaire tendue au-dessus du sol a considérablement réduit les pertes

(1) Sauf éventuellement en cas de concentration microlocale des filets liquides, phénomène que nous n'avons pas constaté alors que nous avons assisté directement à d'assez nombreux épisodes pluvieux, y compris le plus intense de toutes les campagnes d'observation ($I - i \approx 90$ mm/h le 13.10.1982 à Montluel).

en terre. Ceci s'applique même au cas des régions du climat tempéré océanique : en Belgique sur sol de limon, BOLLINNE (1982) a mesuré des masses de terre projetée de plusieurs dizaines de tonnes/ha/an. Dans nos conditions expérimentales, on doit donc considérer ce processus comme décisif.

Vis-à-vis du transfert décimétrique, le rejaillissement peut aussi jouer un certain rôle : les distances de projection étant nécessairement plus grandes vers l'aval de la pente même en l'absence de ruissellement, les matériaux déplacés ont tendance à s'accumuler au niveau des points bas du microrelief (EKERN, 1950 ; MOSLEY, 1973). Ceci est d'autant plus marqué que les distances de projection et les pentes sont plus importantes. Cependant, dans les conditions topographiques où nous avons opéré, les pentes générales sont nulles ou très faibles. D'autre part, les directions initiales de projection sont vraisemblablement, sinon totalement aléatoires, du moins très variables si l'on en juge par les photographies d'impacts (MIHARA, 1951 ; ELLISON, 1954 ; EDGERTON et al., cités par PALMER, 1965).

Enfin, on peut considérer que, en l'absence de ruissellement la répartition spatiale des sites de réception est extrêmement dense et diffuse puisqu'il s'agit principalement des interstices entre les fragments. Sur la base de ces arguments, on peut admettre que le rôle du rejaillissement proprement dit dans la spécialisation, à échelle décimétrique des zones, et le solde des échanges entre celles-ci, est mineur par rapport à celui du ruissellement.

Par ailleurs, il faut envisager certaines interactions : d'une part, l'impact des gouttes entretient la turbulence du ruissellement ce qui accroît sa capacité de transport inversement l'existence d'un film d'eau à la surface du sol modifie l'effet érosif de l'impact des gouttes. Selon plusieurs auteurs, ce dernier dépend du rapport $\frac{d}{D}$ entre l'épaisseur du film et le diamètre des gouttes ; d'après PALMER (1965) l'effet maximum est obtenu pour $\frac{d}{D} \approx 1$, mais d'après MUTCHLER et LARSON (1971) pour des valeurs plus faibles de l'ordre de 0,2, alors que pour GHADIRI et PAYNE (1981) et POESEN et SAVAT (1981) l'existence d'un film d'eau réduit de toutes façons l'effet de l'impact. Par contre, il est admis par tous que pour des valeurs $\frac{d}{D}$ de l'ordre de 2 à 3 cet effet est pratiquement annulé.

1.1.4. - Premières conclusions

On peut donc admettre, dans les conditions où nous avons opéré, qu'il y a un partage des tâches entre ruissellement et impact des gouttes de pluie : le transfert décimétrique est principalement assuré par le ruissellement ; réciproquement ce dernier n'assure vraisemblablement pas une part significative dans la mobilisation. Celle-ci semble pouvo

être liée de manière privilégiée à l'effet des gouttes de pluie matérialisé par le rejaillissement. Une confirmation expérimentale de cette conclusion est fournie par les résultats obtenus en laboratoire par YOUNG et WIERSMA (1973). Dans des conditions correspondant à celles de l'érosion en rigoles (pente de 9 %, longueur totale de pente de 4,50 m, rigoles préformées), ces auteurs observent qu'une réduction de 90 % de l'énergie cinétique des gouttes à même intensité pluviométrique réduit les pertes de terre de 90 % ou plus et que 80 à 85 % des pertes en terre provenant de la zone inter-rigoles ne sont évacués qu'après être parvenus aux rigoles, ce qui signifie que c'est bien le ruissellement qui assure l'essentiel des transferts au sens défini précédemment.

Ces considérations nous conduisent à un premier schéma d'ensemble de la redistribution spatiale (Fig. 18). Conformément à ce schéma, il convient d'aborder en premier lieu le déterminisme du rejaillissement puisque celui exerce un rôle initiateur tout au long des deux phases de la dégradation.

1.2. - LES MASSES DE TERRE PROJETEE

1.2.1. - Obtention et expression des résultats

Pour chaque parcelle expérimentale, on dispose de 4 à 6 séquences successives de relevés selon la date d'exposition aux pluies⁽¹⁾. Pour chacune de ces séquences, à partir de 12 pesées obtenues par parcelle (cf. § 222B, 1ère partie) on calcule les paramètres a et b de l'ajustement $y = a e^{-bS}$ (y masse de terre recueillie par unité de face réceptrice, S surface du récepteur), ainsi que le indice p_{80} (valeur de y pour $S = 80 \text{ cm}^2$, surface moyenne des récepteurs utilisés).

(1) Une perturbation importante est à signaler pour les relevés du 7 au 24.06.1982 à Montluel : à la suite de pluies très intenses des récepteurs ont été alimentés par du ruissellement et on a dû ne tenir compte que d'un nombre restreint d'entre eux où cet apport est très probablement négligeable d'après les quantités d'eau recueillies. Il en résulte que la masse de terre projetée au cours de cette séquence est connue de manière à peu près satisfaisante en moyenne, mais avec une grande incertitude pour chaque parcelle.

La forme exponentielle ne paraît pas mal adaptée à la description des résultats, mais les coefficients de détermination r^2 sont souvent peu élevés en raison de la dispersion des mesures correspondant à chaque récepteur, combinée dans certains cas à une décroissance peu marquée.

Cette dispersion peut être attribuée au moins en partie à l'hétérogénéité du micro-relief autour des récepteurs, qui, en principe, reçoivent plus ou moins de terre selon qu'ils sont en position plutôt dominée ou dominante.

Les valeurs des coefficients b (Fig. 19 et 20) sont pour la majorité d'entre elles comprises dans la gamme des valeurs prévues d'après le modèle géométrique exposé dans la première partie (Cf. Fig. 14). Si l'on s'en tient aux ajustements les plus étroits ($r^2 > 0,65$) les valeurs de b sont de l'ordre de 5 à 10×10^{-3} , ce qui correspondrait à des distances moyennes équivalentes de projection de moins de 1 à 5 cm. Ces valeurs sont faibles par rapport aux ordres de grandeur généralement avancés (par exemple 10 à 20 cm selon POESEN et SAVAT, 1981), obtenus il est vrai dans des conditions très différentes (massifs de particules limoneuses ou sableuses non agrégées, pluies simulées à de fortes intensités). On peut donc penser que l'indice p_{80} , qui est censé bien refléter les projections à plus de 5 cm, ne correspond en valeur absolue qu'à une assez faible part de la masse totale déplacée.

En outre, aucune tendance clairement interprétable ne se dégage de la distribution des valeurs de b . En particulier, sur le site de Palaiseau, on aurait pu s'attendre à des valeurs plus élevées (distances de projection plus faibles) pour les parcelles protégées par des grillages, ce qui n'est pas le cas. En fait, même pour des résultats relativement peu dispersés, les intervalles de confiance sur b sont de l'ordre de $\pm 2,5 \cdot 10^{-3}$ (à $P = 0,10$) ce qui correspond d'après le modèle à une gamme de variation de près de 10 cm des distances moyennes de projection. Il est donc pratiquement exclu de mettre en évidence une variation systématique de la distance moyenne de projection entre parcelles ou séquences climatiques.

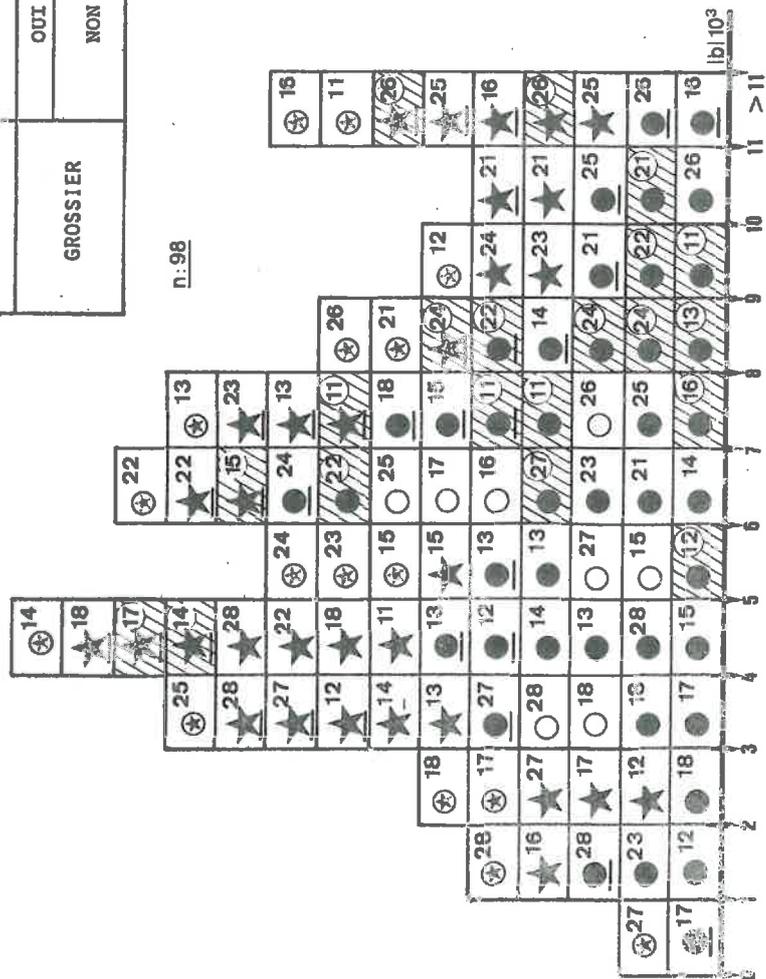
En revanche, les valeurs de a et p_{80} se différencient de manière beaucoup plus nette selon les séquences ou les parcelles. C'est donc l'indice p_{80} , dont l'estimation est plus précise (et qui s'avère d'ailleurs bien corrélé à a), que nous retiendrons pour traiter les données.

Plusieurs auteurs ont montré que les quantités projetées dépendent de l'état de la surface au moment où se produit la pluie (Mc INTYRE, 1958 ; VALENTIN, 1981) et d'après certains d'entre eux cette quantité diminuerait au fur et à mesure de la dégradation structurale. Dans une première approche il y a donc lieu de prendre en considération des variables cumulatives.

FIG19a: DISTRIBUTION DES COEFFICIENTS b

PALAISEAU TRAITEMENTS NON PROTÉGÉS

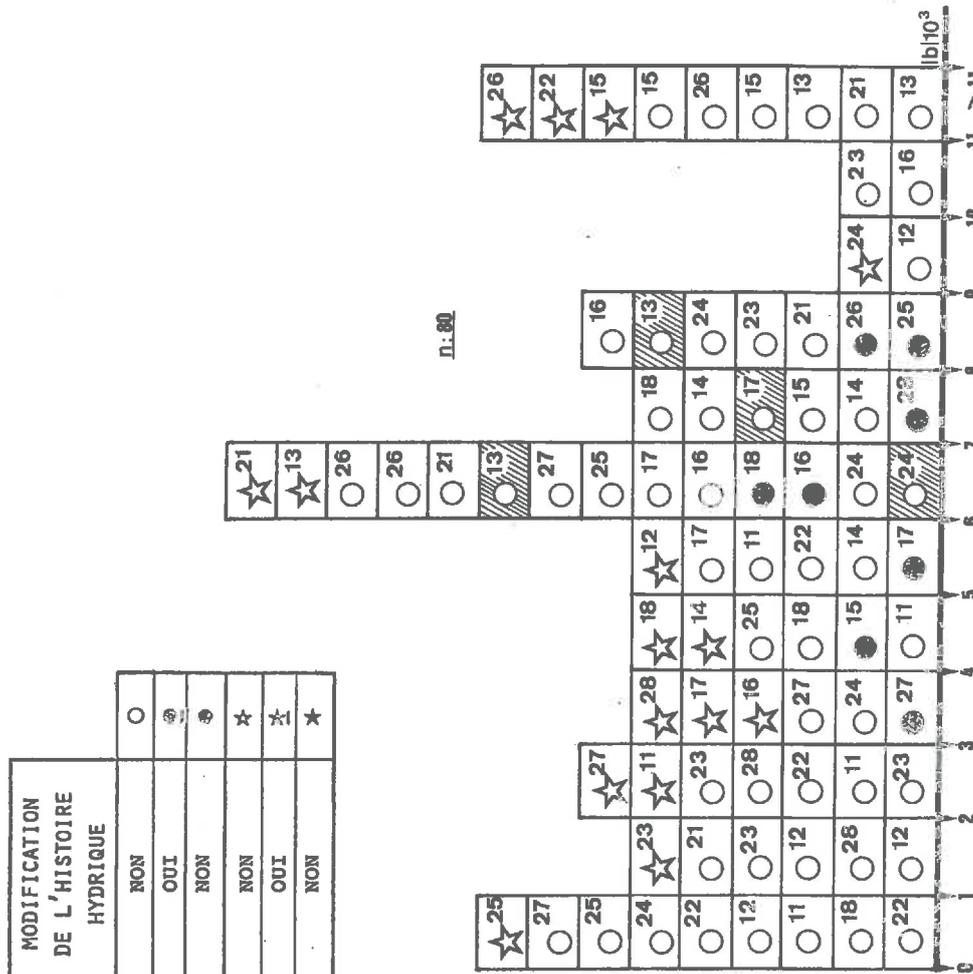
ÉTAT STRUCTURAL	PROTECTION PAR GRILLAGES	MODIFICATION DE L'HISTOIRE HYDRIQUE
FIN	OUI	NON
	NON	OUI
	NON	NON
GROSSIER	OUI	NON
	NON	OUI
	NON	NON



Valeurs correspondant à $r^2 \geq 0,65$
Surface billonnée

FIG19b: DISTRIBUTION DES COEFFICIENTS b

PALAISEAU TRAITEMENTS PROTÉGÉS



Valeurs correspondant à $r^2 \geq 0,65$

Fig. 20a : DISTRIBUTION DES COEFFICIENTS b

MONTLUEL AUTOMNE

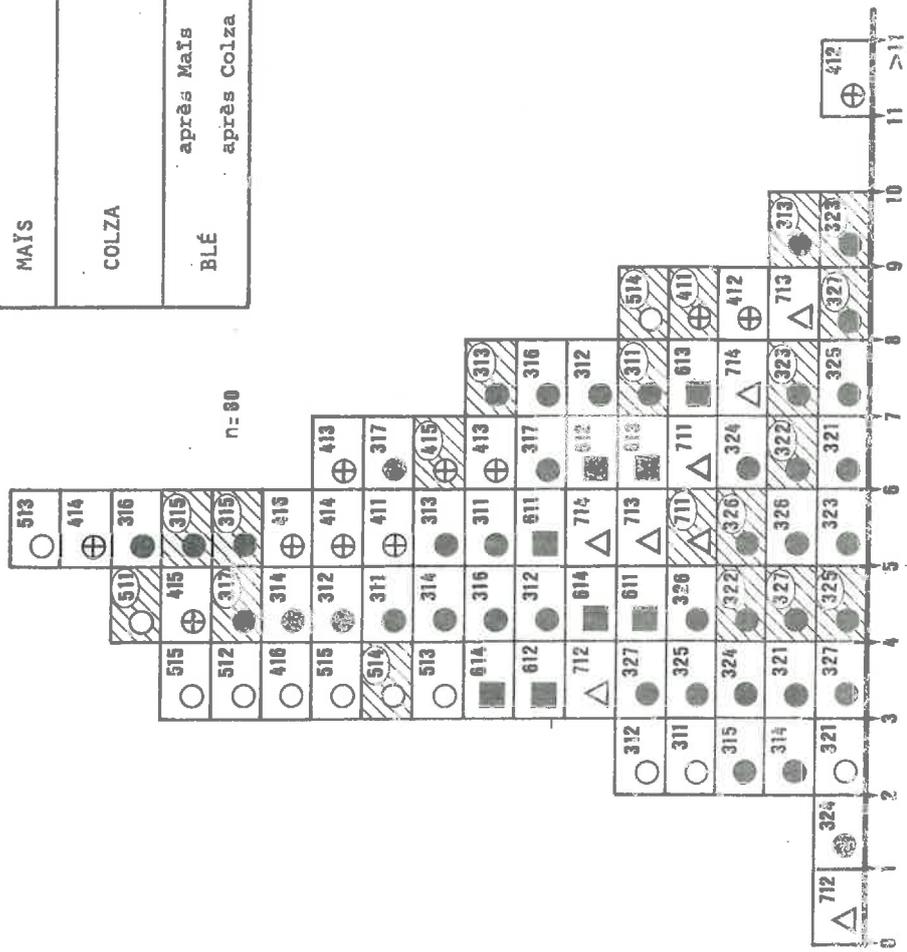
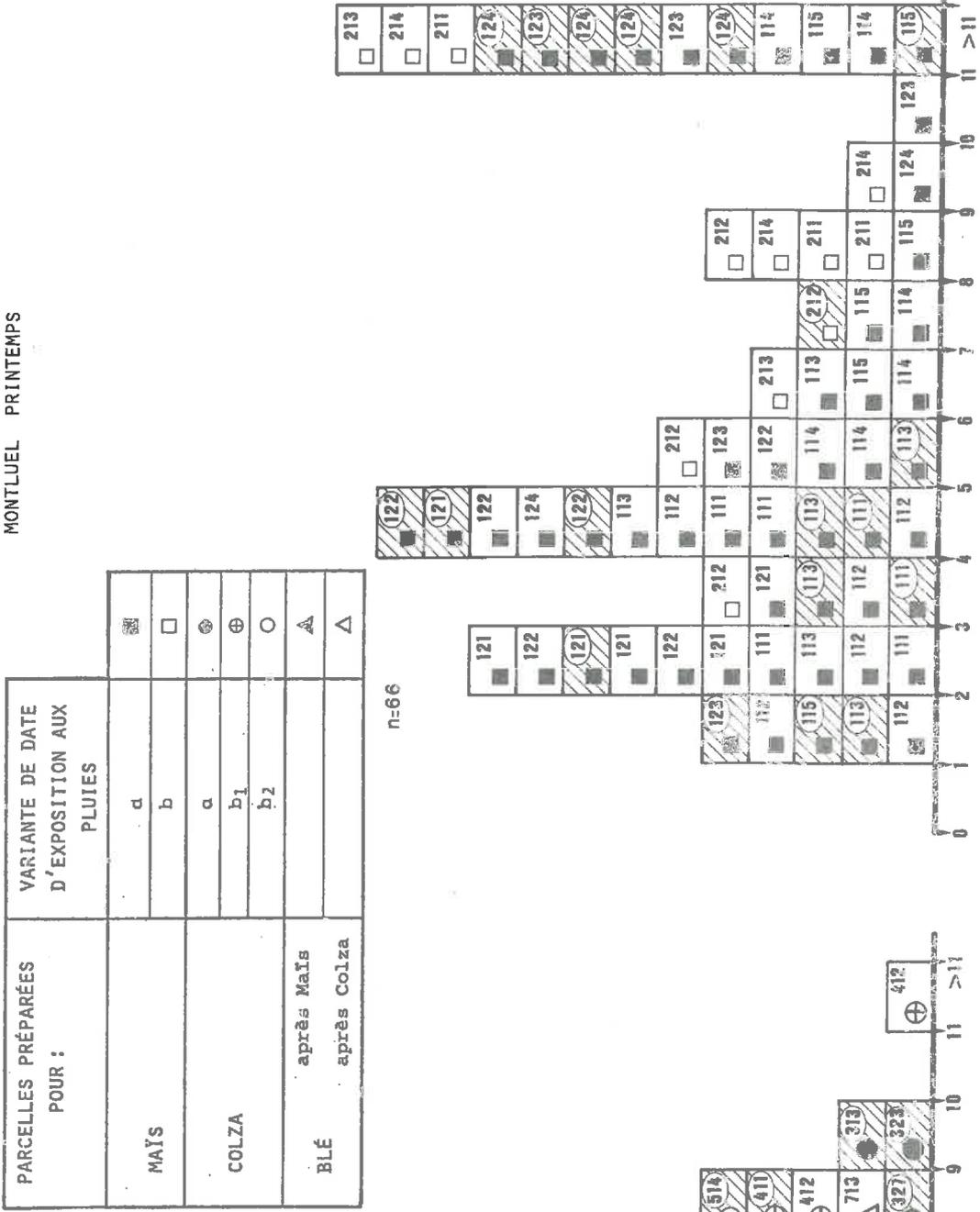


Fig. 20b : DISTRIBUTION DES COEFFICIENTS b

MONTLUEL PRINTEMPS



hatched box
r2 > 0,65

TABLEAU. 19.- MASSES TOTALES DE PROJECTIONS (indice p₈₀ T/ha) RECUEILLIES SUR LE SITE DE PALAISEAU.

PÉRIODE d'OBSERVATION	ÉTAT INITIAL DE LA SURFACE	MODIFICATION DE L'HISTOIRE HYDRIQUE	BLOC.	TYPE de PROTECTION PAR LES GRILLAGES					
				100	70	30	20	30 puis 100 à partir du 8/01	100 puis 30 à partir du 8.
10/11/81 au 7/04/82	A. grossier, plat	NON	I	18,2	/	6,7	/	/	/
			II	14,4	/	4,9	/	/	
		OUI	I	18,8	/	/	/	/	/
			II	15,4	/	/	/	/	/
	B. fin, billonné	NON	I	13,6	/	/	/	/	
			II	12,4	/	/	/	/	
C. fin, plat	NON	I	15,4	11,2	4,7	2,9	10,6	10	
		II	17,2	10,1	4,0	3,0	10,5	12	
	OUI	I	17,1	/	/	/	/	/	
		II	15,2	/	/	/	/	/	
8/03 au 7/04/82	C. fin, plat	NON	I	4,5	/	/	/	/	
			II	3,1	/	/	/	/	

TABLEAU. 20.- MASSES TOTALES DE PROJECTIONS (indice p₈₀ T/ha) RECUEILLIES SUR LE SITE DE PALAISEAU.

(1) et (2) respectivement avec et sans la séquence de Juin 82.

PÉRIODE d'OBSERVATION	CULTURE PREVUE DANS LES PARCELLES	PÉRIODE d'EXPOSITION AUX PLUIES	TRAITEMENTS EXPERIMENTAUX DU CHAMP D'ESSAI											
			ROTATION A				ROTATION B				ROTATION C			
			Bloc 1		Bloc 2		Bloc 1		Bloc 2		Bloc 1		Bloc 2	
N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2	N1	N2			
PRINTEMPS 82	MAIS	a 29.04.82 ⁽¹⁾ ou 30.06.82 ⁽²⁾	64,3	68,7	98,8	104,5	112,4	85,5	67,7	72,5	62,9	59,0	81,0	108,8
		b 12.05.82 ⁽¹⁾ ou 30.06.82 ⁽²⁾	—	47,5	—	—	—	82,8	—	—	—	49,7	—	—
			—	5,2	—	—	—	5,4	—	—	—	3,9	—	—
AUTOMNE - HIVER 82-83	COLZA	a 10.09.82 ou 13.01.83	—	41,8	44,0	—	—	44,0	44,0	—	—	40,3	39,7	
		b1 28.09.82 ou 13.01.83	—	25,5	—	—	—	—	—	—	—	26,9	—	
		b2 12.10.82 ou 13.01.83	—	20,4	—	—	—	—	—	—	—	20,7	—	
	Précédent Maïs	a 27.10.82 ou 13.01.83	—	15,6	—	—	—	—	—	—	—	18,4	—	
Précédent BLE Précédent Colza		—	15,8	—	—	—	—	—	—	—	16,3	—		

1.2.2. - Quantités cumulées : ordres de grandeur et hiérarchie des sources de variation

Les Tableaux 19 et 20 récapitulent les quantités globales de projections recueillies au cours des périodes d'observation et les Fig. 21 a, b et 22 montrent comment ces quantités ont été progressivement obtenues en fonction des pluies cumulées. On constate :

- que les ordres de grandeur correspondent à ceux obtenus par BOLLINNE (1982) ;
- que les valeurs sont très différentes selon les sites et les périodes d'exposition aux pluies. D'après les caractéristiques climatiques de ces périodes (Fig. 8 a, b, et c), elles sont en première approche d'autant plus élevées que les parcelles ont subi plus de pluies intenses ;
- que pour une même période d'exposition aux pluies la gamme de variation engendrée par les traitements expérimentaux est d'ampleur variable suivant la nature de ces traitements :
 - . l'effet de l'interception des gouttes (site de Palaiseau) est extrêmement marqué. Il est hautement significatif d'après l'analyse de variance (Annexe 16.1) et les masses de projection recueillies se classent dans l'ordre inverse de celui des taux de réduction de l'énergie cinétique.
 - . Les effets des variations d'état structural initial et d'histoire hydrique ne sont pas significatifs (site de Palaiseau, Annexe 16.2).
 - . Les effets des variations de constitution minérale et d'histoire culturale sont d'ampleur modeste mais significatifs : sur le site de Palaiseau le Bloc I plus argileux obtient des résultats plus élevés en moyenne que le Bloc II ; sur le site de Montluel les masses de projection recueillies sont les plus importantes sur les parcelles de rotation B (pailles enfouies sans prairie dans la rotation) qui se distingue significativement de la rotation C (pailles exportées, avec prairie). Les résultats obtenus en rotation A (pailles exportées sans prairies) sont assez voisins de C mais non significativement différents de B (Annexe 16.3).
- que les variations de p_{90} en fonction des pluies cumulées sont très parallèles d'une parcelle à l'autre au cours d'une même séquence.

Ce parallélisme se manifeste notamment entre les parcelles qui ont été exposées à des dates différentes ou qui ont subi des histoires plus ou moins dégradantes. Si l'on observe

P80 cumulé
t/Ha

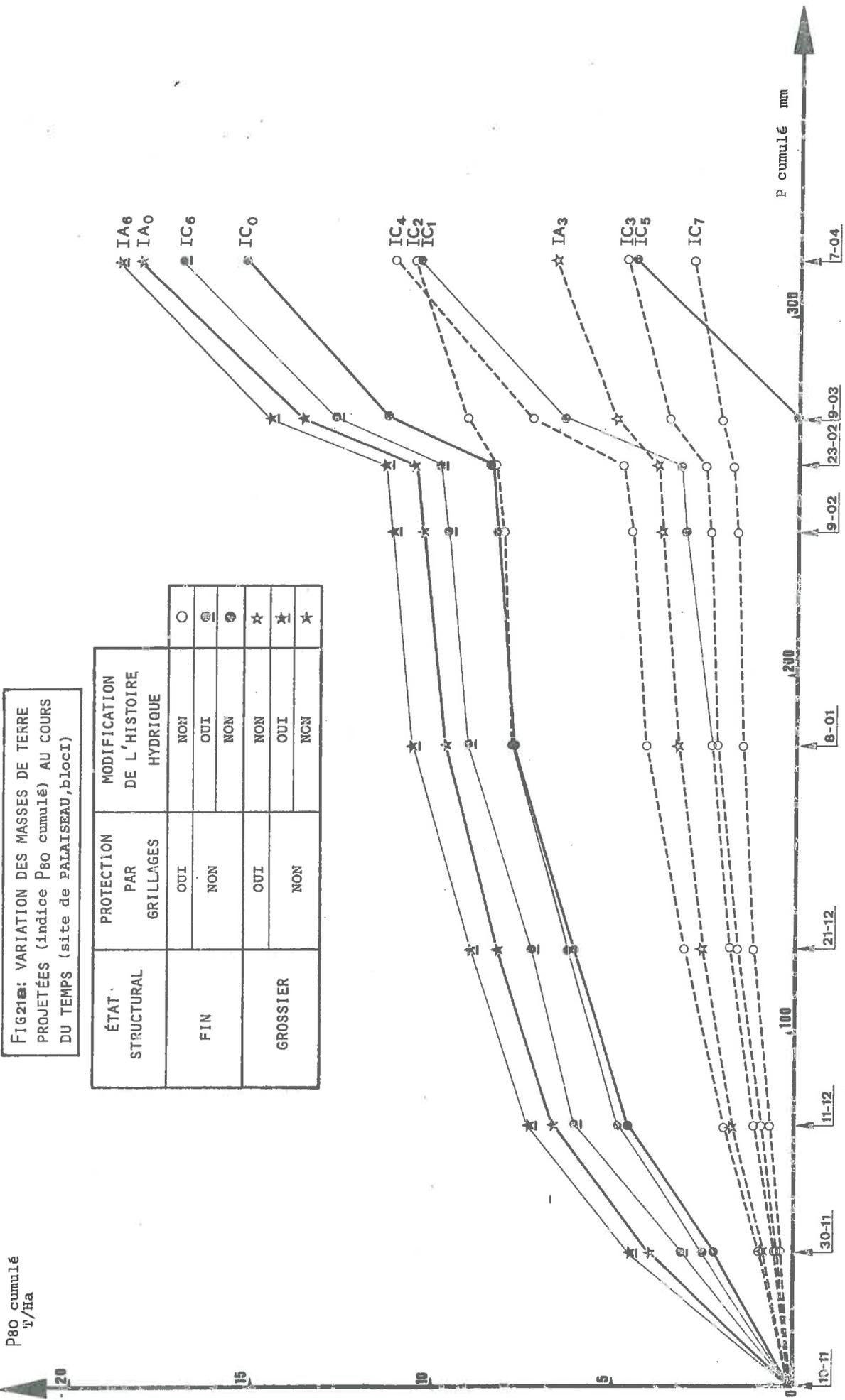


FIG21a: VARIATION DES MASSES DE TERRE
PROJETÉES (indice P80 cumulé) AU COURS
DU TEMPS (site de PALAISEAU, bloc1)

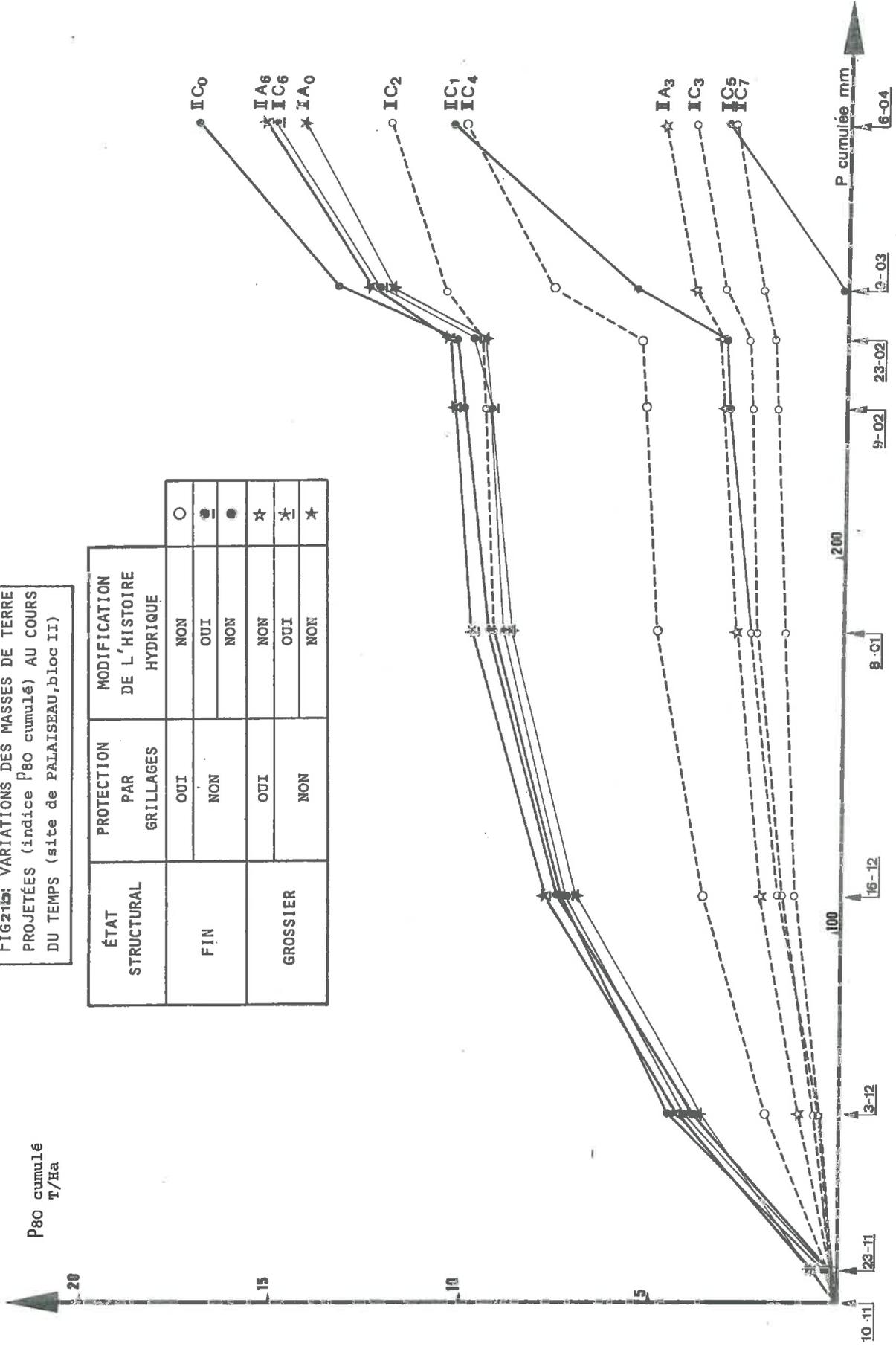
ÉTAT STRUCTURAL	PROTECTION PAR GRILLAGES	MODIFICATION DE L'HISTOIRE HYDRIQUE	
FIN	OUI	NON	○
	NON	OUI	⊗
	NON	NON	⊙
GROSSIER	OUI	NON	★
	OUI	OUI	★
	NON	NON	★

Permutation des
grillages entre
C1 et C2

FIG 215: VARIATIONS DES MASSES DE TERRE PROJETÉES (indice P80 cumulé) AU COURS DU TEMPS (site de PALAISEAU, bloc II)

P80 cumulé
T/Ha

ÉTAT STRUCTURAL	PROTECTION PAR GRILLAGES	MODIFICATION DE L'HISTOIRE HYDRIQUE	
FIN	OUI	NON	○
	NON	OUI	●
GROSSIER	OUI	NON	★
		OUI	✱
	NON	NON	✱

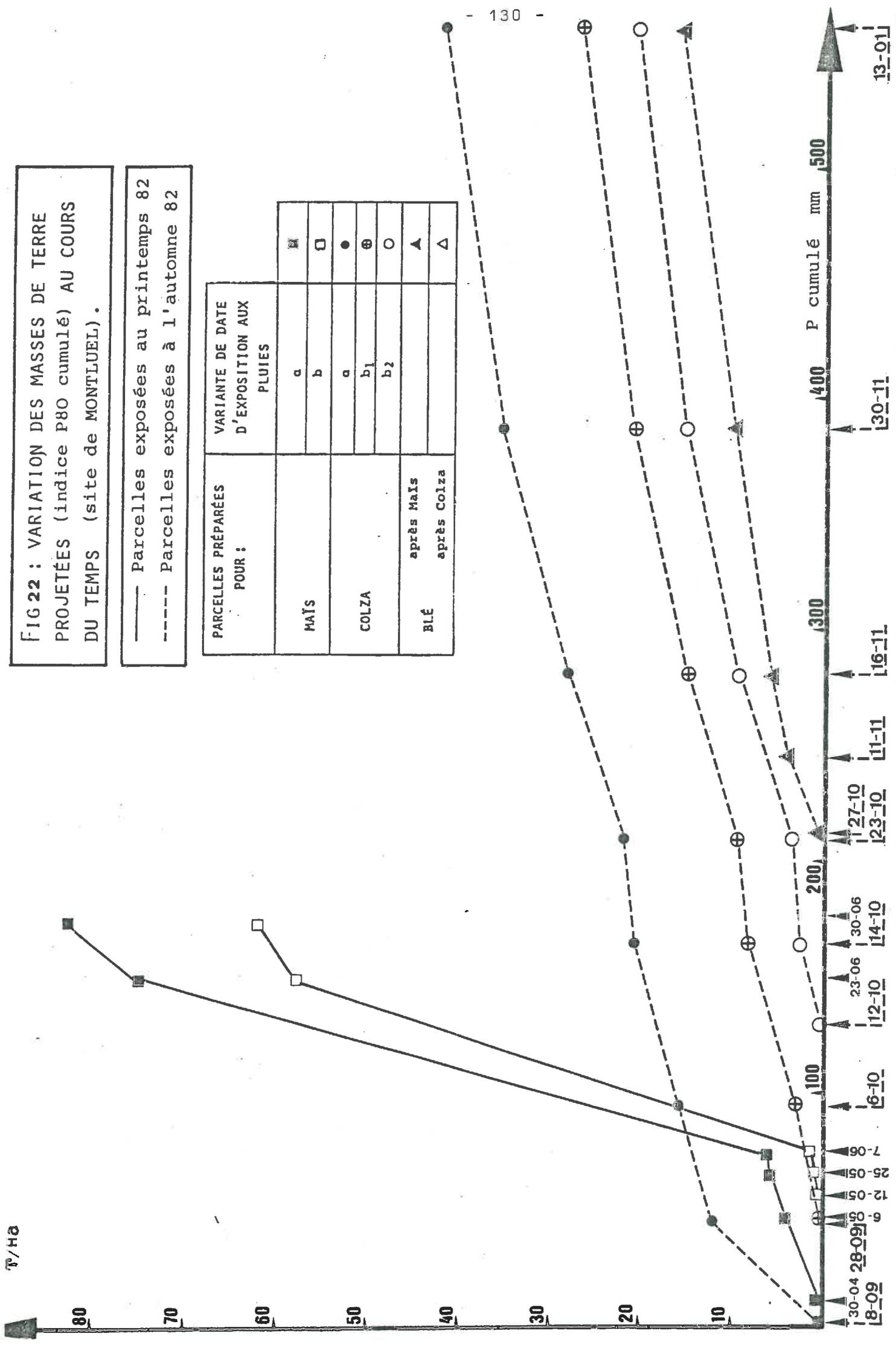


Permutation des
grillages entre
C1 et C2

FIG 22 : VARIATION DES MASSES DE TERRE PROJETÉES (indice P80 cumulé) AU COURS DU TEMPS (site de MONTLUEL).

— Parcelles exposées au printemps 82
 - - - - Parcelles exposées à l'automne 82

PARCELLES PRÉPARÉES POUR :	VARIANTE DE DATE D'EXPOSITION AUX PLUIES	
MAÏS	a	■
	b	□
COLZA	a	●
	b ₁	⊕
BLÉ	b ₂	○
	après Maïs	▲
après Colza		△



sur les Fig. 21 a et b les tracés correspondant aux parcelles I et II C2 d'une part, I et II C1 d'autre part⁽¹⁾, on constate qu'à partir du moment où les grillages sont placés ou enlevés à la surface de ces parcelles les tracés sont pratiquement identiques à ceux correspondant aux parcelles constamment protégées ou non protégées. Or, au moment de cette permutation l'état de la surface du sol est beaucoup plus dégradé pour les parcelles C2 (initialement protégées) que sur les parcelles C3 (constamment protégées) ; et au contraire beaucoup moins dégradé pour les parcelles C1 (initialement protégées) que pour les parcelles C0 (constamment non protégées).

On peut en conclure que parmi les sources de variation des quantités de terre projetée les caractères pluviométriques des séquences sont largement prépondérants vis-à-vis des facteurs relatifs au sol et notamment vis-à-vis de l'état de dégradation de la surface : il s'ensuit que pour étudier le déterminisme des quantités de terre projetée il faut aborder l'influence des facteurs climatiques avant celle des facteurs liés au sol. En première approche, on pourra donc considérer les résultats de chaque séquence sans tenir compte de sa position dans la succession des séquences.

1.2.3. - Analyse de l'influence des facteurs climatiques

A/ - Principales références acquises concernant l'érosivité des pluies

En laboratoire, de nombreux auteurs ont montré que les masses de terre projetée dépendaient de la vitesse et de la taille des gouttes et donc bien entendu de l'intensité pluviométrique (ELLISON, 1944⁽²⁾ ; EKERN, 1950 ; MIHARA, 1951 ; ROSE, 1960, MOLDENHAUER et LONG, 1964⁽²⁾ ; MAZURAK et MOSHER, 1968 ; BUBENZER et JONES, 1971⁽²⁾ ; MEYER, 1981⁽²⁾ ; KINNELL, 1982).

Pour obtenir des relations de portée générale, certains d'entre eux ont tenté de caractériser l'action des pluies en termes d'énergie ou de quantité de mouvement. En faisant varier séparément vitesse et taille de gouttes EKERN constate que les masses de terre projetée sont sensiblement proportionnelles et avec le même coefficient dans les deux cas, à l'énergie cinétique des gouttes rapportées à la surface de l'impact. Par contre, selon ROSE, c'est plutôt la quantité de mouvement qui est à mettre en cause (c'est-à-dire l'exposant 1 et non 2 de la vitesse).

(1) Rappelons que les codes des différentes parcelles figurent dans les Tableaux 14 et 15.

(2) Citation reprise de HUDSON, 1981.

TABLEAU. 21 .- EFFET DE L'INTERCEPTION DES GOUTTES PAR LES GRILLAGES SUR LES MASSES DE TERRE PROJETÉES.

TYPE de COMPARAISON	RAPPORT (APPROXIMATIF) DES ENERGIES RECUES	BLOC	RAPPORT DES INDICES P ₈₀ CUMULES (1)		
			du 10.11.81 au 8.01.82	du 8.01.82 au 7.04.82	du 10.11.81 au 7.04.82
C ₄ / C ₀	70 %	I	0,53	0,93	0,73
		II	0,52	0,67	0,59
C ₃ / C ₀	30 %	I	0,28	0,34	0,31
		II	0,24	0,22	0,23
C ₁ / C ₀	30 %	I	0,30		
		II	0,26		
C ₂ / C ₀	30 %	I		0,35	
		II		0,36	
A ₃ / A ₀	30 %	I	0,34	0,40	0,37
		II	0,32	0,36	0,34
C ₇ / C ₀	20 %	I	0,19	0,19	0,19
		II	0,17	0,17	0,17

(1) cf. analyse de variance en annexe 16.1.

TABLEAU. 22.- COEFFICIENTS DE CORRELATION SIMPLE ENTRE LES INDICES/p₈₀ ET LES CARACTERISTIQUES PLUVIOMETRIQUES DES SEQUENCES. (valeur: maximum soulignée)

SITE	TYPE de PARCELLES	CARACTERISTIQUES PLUVIOMETRIQUES DES SEQUENCES						NOMBRE RESULTA
		P. cumulé	E.C. cumulé	KE 5	KE 8	KE 10	KE 20	
PALAISEAU parcelles non protégées	A ₀	0,095	0,478	0,716	0,760	<u>0,789</u>	0,266	16
	A ₆	0,123	0,523	0,777	<u>0,835</u>	0,825	0,189	16
	C ₀	0,142	0,508	0,612	0,664	<u>0,753</u>	0,290	16
	C ₂ puis 1	0,126	0,468	0,591	0,635	<u>0,699</u>	0,147	16
	C ₆	0,099	0,505	0,697	0,790	<u>0,815</u>	0,289	16
MONTLIEU	Toutes parcelles exposées (1) (P ₈₀ moyen)	0,148	0,269	0,663	0,876	<u>0,930</u>	0,918	46
	idem (2)	0,458	0,480	0,557	<u>0,682</u>	0,564	0,549	43

(1) et (2) Respectivement avec et sans les séquences à très fortes pluies du 25.05 au 24.06.82

Sous pluies naturelles, FREE (1960) a observé que les masses de terre projetée étaient approximativement proportionnelles à la puissance 1,5 de "l'énergie cinétique des pluies" (calculée selon la relation 2, donnée dans la première partie). Rappelons que la prise en considération de seuils d'intensité (indice KE) pour le cumul des énergies cinétiques améliore la prédiction des masses de terre projetée (plusieurs travaux cités par HUDSON, 1981).

B/ - Résultats expérimentaux

a) - Variations synchroniques : effet de l'interception des gouttes de pluie.

Le Tableau 21, établi à partir des résultats acquis à Palaiseau, montre une bonne correspondance entre la réduction de l'énergie cinétique incidente par les grilles et celle des masses de terre projetée, si on considère l'ensemble de la période d'observation (Cf. colonne de droite). Mais la réduction des masses de terre projetée apparaît assez variable si on distingue des périodes plus brèves; elle est notamment moins importante au cours de la deuxième période d'exposition surtout pour le Bloc I légèrement plus argileux. D'après la Fig. 21, on voit que ceci est principalement dû aux résultats de la dernière séquence. Parmi les facteurs climatiques, l'effet d'impact des gouttes de pluie est donc bien la principale cause de variation des masses de terre projetée mais n'est pas la seule et on est amené à se demander si les alternances d'humectation-dessiccation (importantes du 9.03. au 7.04.1982) ne jouent pas elles aussi un rôle.

b) - Variations diachroniques : effet de différentes séquences pluvieuses.

D'après le Tableau 22, on voit que sur les deux sites d'expérience les corrélations de l'indice p_{80} avec la pluie cumulée sont faibles et s'élèvent progressivement lorsqu'on considère l'énergie cinétique de pluies d'intensité croissante jusqu'à un seuil d'intensité situé de 8 à 10 mm/h. On retrouve un résultat analogue à celui de MORGAN (1977, cité par HUDSON, 1981) en Grande Bretagne. Toutefois, si on exclut certaines séquences à pluies exceptionnellement intenses (séquences du 7 au 24.06 à Montluel), ces corrélations ne sont pas très élevées et nous avons constaté que les ordonnées à l'origine des régressions étaient différentes de zéro, ce qui indique que des pluies d'intensité inférieure au seuil considéré peuvent avoir une influence.

TABLEAU. 23.- EQUATION DE REGRESSION PROGRESSIVE DE L'INDICE p_{80} (T/ha) EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES PLUVIOMETRIQUES DES SEQUENCES. (Site de Palaiseau, parcelles non protégées.)

TYPE de PARCELLES (i)	COEFFICIENTS					CCM	F	
	constante	KE 20	KE 10-20	KE 5-10	KE < 5			
A ₀ (Etat initial motteux, plat, non protégé, histoire hydrique normale)	a	0,59	0,034 ⁺	0,027 ⁺⁺	-	-	0,794	11,1 ⁺⁺
	b	0,33	0,040 ⁺⁺	0,027 ⁺⁺	-	-	0,936	39,2 ⁺⁺
A ₆ (motteux, plat, non protégé, histoire hydrique perturbée)	a	0,52	0,031 ⁺	0,031 ⁺⁺	-	-	0,825	13,8 ⁺⁺
	b	0,26	0,036 ⁺⁺	0,031 ⁺⁺	-	-	0,923	31,6 ⁺⁺
C ₀ (fin, plat, non protégé, histoire hydrique normale)	a	0,64	0,036 ⁺	0,026 ⁺⁺	-	-	0,763	9,0 ⁺⁺
	b	0,31	0,043 ⁺⁺	0,026 ⁺⁺	-	-	0,927	33,8 ⁺⁺
C ₂ (idem C ₀) jusqu'au 8.01 et	a	0,70	0,025	0,027 ⁺⁺	-	-	0,699	6,2 ⁺
C ₁ (idem C ₀) à partir du 8.01	b	0,29	0,034 ⁺⁺	0,027 ⁺⁺	-	-	0,931	35,6 ⁺⁺
C ₆ (fin, plat, non protégé, histoire hydrique perturbée)	a	0,51	0,037 ⁺	0,028 ⁺⁺	-	-	0,821	13,5 ⁺⁺
	b	0,24	0,043 ⁺⁺	0,028 ⁺⁺	-	-	0,958	61,5 ⁺⁺

(1) (a) et (b) Respectivement avec et sans la séquence du 9.03 au 6.04 82, soit 16 et 14 résultats.

++ P ≤ 0,01
+ P ≤ 0,05
(+) P ≤ 0,10

TABLEAU. 24.- EQUATIONS DE REGRESSION PROGRESSIVE DE L'INDICE p_{80} (T/ha) EN FONCTION DES CARACTERISTIQUES PLUVIOMETRIQUES DES SEQUENCES. (Site de Montluel, valeurs de p_{80} correspondant à la moyenne des indices p_{80} des parcelles présentes lors de chaque séquence).

NOMBRE DE RESULTATS (1)	PALIER DE LA REGRESSION PROGRESSIVE	COEFFICIENTS					CCM	F
		Constante	KE 20	KE 10-20	KE 5-10	KE < 5		
a : 46	2	- 0,22	0,066 ⁺⁺	0,037 ⁺⁺	—	—	0,934	145,8 ⁺⁺
	4	- 3,82 ⁺	0,075 ⁺⁺	0,028 ⁺	0,0049	0,0029	0,949	92,0 ⁺⁺
b : 43	2	3,18 ⁺⁺	0,018 ⁺⁺	0,0084	—	—	0,586	10,5 ⁺⁺
	4	0,53	0,029 ⁺⁺	0,0030	0,0042 ⁺⁺	0,0015 ⁺⁺	0,859	26,7 ⁺⁺

(1) a et b : respectivement avec et sans les séquences de juin 82.

++ P ≤ 0,01
+ P ≤ 0,05
(+) P ≤ 0,10

On a donc fait intervenir plusieurs variables explicatives en utilisant la méthode de régression linéaire progressive avec variables imposées (énergies cinétiques correspondant à 4 classes d'intensité introduites par ordre décroissant d'intensité). Pour contrôler la stabilité des résultats, on a individualisé les différents types de parcelles exposées sur chaque site⁽¹⁾, les résultats détaillés figurant en Annexe 16.4.

. Pour le site de Palaiseau (Tableau 23), on considère successivement :

- l'ensemble des séquences, soit 16 résultats par type de parcelles. L'examen des valeurs des écarts résiduels (Annexe 16.5) montre alors un écart observation-prévision particulièrement élevé pour la dernière séquence, surtout pour le Bloc I. On retrouve un comportement particulier déjà détecté dans l'analyse de l'effet des grillages.
- L'ensemble des séquences moins la dernière, pour chaque Bloc, soit 14 résultats. Logiquement les coefficients de corrélation multiple sont alors plus élevés.

Les formes des équations obtenues (colonnes 4 à 8 du Tableau 23) sont peu différentes entre les divers types de parcelles, avec ou sans la dernière séquence : les ordonnées à l'origine ne sont pas significativement différentes de 0 ; le classement des coefficients est dans la plupart des cas conforme à celui des classes d'intensités et pour les intensités inférieures à 10 mm/h les coefficients ne sont généralement pas significativement différents de 0.

. Pour le site de Montluel (Tableau 24), on considère successivement :

- l'ensemble des 46 résultats. Dans ce cas, les séquences comprenant les pluies très violentes de juin 1982, correspondent à des valeurs p_{80} 5 à 10 fois plus élevées que pour les autres séquences, et ont de ce fait un poids considérable par rapport à celles-ci.
- L'ensemble des séquences moins celles de juin 1982, soit 43 résultats. Les valeurs des coefficients de corrélation multiple sont alors moins élevées que dans le cas précédent.

(1) Les dates de relevés de récepteurs n'étant pas toujours identiques d'un bloc à l'autre au sein des dispositifs, on a considéré systématiquement comme des individus différents les séquences relatives à chaque bloc et à des parcelles de date d'exposition différente. Il y a donc plus de résultats que de séquences climatiques réellement différentes.

Seules les équations obtenues à partir des données moyennes, très représentatives de la tendance générale, figurent dans le Tableau 24. Leur forme est sensiblement modifiée par la présence ou l'absence des séquences de juin 1982 si on les intègre, les seuls coefficients significatifs sont ceux affectant les énergies cinétiques des pluies d'intensité supérieure à 10 mm/h. Par contre, si on les exclut, on voit apparaître des coefficients significatifs pour les énergies cinétiques des pluies de faible intensité.

Pour les deux sites, la position des écarts résiduels entre observations et valeurs calculées d'après les régressions correspondant à chaque séquence dans l'histogramme des résidus est très voisine d'une parcelle à l'autre : ceci signifie que la variance résiduelle a pour origine principale une explication imparfaite de l'effet séquence. Or, on peut à nouveau penser que celui-ci, en dehors des pluies est lié à l'histoire hydrique du sol qui résulte de caractéristiques communes à toutes les parcelles exposées (pluie, évaporation). On a donc confronté les écarts résiduels moyens (valeurs observées de p_{80} - valeurs calculées d'après les équations de régression) avec les traits principaux de l'histoire hydrique des séquences correspondantes (Annexe 16.5). On constate que dans la majorité des cas, les résidus positifs (sous estimation des masses de terre projetée) correspondent à des séquences au cours desquelles la surface du sol a subi des alternances d'humectation et de dessiccation. Ceci est vrai sur les deux sites, mais est particulièrement accentué pour le Bloc I du site de Palaiseau, plus argileux et dont on a déjà signalé le comportement particulier à propos de l'influence des grillages protecteurs.

1.2.4. - Analyse de l'influence du sol et des interactions sol-climat

A/ - Principales références relatives à l'érodibilité⁽¹⁾

Le principe des travaux relatifs à ce thème est de comparer les masses de terre exportées à partir d'échantillons ou de parcelles expérimentales de sols différents, soumis à la même pluie ou à la même séquence de pluie. Nous devons donc sélectionner parmi ces travaux ceux où le ruissellement ne peut jouer qu'un rôle nul ou mineur dans l'entraînement initial des particules solides. Les travaux les plus intéressants, compte-tenu de cette condition, du nombre et de la

(1) Au sens le plus large (HUDSON, 1981), ce terme désigne la susceptibilité du terrain à l'érosion, c'est-à-dire comprend l'influence de la topographie et de la mise en valeur. Il est généralement utilisé dans un sens plus restreint correspondant à la sensibilité du sol, liée à ses caractères de constitution et d'organisation (Facteur de l'équation universelle des pertes en terre de WISCHMEIER et SMITH)

gamme de variation des sols testés, sont ceux de BRYAN (1968, 1974, 1976). A partir d'expériences sous pluie simulée, cet auteur observe que les caractéristiques les mieux corrélées aux pertes en terre sont les taux d'agrégats stables⁽¹⁾ ($r = 0,6$). La teneur en sable est corrélée positivement, la teneur en argile et en matières organiques négativement avec les pertes en terre, mais avec des coefficients plus faibles. Ces conclusions ont été confirmées ultérieurement par LUK (1979). D'une manière plus générale, elles sont cohérentes avec les résultats des travaux également relatifs à l'érodibilité, mais réalisés dans une gamme de conditions plus large où le ruissellement peut éventuellement intervenir, par exemple les corrélations négatives observées entre les pertes en terre et la teneur en matière organique (WISCHMEIER et MANNERING, 1969 ; WISCHMEIER et al., 1971) ou la stabilité structurale (QUANTIN et COMBEAU, 1962). Cet ensemble de faits suggère que les différents processus de désagrégation jouent un rôle important dans la mobilisation de terre consécutive à l'impact des gouttes, et qu'on pourrait tirer des indices de stabilité structurale certaines indications de tendances sur l'érodibilité du sol (MONNIER et al., 1981).

B/ - Résultats expérimentaux

Il nous faut à présent considérer individuellement chaque parcelle en la caractérisant par les critères analytiques relatifs au sol. Nous distinguerons sur chaque site différentes périodes de recueil de projection qui font éventuellement intervenir différents types d'interactions entre le climat et la surface du sol.

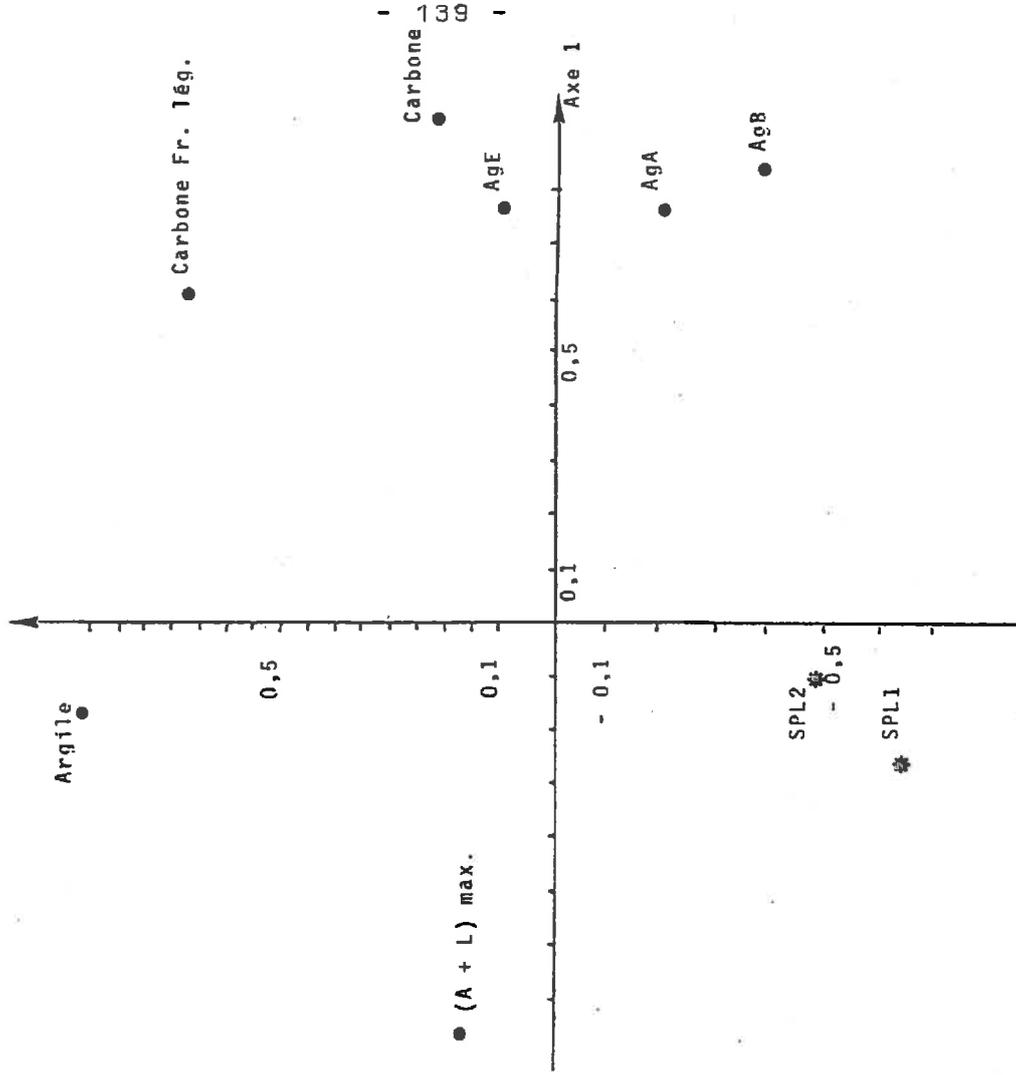
Une première approche synthétique des relations entre les masses de terre projetée et les critères relatifs au sol est obtenue en projetant les indices p_{80} en variables supplémentaires sur les graphes d'analyse en composantes principales réalisées pour étudier la variabilité des caractéristiques du sol des parcelles expérimentales (Fig. 23 a, b, et c) ; dérivées des Fig. 9 a, b et c). On constate alors :

- que les relations entre les indices p_{80} et les déterminations analytiques choisies pour caractériser les parcelles expérimentales sont avant tout peu stables : la position des variables SPL (correspondant aux indices p_{80} pour différentes périodes de recueil) au sein des graphes d'ACP est fluctuante, d'un site à l'autre et même d'une période à l'autre au sein d'un même site (Cf. par exemple SPL₁ et SPL₂ sur la Fig. 23 a).

(1) Dont la méthode de détermination est, dans ce cas, un tamisage en phase liquide, assez voisine de la méthode utilisée en France.

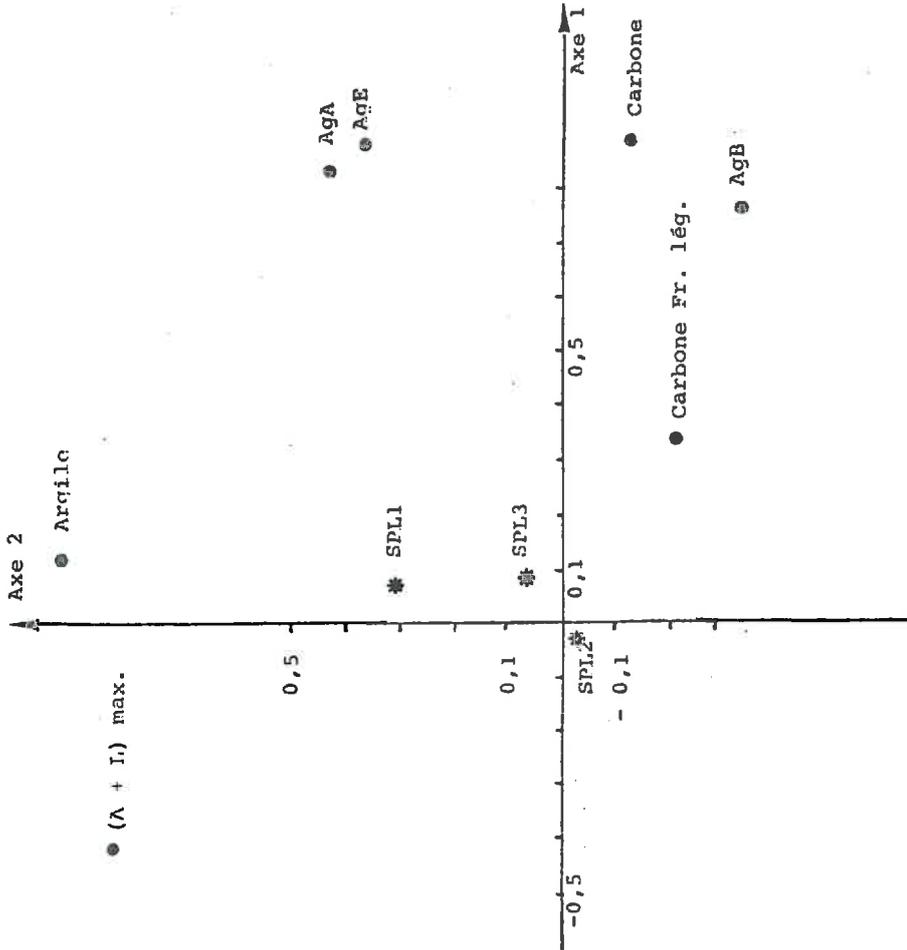
c) SITE DE MONTLUEL, automne-hiver 82-83

SPL1 : Indice P80 cumulé du 23/10 au 16/11
 SPL2 : " " " 16/11 13/01



b) SITE DE MONTLUEL, printemps 1982

SPL1 : Indice P80 cumulé du 30/04 au 25/05
 SPL2 : " " " 25/05 au 23/06
 SPL3 : " " " 23/06 au 30/06



- que la relation attendue entre les indices p_{80} et la stabilité structurale considérée globalement ne se dégage pas, alors même que la stabilité structurale est un facteur important de discrimination des parcelles : elle correspond sensiblement à l'axe 2 sur la Fig. 23 a (sit de Palaiseau) et aux axes 1 sur les Fig. 23 b et c (sit de Montluel), très peu corrélés avec les masses de terre projetée sauf dans un cas (SPL 1 à Palaiseau, Fig. 23 a où contrairement à ce que l'on aurait pu attendre l'indice p_{80} est corrélé positivement à la stabilité structurale.

On retrouve les mêmes indications à partir des coefficients de corrélation simples calculés entre les indices p_{80} et la détermination analytique (Annexe 16.6) : ils sont en général assez faibles et instables. Cependant un examen plus approfondi montre que :

- les indices p_{80} sont toujours corrélés positivement aux taux d'agrégats stables après prétraitement alcool, les coefficients étant même assez élevés sur le site de Palaiseau où cette caractéristique est plus variable.
- Cette corrélation positive entre p_{80} et AgA est souvent complétée par une corrélation contradictoire avec l'une ou l'autre des composantes de l'indice I_s , traduisant cette fois un accroissement concomitant des indices p_{80} et de la sensibilité à la désagrégation (coefficients négatifs avec AgB et AgE , ou positif avec ALM). Ceci est plus ou moins net selon les conditions de réalisation de tests d'analyse d'agrégats : lorsque, pour améliorer la précision et la reproductibilité, on élimine de la prise d'essai les fragments de calibre inférieur à 200μ , on voit apparaître des coefficients systématiquement négatifs entre les indices p_{80} et AgE ⁽¹⁾.

Ces indications sont confirmées par le calcul d'équations de régressions multiples (Tableaux 25 et 26). La considération simultanée de deux variables aboutit à des coefficients de corrélation multiple qui restent pour certains d'entre eux au-delà des seuils de significativité, compte tenu du faible nombre de parcelles étudiées, mais sont nettement plus élevés que les coefficients de corrélation simple précédemment évoqués. Les taux AgA interviennent 10 fois sur 10 avec des coefficients positifs, et ceci se combine dans 9 cas sur 10 avec une tendance contraire qui traduit, elle, une influence positive de la sensibilité à la désagrégation sur les masses de terre projetée.

[1] Cf. deux dernières colonnes de l'Annexe 16.6.

TABLEAU. 25.- RELATIONS ENTRE MASSES DE PROJECTION RECUEILLIES (indices p_{80} cumulés T/ha) ET COMPOSANTES DE L'INDICE DE STABILITE STRUCTURALE. Site de Palaiseau.

PERIODE de RECUEIL	N° DU PALIER de la REGRESSION (1)	COEFFICIENTS DE LA REGRESSION MULTIPLE (2)					CCM	F (2)	NOMBRE de RESULTATS
		Constante	Ag A (%)	Ag B (%)	Ag E (%)	(A+L) max. (%)			
10.11 au 8.01 (SPL 1)	1	4,54 (+)	0,225(+)	—	—	—	0,520	3,7(+)	12
8.01 au 7.04 (SPL 2)	2	- 8,03	0,341 +	—	—	0,353(+)	0,701	4,3 +	12
23.02 au 9.03	2	5,15 +	0,077	- 1,29 +	—	—	0,749	5,7 +	12
9.03 au 7.04	2	- 8,01	0,226 +	—	—	0,217 (+)	0,672	4,5 +	14
10.11 au 7.04 (Total)	2	13,84	0,513 (+)	- 2,67	—	—	0,756	4,7(+)	10

(1) correspondant à la valeur F maximum

(2) ++ $P \leq 0,01$
 + $P \leq 0,05$
 (+) $P \leq 0,10$

TABLEAU. 26.- RELATIONS ENTRE MASSES DE PROJECTION RECUEILLIES (indices p_{80} cumulés T/ha) ET TAUX D'EGREGATS STABLES (protocole modifié(1)). SITE DE MONTLUEL.

	PERIODE de RECUEIL	COEFFICIENTS DE LA REGRESSION MULTIPLE(2)			CCM	F (2)	NOMBRE de RESULTATS
		Constante	Ag A	Ag E			
PRINTEMPS (3)	30.04 au 25.05 (SPL 1)	6,60	0,090 (+)	- 0,179 +	0,600	2,5	12
	23 au 30.06 (SPL 3)	9,78	0,289	- 0,593	0,515	1,6	12
AUTOMNE	23.10 au 16.11 (SPL 1)	6,11	0,153	- 0,198	0,490	1,1	10
	16.11 au 13.01 (SPL 2)	14,64 +	0,326	- 0,531 (+)	0,889	3,2(+)	10
	23.10 au 13.01 (SPL 3)	20,75 +	0,478	- 0,730 (+)	0,650	2,6	10

(1) La prise d'essai est calibrée de 0,2 à 2 mm

(2) ++ $P \leq 0,01$
 + $P \leq 0,05$
 (+) $P \leq 0,10$

(3) Les résultats n'ont pas été effectués pour SPL2. pour lequel les résultats sont incertains (apports par ruissellement)

Ceci rend compte des effets des traitements expérimentaux précédemment constatés (Tableaux 19 et 20) ; sur le site Palaiseau le Bloc I plus argileux, présente des taux AgA plus élevés que le Bloc II où les masses de terre projetée sont en moyenne plus faibles. Sur le site de Montluel les parcelles de rotation B (pailles enfouies) présentent des taux AgA particulièrement élevés alors que les parcelles de rotation C se distinguent surtout par des taux AgB ou AgE élevés.

1.2.5. - Discussion générale

Au cours d'une pluie, l'énergie cinétique et la quantité de mouvements dissipées lors des impacts de gouttes permettent la mise en mouvement de quantités importantes de matière solide. Comme ces caractéristiques sont de plus très variables d'une pluie à l'autre, c'est bien avant tout de l'agressivité des pluies que dépendent les variations des masses de terre projetée au cours de périodes climatiques différentes. On peut estimer cette agressivité à partir d'indices d'érodibilité déduits des enregistrements de hauteur et d'intensité, et établir des relations sensiblement linéaires entre ces indices et les masses de terre projetée.

Conformes à ces tendances établies par de nombreux auteurs, les résultats obtenus font par ailleurs apparaître :

- que des pluies généralement considérées comme non érosives ($I < 10$ mm/h) peuvent avoir une influence significative sur des sols très sensibles (cas du sol de Montluel).
- une variabilité résiduelle assez importante liée aux interactions climat-sol : l'efficacité des impacts de gouttes semble dépendre non seulement des propriétés des matériaux du sol, mais aussi de son histoire hydrique : les alternances dessiccation-humectation semblent jouer un rôle sensibilisateur, tendance qui est également mise en évidence d'autres auteurs (BRYAN, 1976 ; LUK, 1979 ; THORNES, 1980 ; VALENTIN, 1981).

En revanche, nous ne retrouvons pas la relation simple généralement invoquée entre érodibilité et stabilité structurelle des liaisons de sens contraire et de forme assez variable manifestent entre les masses de terre projetée et les différentes composantes de l'indice de stabilité I_s .

Mais un examen plus détaillé de la bibliographie nous montre que si la corrélation négative entre érodibilité et stabilité structurelle est une tendance communément admise, les liaisons obtenues ne sont en fait ni très étroites, ni très

stables d'un groupe de sols à l'autre. En restreignant la gamme des sols testés, certains auteurs ont même obtenu des classements contraires à cette tendance. Ainsi EPSTEIN et GRANT (1967), en comparant 6 sols différant principalement par la teneur en argile, observent que celle-ci est corrélée positivement avec l'érodibilité. DE PLOEY et MUCHER (1981) étudiant 21 sols de limons en Belgique, constatent que

les sols les plus stables ne sont pas nécessairement les moins sensibles au détachement de particules sous l'effet des gouttes de pluie. Ils observent en outre que, selon les conditions, ce détachement peut prendre des formes variables : séparation et projection de petits agrégats (cas fréquent des sols les plus stables et notamment des sols les plus argileux) ; désagrégation au contact de la goutte et chute de petits amas boueux (cas typique pour les sols les plus instables).

Il y aurait donc bien différents processus de mobilisation, chacun répondant vraisemblablement à un déterminisme particulier. Réciproquement, un même caractère de constitution du sol pourrait avoir plusieurs types d'influences (éventuellement contraires) sur l'érodibilité, chacune de ces influences s'extériorisant de façon plus ou moins intense suivant les conditions climatiques ou culturelles, ce qui permettrait de comprendre pourquoi l'érodibilité ne peut être reliée de manière stricte et stable aux caractères de constitution et même aux propriétés physiques qui en dérivent. Les résultats enregistrés permettent d'ores et déjà de mettre en cause deux modalités principales :

- la microfissuration, qui se traduirait ultérieurement par la projection de petits agrégats stables plus ou moins nettement préindividualisés⁽¹⁾. A cette modalité seraient imputables le rôle sensibilisateur des alternances d'humectation-dessiccation, et les corrélations positives entre masses de terre projetées et taux d'agrégats stables après prétraitement alcool (AgA). En effet, d'après KHEYRABI (1966) ce test a également pour effet de sélectionner certains fragments préindividualisés et plus stables ;
- la désagrégation, ayant pour conséquence la projection de fragments d'agrégats ou de particules élémentaires. A cette modalité seraient imputables la différence de sensibilité qui apparaît entre les sols de Palaiseau et Montluel, et les corrélations négatives entre les masses de terre projetée et les critères de stabilité structurale autres que AgA.

(1) Dont nous avons, dans la première partie, mentionné l'apparition, à plusieurs reprises et y compris sur le site de Montluel, sous forme de petites accumulations dans les micro-dépressions (Cf. cliché IIIc).

Enfin, bien que très imprécises, les indications recueillies sur les distances de projection suggèrent qu'une partie importante de la masse de terre déplacée l'est à de faibles distances (inférieures à 5 cm). Dans ces conditions il faut considérer l'indice p_{80} comme un indicateur partiel et minorant des quantités de terre déplacées, non seulement quantitativement, mais aussi qualitativement ; en effet, il n'est pas certain que les déplacements à faible distance aient le même déterminisme que les déplacements à distance décimétrique. Ces réserves étant faites, il faut aussi remarquer que les résultats fournis par l'étude des variations de cet indicateur s'avèrent cohérents et interprétables, ce qui nous incite à poursuivre et approfondir son utilisation comme indicateur de l'action des pluies sur le sol.

1.3. - LES MASSES DE TERRE TRANSFEREE

1.3.1. - Position du problème et ébauche de modélisation

Pour qu'une certaine quantité de terre (ΔMT) soit transférée au cours d'une séquence climatique entre deux zones distantes de quelques centimètres à plusieurs décimètres il faut que soient réunies plusieurs conditions :

- une masse de terre au moins égale doit avoir été mobilisée (c'est-à-dire détachée) au niveau de la zone de départ ;
- La masse de terre mobilisée sur la zone de départ doit pouvoir être acheminée vers la zone réceptrice ce qui nécessite :
 - . l'existence d'un excès d'eau à la surface du sol au sein duquel cette terre puisse être mise en suspension ;
 - . la possibilité pour cette lame d'eau de circuler vers la zone réceptrice, impliquant d'une part une différence d'altitude entre les deux zones et d'autre part l'absence de barrages sur le trajet.

Ces conditions ne sont pas réunies avant le début de la phase 2, mais le sont pratiquement lors de chaque pluie ensuite. Considérant par ailleurs que le ruissellement n'est jamais apte à mobiliser la matière solide, mais capable d'en assurer le transport, nous n'avons plus à nous intéresser aux caractéristiques propres du ruissellement. En effet, sous ces hypothèses, la masse de terre transférée doit avant tout être contrôlée par la masse de terre mobilisée (en principe principalement, mais peut-être exclusivement sous l'effet de l'impact des gouttes).

Soit donc Δm_B la masse de terre mobilisée par unité de surface totale pendant une séquence climatiques donnée. Subdivisons (Fig. 24 a) la surface du sol en deux grands types de zones : de départ (indices D), d'accumulation (indices A). Si nous admettons que m_B est constant dans l'espace, nous avons :

$$\Delta m_{BD} = \Delta m_{BA} = \Delta m_B = \text{Cte pour une séquence.}$$

Si par ailleurs le transfert de D vers A affecte intégralement et exclusivement, la terre mobilisée en D, nous aurons :

$$\Delta m_T = \Delta m_B \cdot S_D, \text{ c'est à dire par unité de surface totale:}$$

$$\Delta m_T = \Delta m_B \cdot \frac{S_D}{S_T}$$

Les surfaces de départ diminuant progressivement jusqu'à s'annuler, le terme $\frac{S_D}{S_T}$ tend donc vers 0 ainsi que Δm_T par voie de conséquence : ceci correspond au fait que, lorsque la surface est complètement arasée, les sources de transfert de terre sont épuisées, ce qui n'est vrai que si la surface est rigoureusement plane.

Envisageons maintenant les masses de terre non plus par séquence mais cumulées au cours du temps à partir du début de la phase 2, soit respectivement et toujours par unité de surface totale m_B (mobilisée) et m_T (transférée). Selon les considérations précédentes nous observerons une relation $m_T = f(m_B)$ qui devrait pouvoir se représenter comme sur la Fig. 24 b, où on a schématisé l'évolution de $\frac{m_T}{m_B}$ dans trois cas de figure, différant soit par des rapports $\frac{S_D}{S_T}$ en début de phase 2, soit par l'asymptote.

Par ailleurs, si la mobilisation est due à l'impact des gouttes, on peut penser qu'une partie importante de m_B correspond aux masses de terre projetée. On peut donc mettre en relation les déterminations expérimentales concernant m_T avec les indices p_{80} .

1.3.2. - Confrontation avec les données expérimentales

A/ - Principe de la démarche et données utilisées

Cette confrontation comporte deux aspects :

- vérifier que les masses de terre transférées dépendent des masses de terre projetée. A cet égard, l'examen le plus probant consiste à examiner des couples (m_T , p_{80}) déterminés de façon synchronique sur différentes parcelles.

FIG 24 : ELEMENTS DE MODELISATION DES RELATIONS ENTRE TRANSFERT ET MOBILISATION

FIG 24a : SCHEMA DES TRANSFERTS AU COURS D'UNE SEQUENCE.

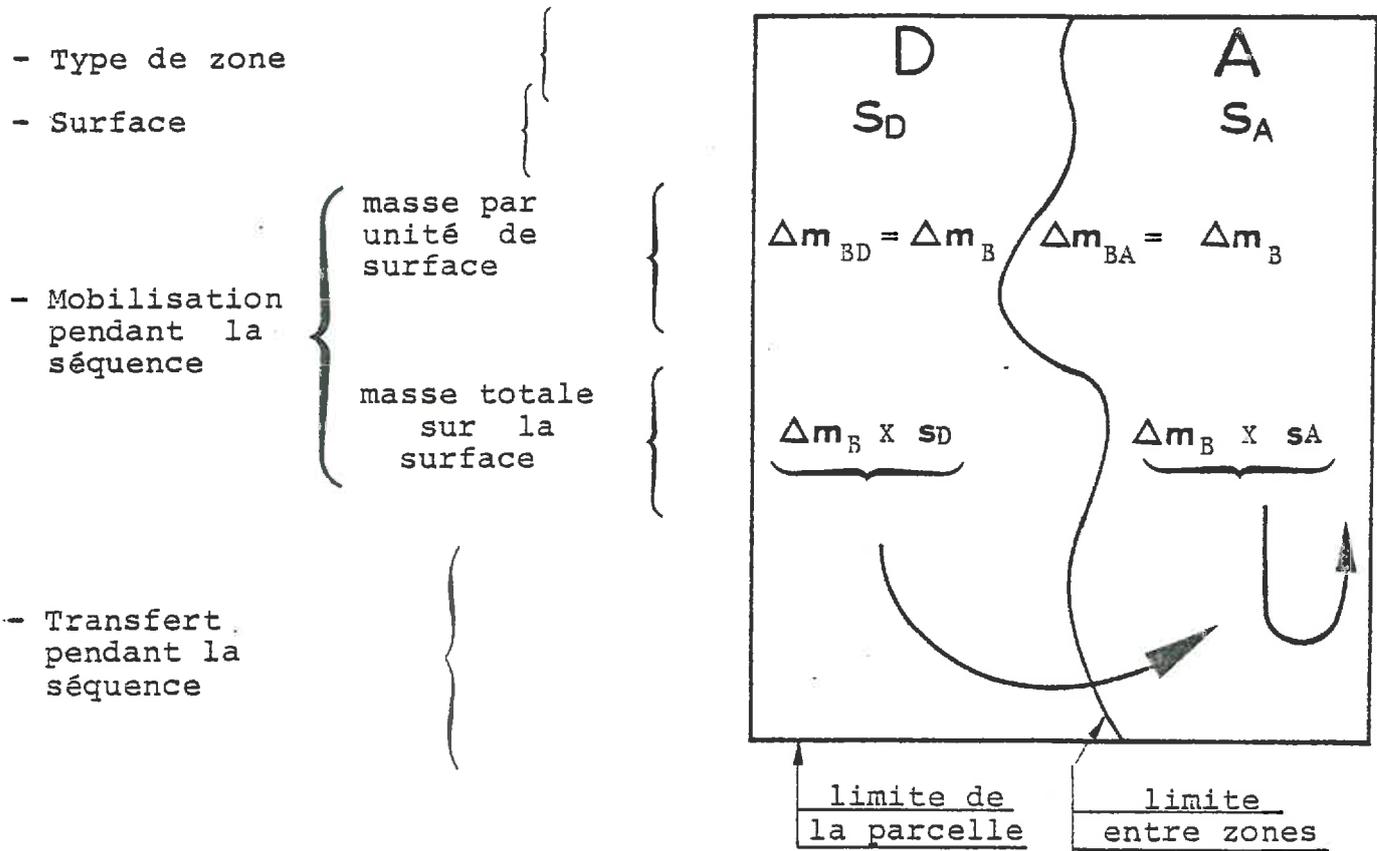
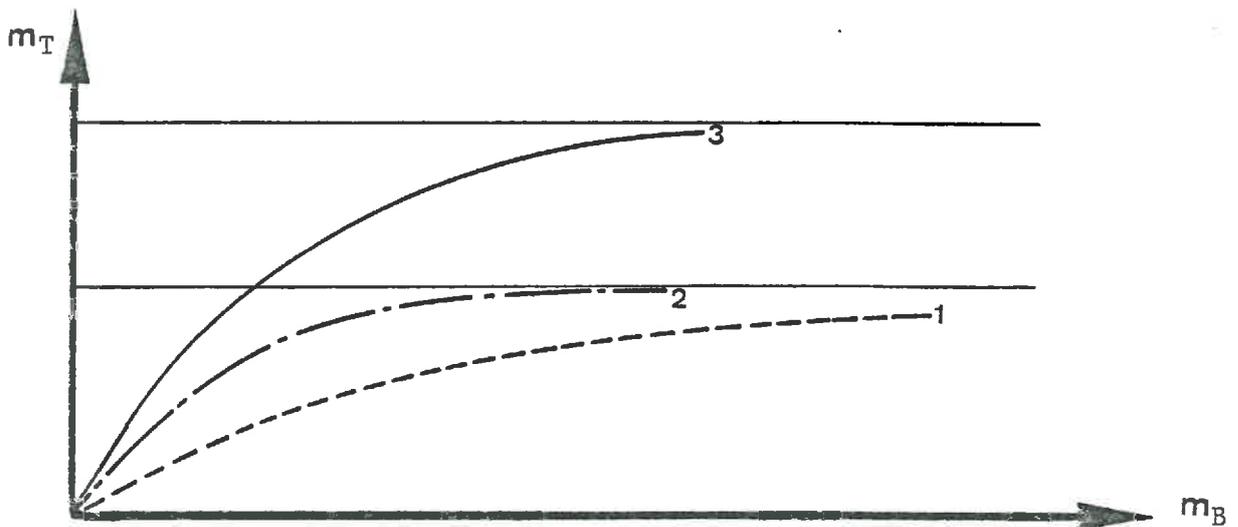


FIG 24b : ALLURE DE VARIATION DES TRANSFERTS CUMULES



m_T, m_B : Masses de terre cumulées par unité de surface, respectivement transférée et mobilisée.

- Masse de terre transférable faible (1,2) ou élevée (3)
- Rapport SD/ST faible (1) ou élevé (2,3) en début de phase 2.

- vérifier que cette dépendance correspond, au cours de la dégradation, à l'allure curvilinéaire asymptotique indiquée sur la Fig. 24 b. Il faut alors procéder à un examen (diachronique cette fois) des couples (m_T , p_{80}) obtenus au cours du temps sur la même parcelle ou sur des parcelles peu différentes du point de vue microtopographique, ceci permettant de supposer que l'évolution du rapport SD/ST n'introduit pas de trop grandes variations entre parcelles.

Les relevés de jalons fournissent une estimation directe de m_T (Cf. 4^{ème} partie § 222B relation 4), à différentes dates pour une même parcelle. Les jalons ont été installés à une date correspondant approximativement au début de la phase 2 dans la majorité des cas traités. Les relevés ne sont malheureusement utilisables sur une longue période que sur le site de Montluel, les jalons ayant été déchaussés par le gel à plusieurs reprises sur le site de Palaiseau⁽¹⁾. D'autre part, on n'a pris en considération que les résultats pour lesquels la moyenne algébrique des variations de cote était comprise entre -1 et +1 mm, de manière à éliminer des cas où le transect des jalons était manifestement non représentatif de la parcelle dans son intégralité.

Les indices p_{80} sont cumulés (pour chaque couple m_T , p_{80}), sur la période comprise entre la date d'installation des jalons et la date du relevé qui fournit l'estimation de m_T .

B/ - Relations synchroniques entre m_T et p_{80}

Pour chaque date de mesure, on dispose d'autant de couples (m_T , p_{80} cumulé) que de parcelles exposées au sein d'un site.

Dans les cas où, compte tenu de la règle d'exclusion sus-indiquée, au moins 6 résultats étaient utilisables avec entre eux une gamme de variation de p_{80} cumulé d'au moins 1 T/Ha, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre m_T et p_{80} cumulé et ceux-ci figurent dans le Tableau 27. On note des coefficients de corrélation positifs assez élevés, notamment pour le site de Palaiseau où la gamme de variation des masses de terre projetée est, en valeur relative, particulièrement élevée. On peut donc considérer comme vérifiée la dépendance des masses de terre transférée vis-à-vis des masses de terre projetée. Pour établir de manière indiscutable le fait que les projections sont la seule origine des transferts dans les conditions où nous avons opéré, il aurait fallu obtenir des coefficients de corrélation très élevés, ce qui n'est pas toujours le cas. Cependant, les variations liées à l'échantillonnage et le fait que les valeurs $\frac{SD}{ST}$ sont plus ou moins différentes d'une parcelle à l'autre, peuvent aisément expliquer que les relations entre m_T et p_{80} ne soient pas aussi étroites que prévu

[1] Pour la même raison les relevés réalisés le 13.01.1983 à Montluel sont inutilisables, les derniers ayant été effectués le 30.11.1982.

TABLEAU 27.- CORRELATIONS ENTRE MASSES DE TERRE TRANSFEREE (m_T) ET PROJETEE (p_{80}) :
VARIATIONS SYNCHRONIQUES ENTRE PARCELLES.

<u>S I T E</u>	<u>DATE DE PLACEMENT DES JALONS</u>	<u>DATE DE RELEVÉ DES JALONS</u>	<u>COEFFICIENT DE CORRELATION</u> <i>entre m_T et p_{80} cumulé</i>	<u>NOMBRE DE RESULTATS</u>
PALaiseau (1)	22.12 et 19.01	5.01 et 20.02	0,89	23
MONTLUEL	10.05	25.05	0,79	12
	id.	7.06	0,66	6
	id.	23.06	0,68	7
	id.	30.06	0,54	6
	28.09	23.10	0,58	6

(1) Dans ce cas, les jalons ont été à plusieurs reprises déchaussés par le gel. On a regroupé 2 séries de mesures (l'une du 22.12 au 5.01 sur 4 parcelles ; l'autre du 19.01 au 20.02 après remise à 0 générale des jalons).

TABLEAU 28.- RELATIONS ENTRE MASSES DE TERRE TRANSFEREE ($m_T, T/ha$) ET PROJETEE ($p_{80}, T/ha$) ; AJUSTEMENT HYPERBOLIQUE $m_T = a + b/p_{80}$ cumulé
DONNEES PROVENANT DU SITE DE MONTLUEL.

<u>GROUPE de PARCELLES</u>	<u>COEFFICIENTS</u>			<u>NOMBRE DE RESULTATS</u>
	<u>a</u>	<u>b</u>	<u>r^2</u>	
Colza a, b1, b2 ; Maïs	0,032	0,296	0,78	30
Colza a, b1, b2, Maïs	0,036	0,267	0,91	61
Colza a, b1, b2 ; Maïs ; Blé	0,034	0,277	0,84	65

d'après cette hypothèse. Celle-ci reste donc plausible et peut être conservée, compte tenu de la répétabilité de la liaison observée.

C/ - Relations diachroniques entre m_T et p_{80}

Elles ne peuvent être étudiées que pour le site de Montluel, du fait des perturbations causées par le gel à Palaiseau.

En agrégeant l'ensemble des groupes de parcelles suivis sur le site de Montluel - qui se distinguent principalement selon la date d'exposition - on obtient une large gamme de variation de m_T . Au sein de cette gamme, le facteur de discrimination principal des situations est la durée de phase 2 prise en compte entre la date de placement des jalons et chaque date de relevé.

Les variations ainsi étudiées sont donc bien principalement diachroniques.

Dans un premier temps, à titre d'approche rapide, pour vérifier l'allure curvilinéaire des variations de m_T et la pertinence de l'indice p_{80} cumulé comme variable explicative, on a testé divers ajustements de type $m_T = ax^b$ (1) ou x représente selon les cas la hauteur de pluie, l'énergie cinétique, les indices KE_5 , KE_{10} ou p_{80} , toujours cumulés depuis la date d'installation des jalons. Par ailleurs, on a introduit de manière successive et distincte les groupes de données correspondant à différentes dates d'exposition afin de contrôler la stabilité des ajustements obtenus. Les résultats détaillés figurent en Annexe 18. On peut retenir que :

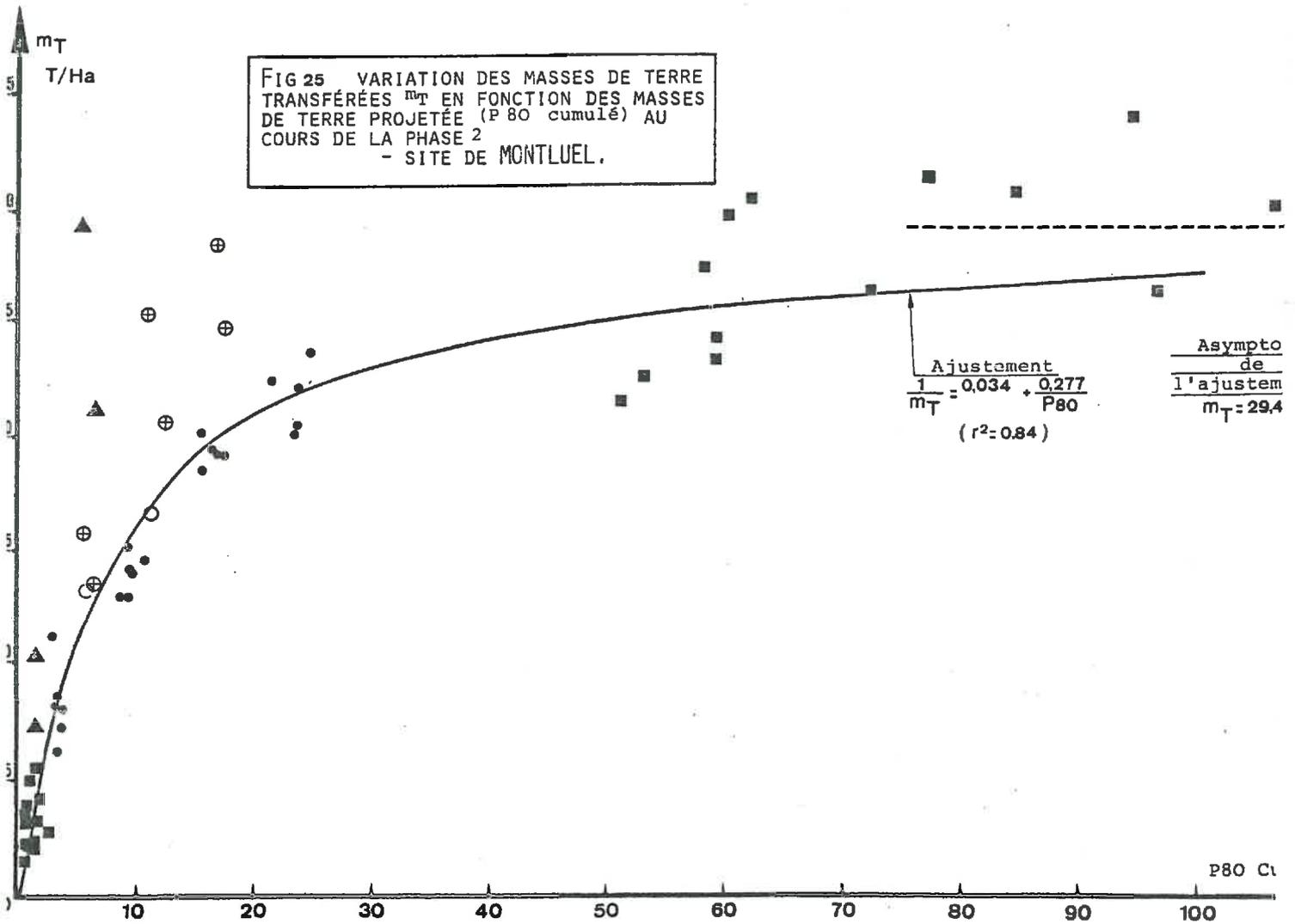
- c'est lorsque x correspond à l'indice p_{80} qu'on obtient les ajustements à la fois les plus étroits et les plus stables,
- les exposants sont de l'ordre de 0,5, donc la relation entre m_T et p_{80} a bien une allure curvilinéaire à pente décroissante.

Dans un deuxième temps, on a cherché à tester un modèle correspondant de manière plus précise aux considérations développées précédemment, c'est-à-dire astreignant m_T à tendre vers une asymptote lorsque p_{80} tend vers l'infini. La forme

$$\frac{1}{m_T} = a + \frac{b}{p_{80}}$$
 répond à cette exigence.

Les résultats des calculs des paramètres sont présentés dans le Tableau 28, la Fig 25 montre la répartition des couples (m_T, p_{80}) autour de l'ajustement correspondant à l'ensemble des points (ligne inférieure du Tableau 28). On voit que ce dernier décrit de manière satisfaisante les variations de m_T

(1) Forme essentiellement retenue dans ce cas, par commodité compte tenu de l'existence de programmes de calcul direct des ajustements de ce type.



PARCELLES PRÉPARÉES POUR :	VARIANTE DE DATE D'EXPOSITION AUX PLUIES	
MAÏS	a	■
	b	□
COLZA	a	●
	b ₁	⊕
BLÉ	après Maïs	▲
	après Colza	△

et notamment rend assez bien compte des variations entre groupes de données correspondant à des dates d'exposition différentes. Cependant les points correspondant aux parcelles de type Blé (avec précédent maïs) ou Colza b₁ sont placés nettement au-dessus du tracé moyen.

Ces écarts pourraient être en partie attribués à une évolution systématiquement différente du rapport SD/ST pour ces parcelles.

Ceci est plausible pour les parcelles de type Blé plus motteuses, mais même dans ce cas les écarts semblent trop importants pour pouvoir être uniquement imputés à cette seule origine, qui ne saurait expliquer que des variations de l'ordre du simple au double tout au plus. C'est donc plutôt en relation avec une sous-estimation de la masse de terre mobilisée qu'on doit chercher à expliquer la position particulière de ces points. On peut supposer, compte tenu des restrictions déjà indiquées à propos de l'indice p₈₀ :

- qu'une certaine quantité de terre, additionnelle par rapport à celle dont p₈₀ reflète les variations, a été disponible pour le transfert par ruissellement,
- que ce supplément a pour origine des pluies de relativement faible intensité peu efficaces vis-à-vis des projections, en effet relativement importantes pour les parcelles de type Blé.

En effet, si on teste un ajustement à deux variables de type $m_T = a (KE < 5)^b (p_{80} \text{ cumulé})^c$, on améliore la description des résultats par rapports aux ajustements de même forme à une seule variable (Annexe 18), les points correspondant aux parcelles de Blé et Colza b₁, étant alors mieux intégrés à l'ensemble des résultats.

1.3.3. - Conclusion

Les données expérimentales sont en accord, dans leurs grandes lignes, avec les hypothèses émises au sujet des processus de transfert en cours de phase 2. En effet, les variations des masses de terre transférée sont corrélées avec celles des masses de terre projetée et présentent dans le temps, une allure curvilinéaire conforme aux prévisions.

Au cours de la deuxième phase de dégradation structurale, le transfert décimétrique répond aux lois d'une érosion sans rigoles (ou inter-rigoles) dont les sources de terre s'épuiseraient progressivement, la surface devenant lisse comme l'attestent les évolutions des indices de rugosité et des surfaces de départ, présentées dans la première partie (Fig. 3) :

Au début de la phase 2 ce sont principalement les masses de terre mobilisées (par rejaillissement) qui contrôlent la variabilité des transferts. Par la suite, le rapport entre surfaces de départ et surfaces réceptrices décroît et devient de plus en plus limitant donc déterminant.

Au terme de cette évolution la surface atteint un état d'équilibre. Ce dernier n'est stable qu'en terrain plat et clôturé : si le périmètre est ouvert et si le terrain présente une légère pente, les transferts peuvent s'opérer sur des distances sans cesse plus importantes, il n'y a alors plus d'équilibre à proprement parler.

2 - RELATIONS ENTRE L'EVOLUTION MORPHOLOGIQUE DE LA SURFACE DU SOL ET LA REDISTRIBUTION SPATIALE DU MATERIAU

Dans la première partie, nous avons mis en évidence la succession de trois types de faciès Fo, F1 et F2, à partir de l'étude de quelques parcelles.

La prise en considération de toutes les parcelles expérimentales des dispositifs étudiés revient à amplifier considérablement la gamme de variation des facteurs et conditions de la dégradation. Dans tous les cas, à partir du faciès fragmentaire initial on observe que les premiers dépôts stratifiés n'apparaissent qu'au bout d'un délai plus ou moins long au cours duquel la surface présente les caractères de définition du faciès F1. L'interprétation selon laquelle la phase 1 est une étape préliminaire obligatoire de la dégradation n'est donc jamais infirmée et on est en droit d'appliquer à l'ensemble des résultats le schéma d'analyse consistant à distinguer ces deux phases.

2.1. - LA PHASE 1, PHASE DE FERMETURE DE LA SURFACE

2.1.1. - Caractères généraux de l'évolution morphologique pendant la phase 1

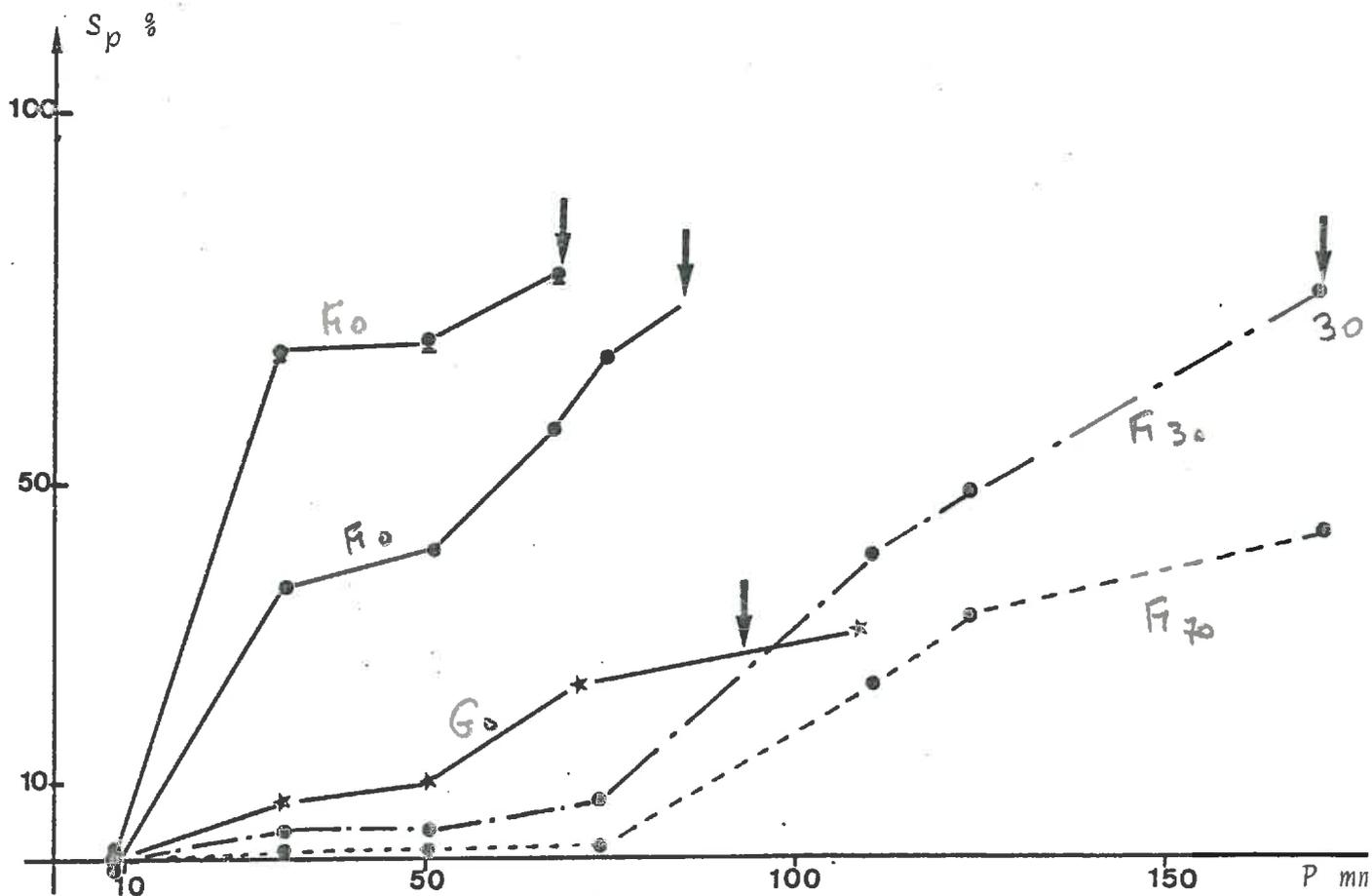
Comme on l'a vu précédemment⁽¹⁾, les critères permettant spécifiquement de décrire le déroulement de la phase 1 sont ceux qui traduisent l'altération du caractère fragmentaire initial à savoir : notes visuelles d'état de désagrégation de la terre fine (Ntf), ou de raccords de mottes (Nrm), taux de recouvrement de la surface par les plaques continues (Sp) calibre du plus petit fragment distinct (D_{min})

Pour chacun d'entre eux, la structure des données est un tableau à double entrée avec en lignes, la localisation des observations (site, parcelle, plaque) ; en colonnes la date de relevé. Un exemple de ces tableaux est donné en Annexe 12, concernant le paramètre D_{min} .

Lorsque le temps s'écoule à partir de la date d'exposition d'une parcelle aux pluies, ces critères évoluent de manière concomitante et il est donc évident qu'ils sont corrélés dans le temps. Mais cette évolution est plus ou moins rapide selon les traitements expérimentaux : par exemple,

(1) Cf. § 1.1.2. A, Tableau 2, Annexes 2.1 et 2.2.

FIG. 26.- EVOLUTION DU TAUX DE RECOUVREMENT DES PLAQUES CONTINUES (S_p) EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE PLUIES CUMULEE DEPUIS L'EXPOSITION DU SOL AUX PLUIES (P). ÉTAT STRUCTURAL : FIN (●) OU GROSSIER (★) ; TAUX D'INTERCEPTION DE L'ENERGIE DES GOUTTES : 0 (—) ; 30% (-.-) ; 70% (----) ; PERTURBATION DU DRAINAGE INTERNE : OUI, SIGNES SOULIGNES NON, SIGNES NON SOULIGNES ; LES FLECHES INDIQUENT LE DEBUT DE LA PHASE 2.



d'après l'Annexe 12 on voit que sur le site de Palaiseau les parcelles protégées par des grillages se dégradent beaucoup plus lentement que les parcelles non protégées. Or, on constate que, indépendamment de ces variations de vitesse, la disparition du caractère fragmentaire présente, dans ses grandes lignes, une certaine uniformité de déroulement, se traduisant par une corrélation globale assez étroite entre certains critères d'évolution morphologique. Ainsi on obtient, toutes parcelles et dates de relevés confondus la relation suivante (1) :

$$N_{rm} = 0,54 N_{tf} - 0,19 \quad (r^2 = 0,81 \text{ pour } 615 \text{ résultats})$$

Celle-ci suggère que, quelles que soient les modalités de la dégradation, la progression des symptômes perçus au niveau de la terre fine et au niveau des mottes est régie par les mêmes facteurs. D'autres exemples de ce type de relation entre critères sont fournis en Annexe 13.

Notre problème est de sélectionner, parmi de tels critères, ceux qui présentent une signification morphologique suffisamment précise pour pouvoir être mise en relation avec la redistribution spatiale. Ceci nous conduit à privilégier le taux de recouvrement par les plaques continues S_p qui est le mieux défini géométriquement et dont par ailleurs on pressent l'intérêt vis-à-vis des répercussions physiques et agronomiques de la dégradation structurale.

2.1.2. - ANALYSE DE L'EXTENSION DES PLAQUES CONTINUES : SCHEMA D'INCORPORATION PROGRESSIVE DES FRAGMENTS

A/ - Origine et présentation du modèle

Comme pour les autres critères, le rythme d'extension des plaques continues est très variable. La Fig. 26 montre 5 cas contrastés observés sur le bloc I à Palaiseau et suggère que chacun des principaux traitements expérimentaux mis en oeuvre sur ce site (interception des gouttes, degré d'affinement des fragments en surface, interruption du drainage interne) influe sur ce rythme.

Dans la première partie (Cf. § 1.1.2.) nous avons mis en évidence le fait que les plaques prennent naissance dans les micro-zones initialement couvertes par les fragments les plus fins et s'étendent en incorporant progressivement des fragments de plus en plus gros. C'est ce que traduit également l'augmentation progressive du critère D_{min} , que l'on peut assimiler au plus petit fragment non encore incorporé dans les plaques continues.

(1) nous sommes autorisé à calculer une régression linéaire en raison du nombre assez grand de modalités de chacune de ces notes (si on tient compte des nuances intermédiaires) et de l'allure sensiblement linéaire que présentent leurs variations en fonction des pluies cumulées au cours de la phase 1.

Sp%

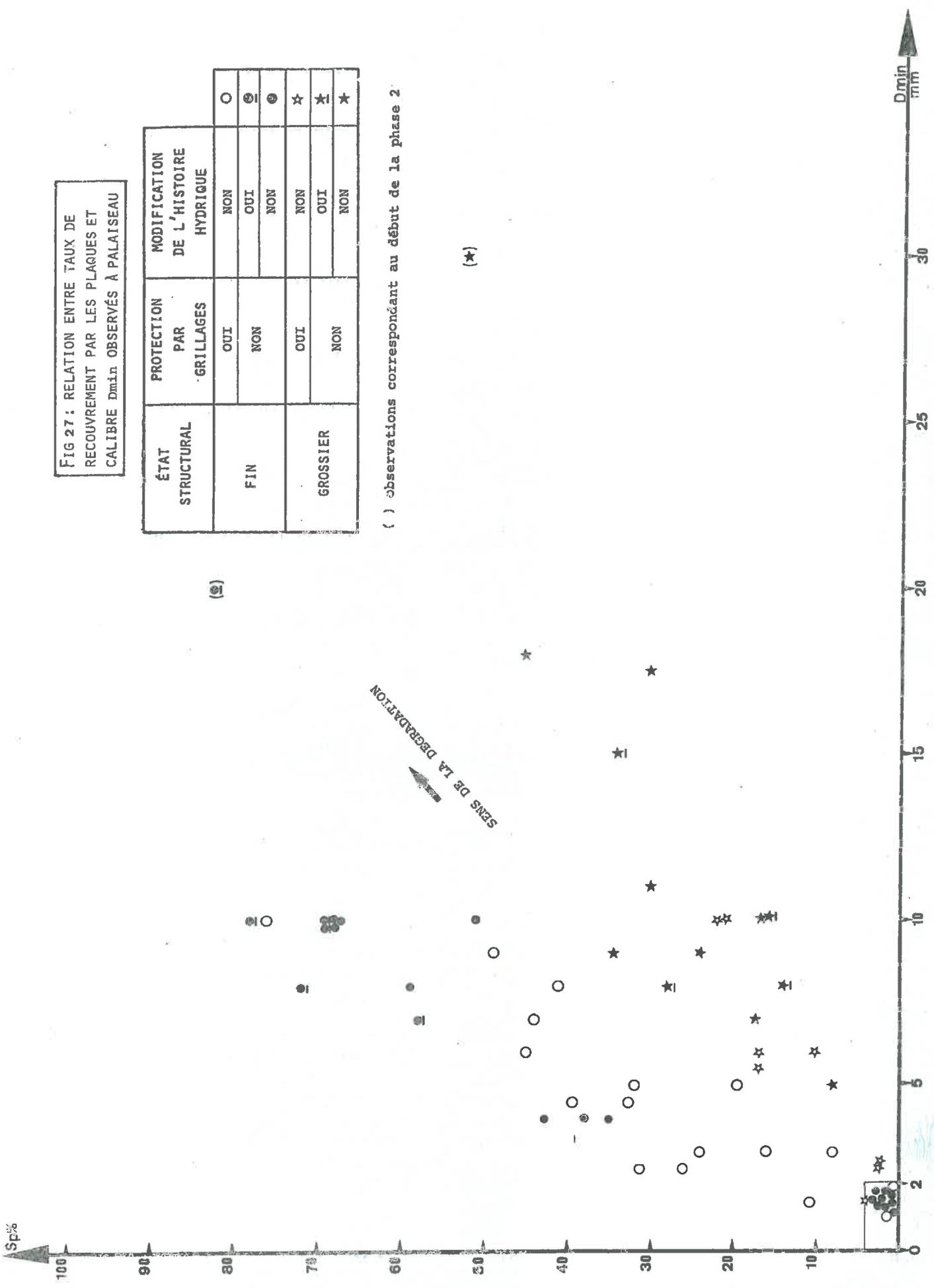


FIG 27: RELATION ENTRE TAUX DE RECOURVEMENT PAR LES PLAQUES ET CALIBRE Dmin OBSERVÉS À PALAISEAU

ÉTAT STRUCTURAL	PROTECTION PAR GRILLAGES	MODIFICATION DE L'HISTOIRE HYDRIQUE	
FIN	OUI	NON	○
	NON	OUI	⊙
		NON	⊖
GROSSIER	OUI	NON	★
		OUI	⊕
	NON	NON	★

() observations correspondant au début de la phase 2

(★)

Si l'on met directement en relation ces deux critères (Fig. 27 pour le site de Palaiseau, Annexe 14 pour le site de Montluel) on obtient globalement des liaisons assez lâches qui résultent de cette augmentation concomitante dans le temps. Il est manifeste d'après le Fig. 27 que cette relation n'est pas la même selon que l'état structural est plus ou moins grossier.

Or, précisément, le caractère plus ou moins grossier de l'état structural se traduit, avant exposition du sol aux pluies, par une variation des courbes de recouvrement cumulé en fonction du calibre des fragments (soit $S = f(D)$), courbes que nous avons établies à partir de valeurs moyennes sur les Fig. 10 et 11 mais qui ont aussi été établies pour chaque placette d'observation morphologique. Rappelons que la valeur S correspond à l'ensemble "solide + vides" et par conséquent inclut les interstices initialement compris entre les fragments de calibre inférieur ou égal à D ; et que par ailleurs son évaluation se fait en prenant en considération des classes de calibre : ceci revient à assimiler la surface initiale à une juxtaposition de zones constituées de fragments de taille relativement homogène⁽¹⁾.

Envisageons à partir de l'état initial ainsi caractérisé, comment peut se manifester la dégradation structurale. Supposons que des interstices de taille croissante disparaissent : des fragments de taille croissante seront alors perçus comme agglomérés les uns aux autres, formant des ensembles continus, dont la surface sera au plus égale à celle qu'ils occupaient au stade initial. Ceci correspond au schéma de la Fig. 28 a, où on suppose que la dégradation correspond à un déplacement progressif sur l'abscisse, à laquelle correspondrait un déplacement consécutif sur l'ordonnée.

Selon ce schéma, le taux de recouvrement S_p par les plaques continues ne serait autre que la valeur S correspondant aux taux de recouvrement initial par les fragments de calibre inférieur ou égal à D_{min} , soit $S(D_{min})$. A une même valeur de D_{min} peuvent correspondre deux valeurs $S(D_{min})$ différentes si les courbes initiales $S(D)$ sont différentes : plus l'état initial est grossier, moins les valeurs S pour D_{min} donné sont élevées.

(1) L'expérience montre que cette approximation correspond de manière acceptable à l'aspect de la surface du sol après passage d'instruments de façons superficielles : la disposition des calibres de fragments est de type groupé plutôt qu'aléatoire.

FIG. 28.- SCHEMA D'INCORPORATION PROGRESSIVE DES FRAGMENTS.

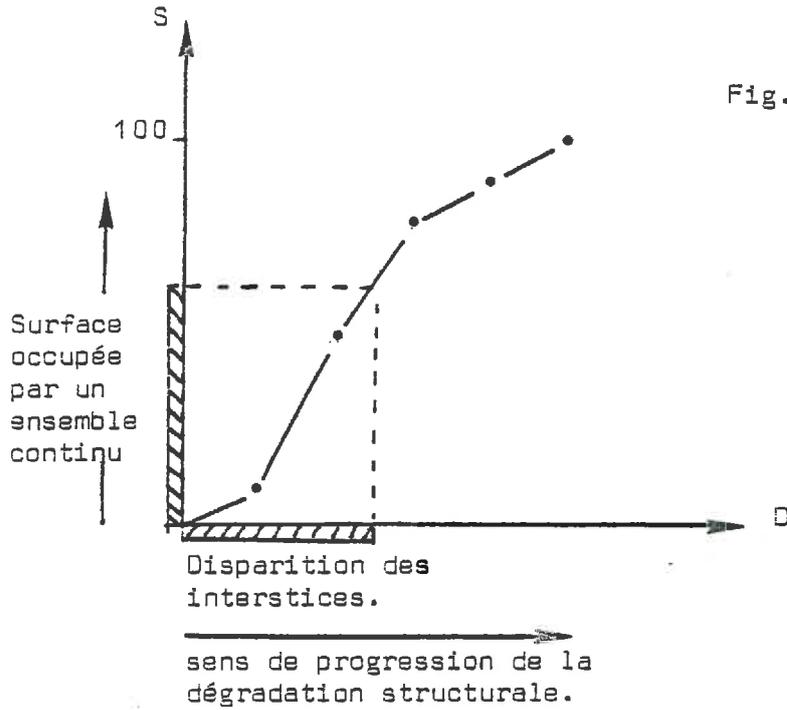


Fig.28a.- Interprétation de la progression des plaques à partir de la caractérisation de l'état init

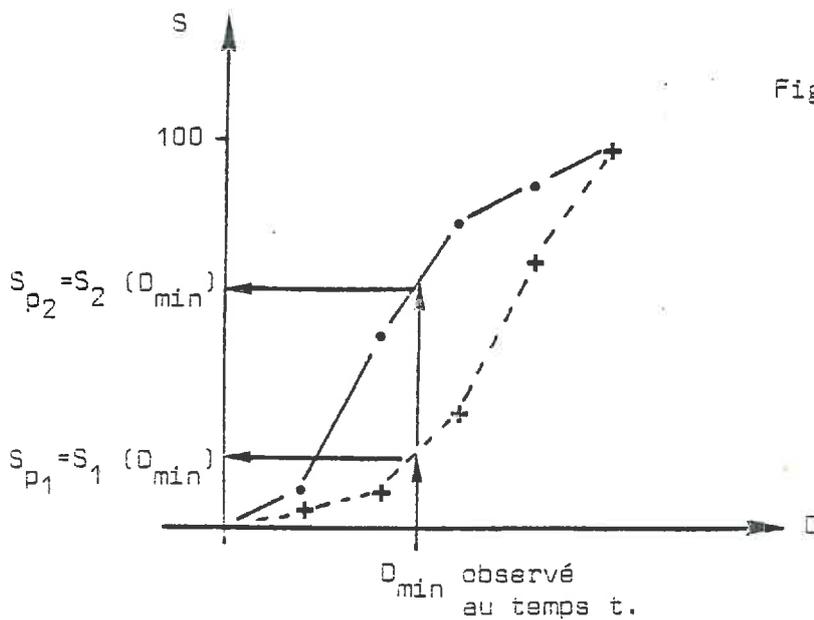


Fig. 28b.- Prédiction de la surfac des plaques continues partir de D_{min} pour 2 placettes, min à état initial fin (-.-) ou grossier (---+---)

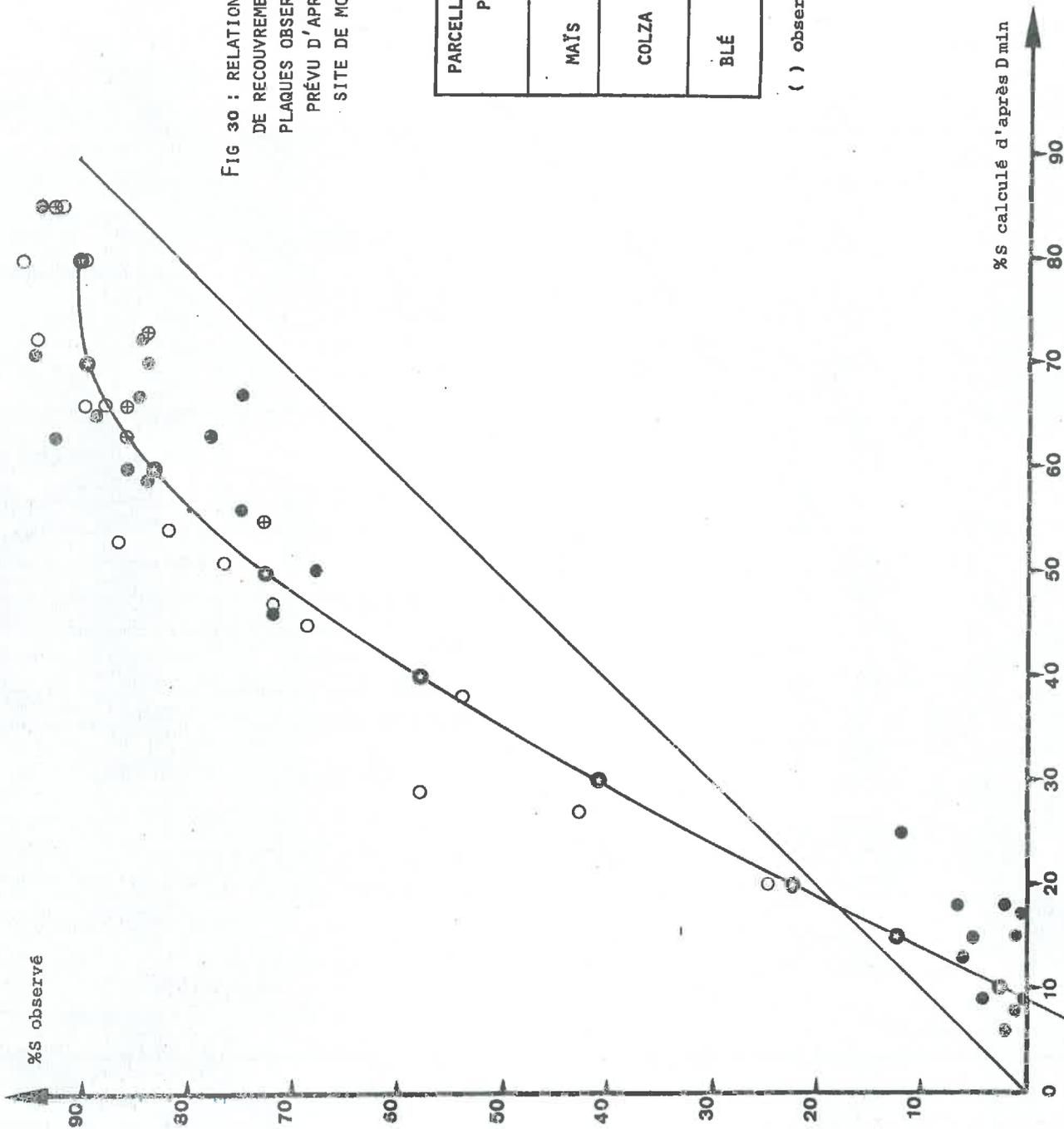


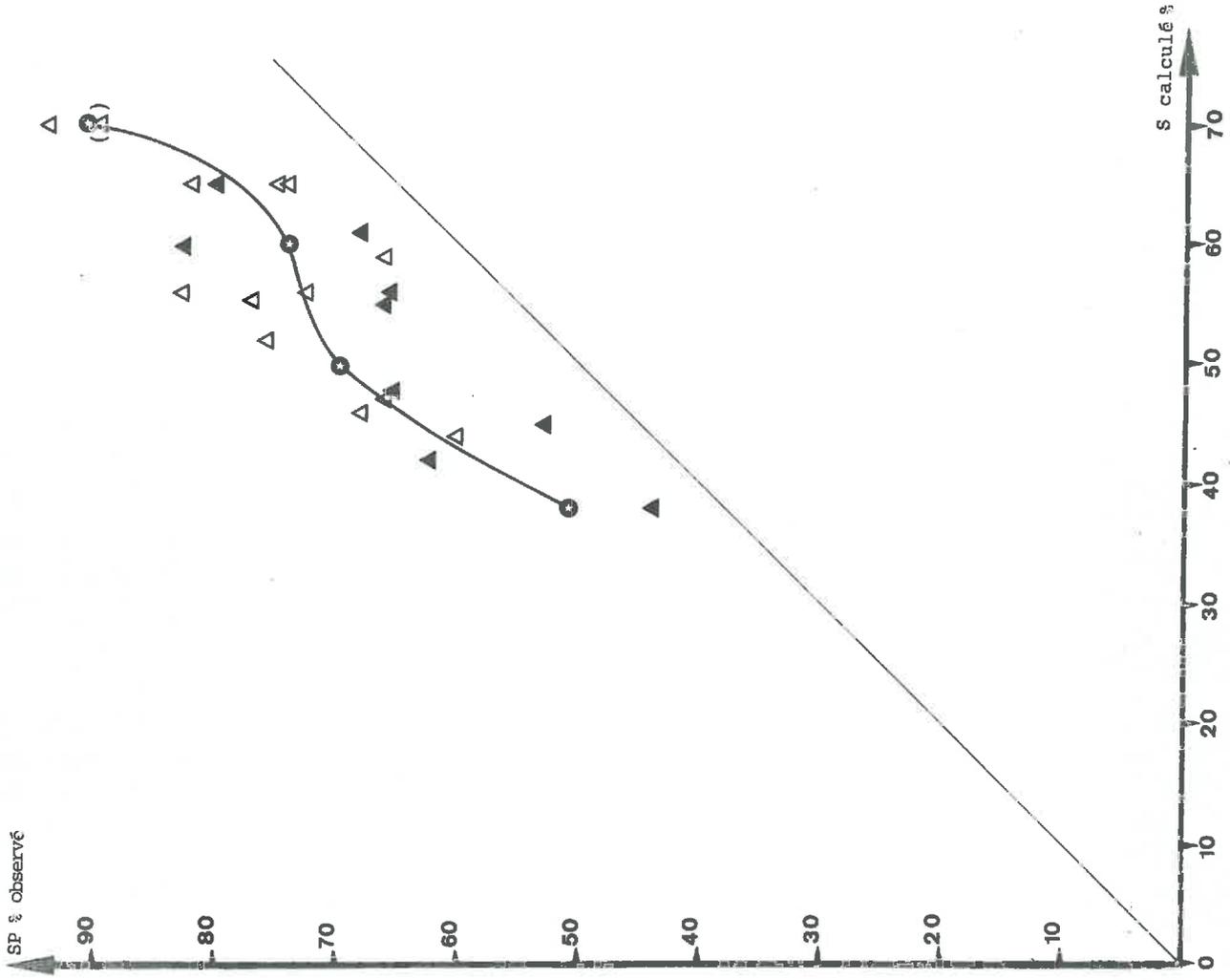
FIG 30 : RELATION ENTRE TAUX DE RECOURVREMENT PAR LES PLAQUES OBSERVÉ ET TAUX PRÉVU D'APRÈS Dmin. SITE DE MONTLUEL

PARCELLES PRÉPARÉES POUR :	VARIANTE DE DATE D'EXPOSITION AUX PLUIES	
MAYS	a	■
	b	□
COLZA	a	●
	b ₁	⊕
BLÉ	b ₂	○
		▲
		△

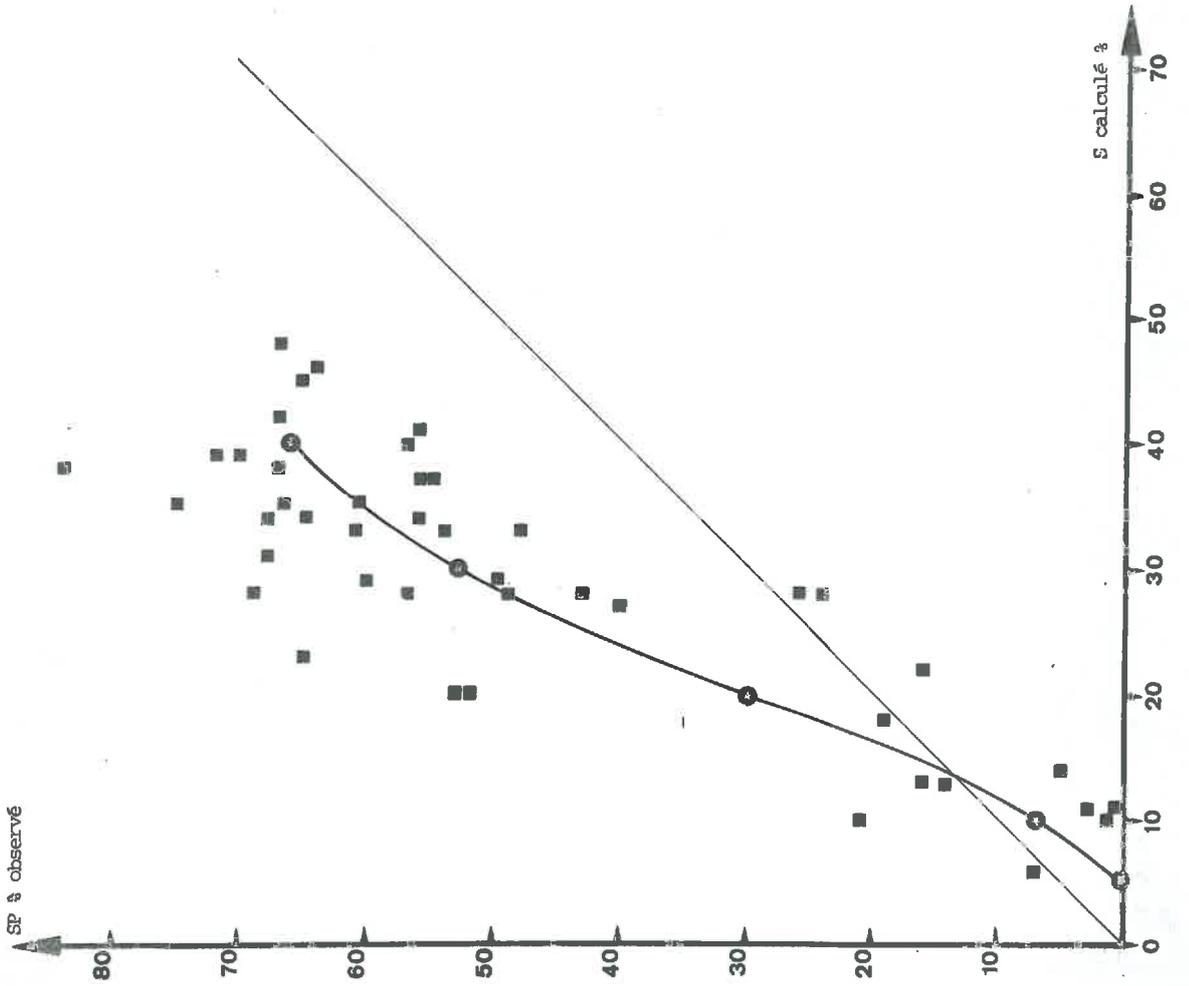
() observations correspondant au début de la phase 2

● Valeurs ajustées

SP % observé



SP % observé



B/ - Confrontation avec les données expérimentales

Pour tester ce modèle, nous avons :

- déterminé à partir des valeurs D_{min} observées sur chaque placette et à chaque date d'observation, une valeur S_p prévue graphiquement à partir de la courbe $S(D)$ propre à chaque placette (Cf. Fig. 28 b) ;
- confronté ces valeurs S_p prévues aux valeurs S_p observées (bien entendu aux mêmes emplacements et dates la valeur D_{min} correspondante).

Sur les graphiques ainsi obtenus (Fig. 29 et 30 a, b, c) l'origine des axes correspond à l'état initial, la dégradation s'achevant en principe au point de coordonnées (1 100) : on constate alors que :

- a) - pour chaque groupe de parcelles il y a entre S_p observé et S_p prévu, des relations assez étroites où disparaissent, comme le montrent clairement les résultats observés à Palaiseau (Fig. 29) :
 - . la distinction entre les états structuraux initiaux,
 - . les différences de vitesse d'extension des plaques.
- b) - Cependant, ces relations ne se confondent pas avec la première bissectrice : elles présentent une allure curvilinéaire avec une ordonnée à l'origine négative. Ceci correspond au fait que pour les faibles valeurs de D_{min} , S_p est nul ou très faible simplement parce qu'il est alors impossible de percevoir et délimiter des plaques continues, à l'échelle d'observation utilisée et compte tenu de la répartition spatiale extrêmement diffuse des fragments les plus fins. Après un point d'inflexion les valeurs observées de S_p se situent au-dessus de la première bissectrice ce qui peut signifier, entre autres hypothèses, que l'incorporation des fragments n'est pas strictement progressive, une certaine proportion de fragments de taille supérieure à D_{min} étant déjà intégrés aux plaques au moment où on observe encore quelques fragments de calibre D_{min} .
- c) - Les tracés des ajustements polynomiaux déterminés dans chaque cas sont assez voisins d'un groupe de parcelles à l'autre, de sorte qu'on peut envisager un regroupement. Tous sites, placettes et dates d'observation confondus, on obtient l'ajustement suivant :

$$S_p = -4,78 + 1,74 S(D_{min}) + 0,00232 S^2(D_{min}) - 0,000121 S^3(D_{min})$$

($r^2 = 0,93$ pour 210 résultats)

La variance résiduelle est de l'ordre de grandeur des incertitudes de détermination de S_p , D_{min} et S (D_{min}).

Cette dernière relation apparaît suffisamment étroite, et les conditions de son établissement suffisamment variables, pour que nous puissions considérer qu'elle exprime une loi morphologique générale pratiquement indépendante des caractéristiques du matériau et des agents de la dégradation. Même en tenant compte des nuances exprimées dans le paragraphe précédent, elle confirme le schéma d'incorporation progressive des fragments. Il convient, à présent, de préciser la signification de ce schéma en examinant ses relations avec les déplacements de terre.

2.1.3. - Evolution morphologique et déplacement de terre : modèle de colmatage interstitiel

A/ - Modèle géométrique de base, définition géométrique du paramètre D_{lim}

Considérons un massif constitué par la juxtaposition de motifs solides jointifs, reposant sur une surface plane horizontale, et regroupés par classes de taille. Dans une disposition de ce type (illustrée par la Fig. 31 dans le cas particulier de motifs hémisphériques), les interstices compris entre les motifs d'un calibre donné D sont vides ; leur dimension dépend de D et des règles de juxtaposition des motifs élémentaires.

Projetons de manière homogène sur ce massif un matériau finement divisé que nous supposons se localiser de manière exclusive et irréversible dans les interstices. Ceux-ci se colmatant progressivement, chaque motif est progressivement recouvert. En projection horizontale on observe pour chaque groupe de motifs (c'est-à-dire pour chaque valeur de D) une certaine proportion p_v de recouvrement par le matériau interstitiel qui dépend de D et du volume de matériau interstitiel projeté (soit v_i par unité de surface). Au-delà d'un certain seuil ($p_v \geq p_0$), les motifs ne sont plus distinguables de leurs voisins et sont alors perçus comme faisant partie d'ensembles continus ; nous supposons que ce seuil p_0 est constant et indépendant de D . Puisque p_v est fonction de v_i et D , réciproquement $p_v = p_0$ définit une valeur $D(p_0, v_i)$ que nous appellerons D_{lim} . En effet, cette valeur particulière représente la limite de calibre entre les fragments qui sont déjà ($D \leq D_{lim}$) ou ne sont pas encore ($D > D_{lim}$) incorporés dans des ensembles continus lorsqu'on a projeté un volume cumulé v_i sur le massif.

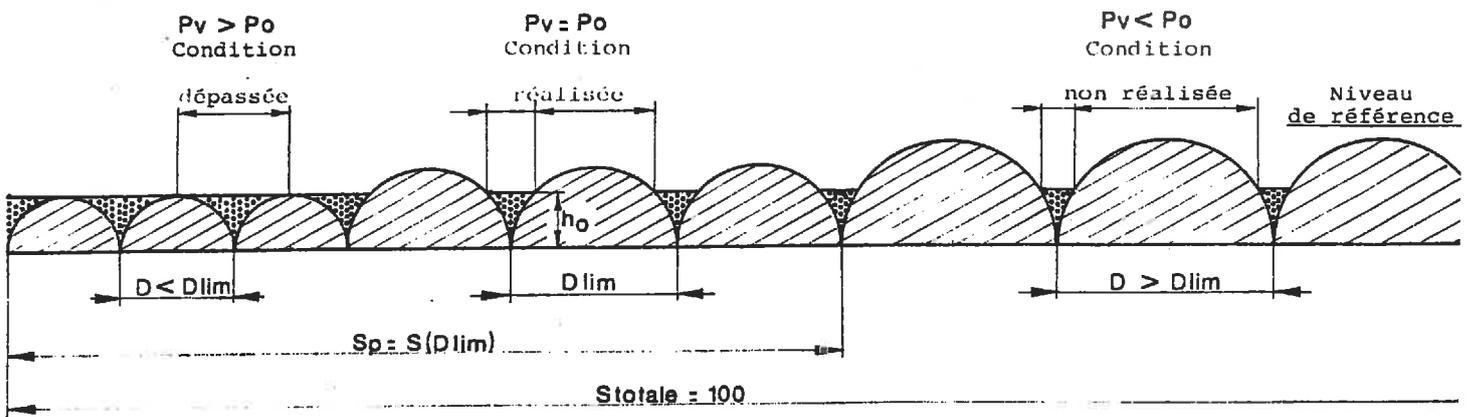


FIG31: RELATIONS HYPOTHÉTIQUES ENTRE LE REMPLISSAGE INTERSTITIEL ET LA SURFACE DES PLAQUES.

Matériau interstitiel
Motif solide

B/ - Signification du paramètre D_{lim} par rapport à l'encombrement des interstices

Tentons à présent d'expliciter la relation entre D_{lim} , p_0 et v_i en supposant pour simplifier que les motifs sont de forme régulière (par exemple hémisphérique, tronconique ou pyramidale à base carrée).

- a) - Chaque motif, avec les interstices qui peuvent lui être affectés en propre, occupe dans le plan de base une surface élémentaire de répétition S_r telle que⁽¹⁾ :

$$S_r = \alpha D^2$$

- b) - Si on coupe (Fig. 31) ce motif par un plan horizontal de cote h par rapport au niveau de référence, l'aire S_s de la section du volume solide dans ce plan sera donnée par une relation de forme⁽¹⁾ :

$$S_s = \beta D^2 + \gamma Dh + \delta h^2$$

- c) - Supposons que h corresponde à la hauteur de remplissage par du matériau interstitiel. Le taux de recouvrement p_v par ce matériau interstitiel est alors⁽¹⁾ :

$$p_v = \frac{S_r - S_s}{S_r} = a \left(\frac{h}{D}\right)^2 + b \frac{h}{D} + c$$

équation dont en général, une seule racine r a un sens physique.

- d) - Dans le cas où $p_v = p_0$, on a donc :

$$\frac{h_0}{D_{lim}} = r \quad (a, b, c, p_0) \quad \text{soit } h_0 = r_0 \cdot D_{lim}$$

r_0 étant une constante qui dépend non seulement de la forme du solide mais aussi du seuil p_0 supposé indépendant de D .

- e) - Par ailleurs, au niveau de la figure élémentaire de surface S_r , le volume v_i encombré par le matériau interstitiel s'écrira avec des notations analogues :

$$V_i = \alpha' D^3 + \beta' D^2 h + \gamma' Dh^2 + \delta' h^3$$

- f) - Si on exprime le volume ainsi encombré par unité de surface, on aura :

$$v_i = \frac{V_i}{S_r} = a' D + b' h + c' \frac{h^2}{D} + d' \frac{h^3}{D^2}$$

(1) $\alpha, \beta, \gamma, \delta, a, b, c$ sont des constantes dépendant de la forme du volume solide.

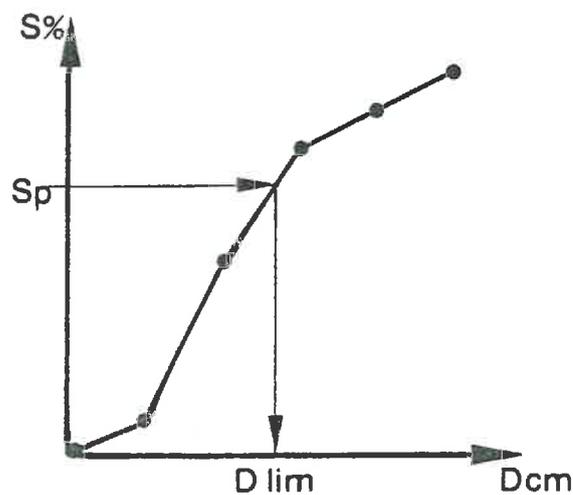
TABLEAU. 29 .- VALEUR DES COEFFICIENTS DU MODELE DE REMPLISSAGE INTERSTITIEL EN FONCTION DES DIFFERENTES HYPOTHESES GEOMETRIQUES.

HYPOTHESE sur P_0 (%)	FORME du MOTIF SOLIDE					
	SPHERIQUE (arrangement rhombique)		PYRAMIDALE (arrangement jointif) Inclinaison des faces latérales			
	h (1/h) (1)	u (1/u) (2)	45° ($\text{tg} \alpha = 1$)		64° ($\text{tg} \alpha = 2$)	
	h (1/h) (1)	u (1/u) (2)	h (1/h) (1)	u (1/u) (2)	h (1/h) (1)	u (1/u) (2)
40	5,68 (0,176)	8,5 (0,117)	2,35 (0,426)	3,5 (0,283)	4,70 (0,213)	7,1 (0,142)
50	7,65 (0,131)	11,5 (0,087)	3,87 (0,258)	5,8 (0,172)	7,74 (0,129)	8,7 (0,115)
60	9,79 (0,102)	14,7 (0,068)	5,93 (0,169)	8,9 (0,112)	11,86 (0,084)	13,4 (0,075)

(1) : En admettant que $\frac{V}{S}$ est donné en m^3/Ha et D_{lim} en cm

(2) : En admettant que mD est donné en T.Ha^{-1} et D_{lim} en cm, et que $\gamma_i \approx 1,5$

FIG32 : DÉTERMINATION DU PARAMÈTRE D_{lim}



- g) - Or, pour p_v donnée on a (Cf. ci-dessus) $h = r_D$ avec $r = r_0$ pour $p_v = p_0$.

d'où :

$$v_i = k D_{lim}$$

Le volume de matériau interstitiel par unité de surface, sous les hypothèses précédentes, est donc proportionnel au paramètre D_{lim} , le coefficient de proportionnalité k dépendant de la forme et de la disposition de motifs solides et du seuil p_0 considéré.

- h) - Supposons enfin que la densité du matériau interstitiel est constante dans le temps et dans l'espace, soit γ_i . Appelons m_i la masse de matériau interstitiel projetée par unité de surface totale du massif, cumulée depuis le début de la projection jusqu'au temps t .

On a alors $m_i = \gamma_i v_i = k \gamma_i D_{lim} = u D_{lim}$; et :

$$D_{lim} = \frac{1}{u} m_i$$

Les valeurs que prennent les coefficients k et u pour différentes hypothèses géométriques sont données dans le Tableau 29, établi à partir de l'Annexe 15.

L'influence des hypothèses sur p_0 et la forme des motifs est importante puisqu'elles entraînent des variations de 1 à 4 sur k et u .

Selon le modèle de remplissage interstitiel, que nous avons développé, le paramètre D_{lim} serait un indicateur de la masse de matériau accumulé dans les interstices. Sous réserve d'être en mesure de l'évaluer, on dispose donc là d'un paramètre très intéressant car il se situe précisément à l'articulation entre l'étude des déplacements de terre et celle de l'évolution morphologique en cours de phase 1.

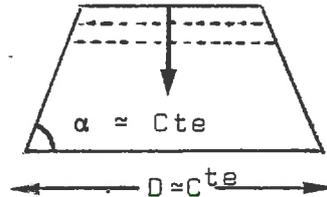
C/ - Transposition du modèle à l'étude de l'évolution de la surface du sol. Détermination d'un calibre D_{lim} équivalent

Pour donner au modèle de colmatage interstitiel une signification strictement déterministe, il faut admettre :

- que la surface initiale du sol, constituée par l'ensemble des fragments terreux vus en plan, peut être assimilée à

l'un des schémas géométriques satisfaisant aux conditions énoncées dans le § A précédent ; et qu'on peut lui appliquer sans distorsions graves les hypothèses simplificatives du § B (notamment régularité des motifs et de leurs modalités de juxtaposition). A cet égard, une des hypothèses les plus fortes est l'absence d'interaction géométrique (isolement) entre les groupes de calibre différent

- qu'au cours de la phase 1, les plaques continues se forment et sont perçues selon le schéma géométrique proposé (schéma d'incorporation progressive des fragments avec p_0 constant et indépendant de D) ;
- que le matériau interstitiel provient du déplacement de particules solides provoqué par les impacts de gouttes de pluie ; en d'autres termes que la surface du sol alimente elle-même et sans limite (contrairement à ce que nous avons supposé précédemment en cours de phase 2) son propre colmatage ;
- que, bien que constituant la source du matériaux déplacé position interstitielle les fragments gardent le même calibre D tant qu'ils ne sont pas perçus comme intégrés à une plaque. Cette hypothèse implique un certain schéma de dégradation des fragments (par tranches subhorizontales successives et sans que les faces latérales soient altérées).



Il est clair que parmi ces hypothèses, certaines, en particulier la première et la dernière, sont peu réalistes ; de plus la complexité de la morphologie réelle de la surface et de son évolution rend extrêmement difficile l'obtention d'indications précises sur la nature et l'ampleur de ces distorsions. En définitive, la valeur D_{lim} n'a pas de traduction concrète bien définie permettant une mesure stricte. Certes, le critère D_{min} (qui est, rappelons-le, obtenu par évaluation directe sur le terrain ou sur photographie du calibre du plus petit fragment distinct), a bien en principe le même sens que D_{lim} , mais sa détermination est malgré tout grossière et empirique. C'est pourquoi, tout en nous appuyant sur le schéma d'incorporation progressive que nous avons validé précédemment (§ 2.1.2.), nous préférons déterminer D_{lim} de manière indirecte par l'intermédiaire des taux de recouvrement par les plaques S_p (valeurs observées), obtenant ainsi un "calibre équivalent".

On peut en effet déterminer, comme l'indique la Fig. 32, une valeur D_{lim} à partir de chaque valeur S_p observée : à partir du graphique de caractérisation initiale $S = f(D)$, on calcule par

interpolation linéaire $D_{lim} = f^{-1}$ (S_p observé). On obtient ainsi, à partir de toutes les mesures de S_p réalisées au cours de la phase 1 sur les différentes placettes suivies, autant de valeurs $D_{lim}^{(1)}$.

Compte-tenu de la procédure utilisée pour déterminer D_{lim} , et des distorsions (qui existent certainement mais dont nous ignorons la variabilité) entre l'évolution morphologique réelle et le schéma géométrique présenté, il nous faut en définitive vérifier expérimentalement que ce "calibre équivalent des déplacements de terre, que lui confère en théorie le modèle de remplissage interstitiel". Le grand intérêt de cet indicateur serait en effet d'être indépendant de l'état structural initial et des modalités du déplacement de terre et de nous fournir ainsi un moyen de comparer l'ensemble des résultats obtenus.

2.1.4. - Etude des variations du calibre équivalent D_{lim}

A/ - Principe de la démarche

Le modèle de remplissage interstitiel ne peut être considéré comme validé que si on peut rendre compte de la variabilité synchronique et diachronique de D_{lim} dans des termes compatibles avec la relation qui est supposée exister entre D_{lim} et m_D , masse (par unité de surface) de matériau déplacé cumulée depuis l'exposition de la surface aux pluies.

Nous ne disposons pas d'un estimateur direct de m_D , mais d'un indicateur partiel (indice p_{80}) relatif à une fraction de la masse de terre projetée. Par ailleurs, nous disposons de différents indices d'action cumulée des pluies : hauteurs de pluies, énergie cinétique, indices KE_5 et KE_{10} , toutes ces variables étant cumulées à partir de l'exposition du sol aux pluies.

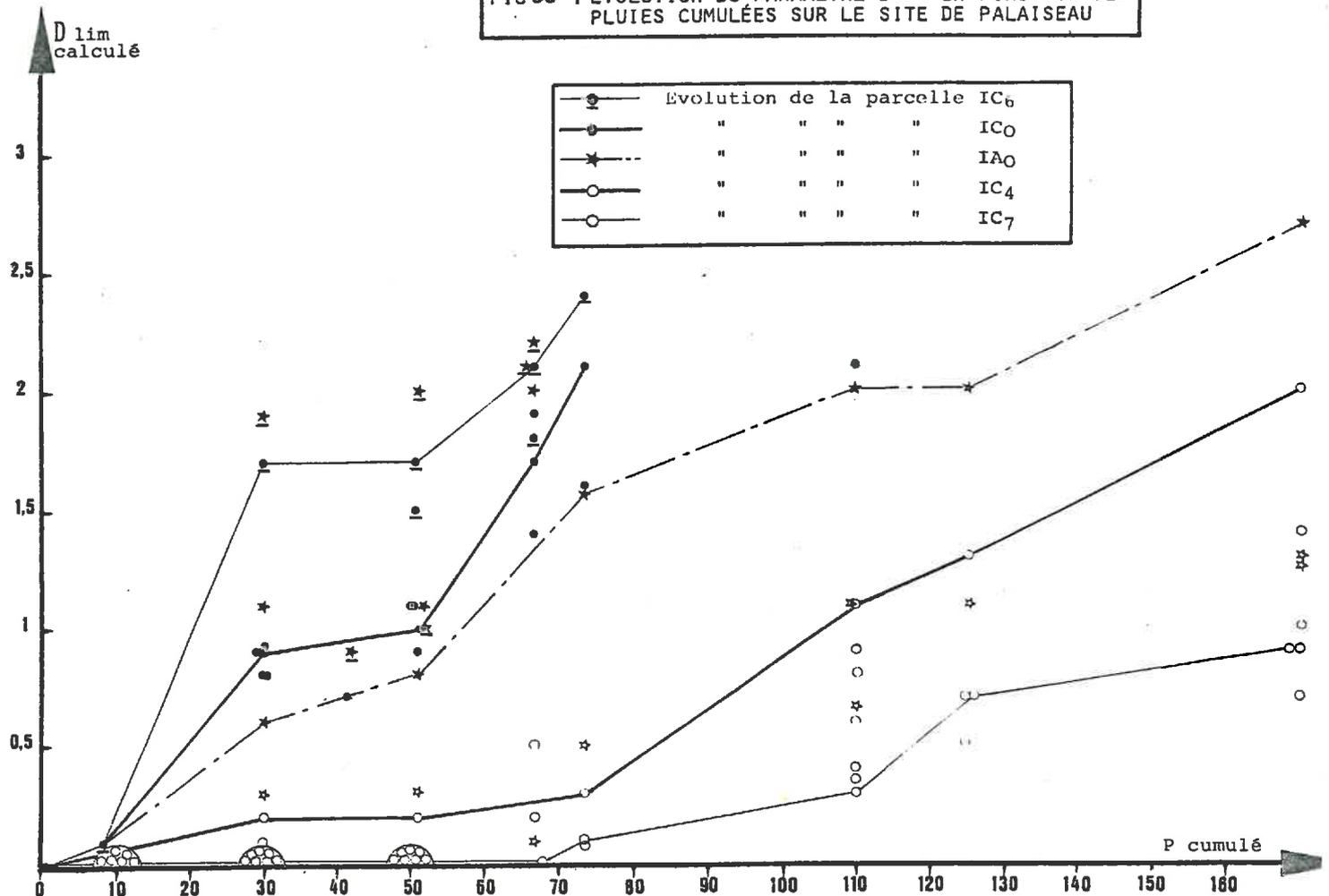
Les résultats des calculs d'ajustements linéaires entre D_{lim} et ces différentes variables explicatives figurent dans les Tableaux 30 et 31, concernant respectivement les sites de Palaiseau et Montluel.

[1] Ces valeurs sont corrélées mais en général supérieures aux valeurs D_{min} correspondantes : ceci traduit d'une autre manière le fait déjà signalé que S_p observé est généralement supérieur à S_p prévu d'après D_{min} .

TABLEAU.30 .- RELATIONS ENTRE LE PARAMETRE D_{lim} (cm) ET DIFFERENTES VARIABLES AU COURS DE LA PHASE 1 (SITE DE PALAISEAU).

NATURE DE LA VARIABLE EXPLICATIVE	REGRESSIONS LINEAIRES			NOMBRE de RESULTATS
	ORDONNEE A L'ORIGINE	PENTE	r^2	
P. CUMULE (mm)	0,76	0,0017	0,038	106
Ec. CUMULE (J/m ²)	- 0,13	0,0017	0,737	106
KE 5 (J/m ²)	- 0,15	0,0028	0,725	106
KE 10 (J/m ²)	- 0,14	0,0110	0,752	104
P80 CUMULE (T/Ha)	0,00	0,313	0,791	106
KE < 5 et KE 5 (J/m ²)	- 0,16	KE < 5 0,0010 KE 5 0,0022	0,745	106

FIG 33 : EVOLUTION DU PARAMETRE D_{lim} EN FONCTION DES PLUIES CUMULEES SUR LE SITE DE PALAISEAU



B/ - Discussion des résultats obtenus sur le site de Palaiseau
(Tableau 30)

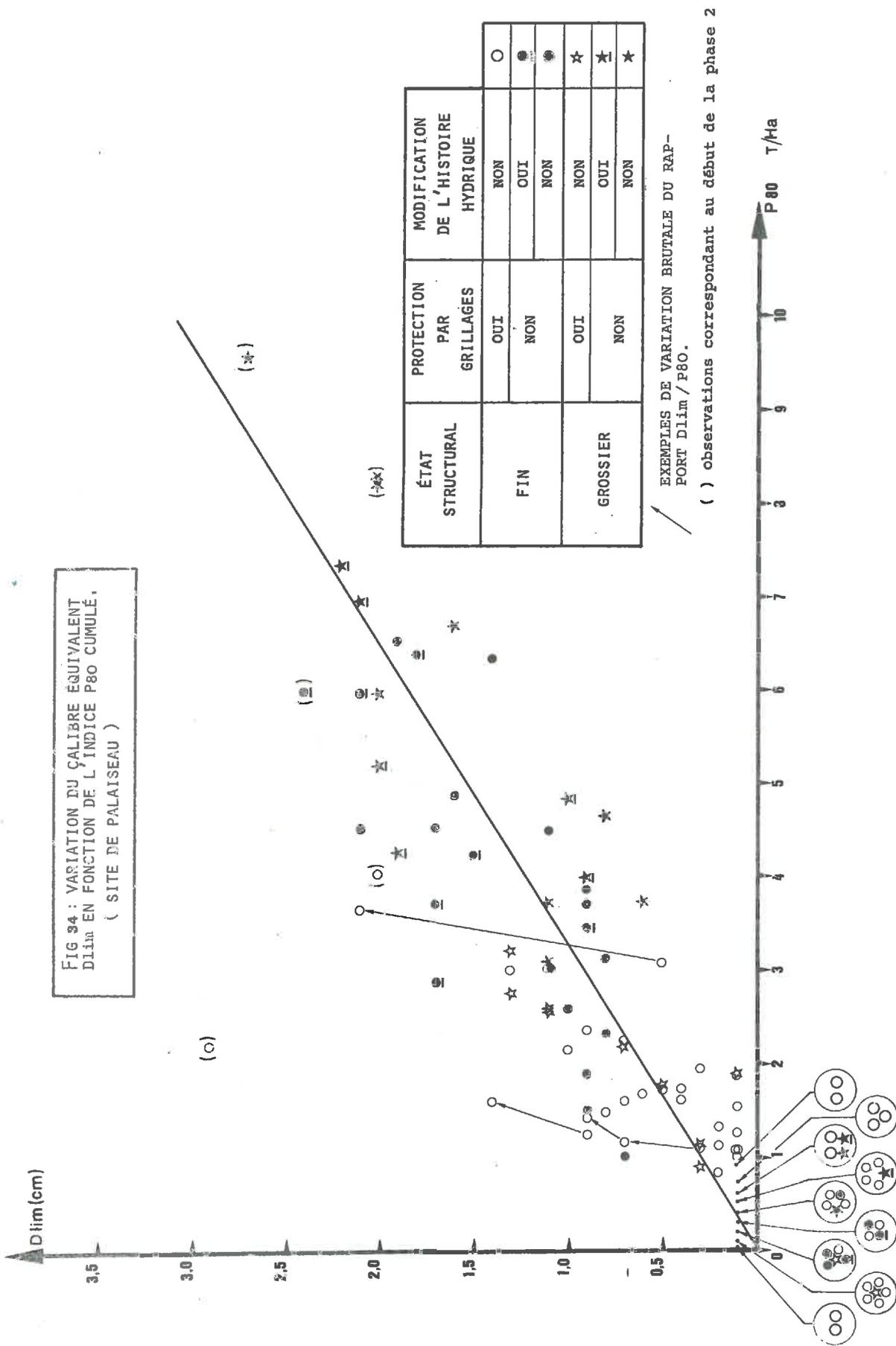
Sur ce site, les observations ont été assez fréquentes. Le critère Pluie cumulée ne rend pas compte des variations de D_{lim} ; ceci tient principalement au fait que l'augmentation de D_{lim} est très ralentie sur les parcelles protégées alors que celles-ci reçoivent les mêmes hauteurs de pluie (Fig. 33 sur laquelle on a individualisé par un tracé les variations diachroniques observées sur quelques parcelles typiques). L'énergie cinétique et les indices KE, pour l'évaluation desquels on a tenu compte de l'effet protecteur des grillages, sont beaucoup mieux corrélés à D_{lim} . Le coefficient de détermination le plus élevé est obtenu avec l'indice p_{80} cumulé. Tous les traitements expérimentaux sont alors sensiblement confondus (Fig. 34) alors que les modalités de variation chronologique des masses de terre projetée sont extrêmement différentes selon ces traitements.

Cette relation, tant par la nature de la variable explicative, que par la forme linéaire et unique obtenue apporte une validation du critère D_{lim} en tant qu'indicateur des déplacements de terre, et du modèle de colmatage interstitiel. Elle suggère fortement que ce colmatage est alimenté par les projections ou au minimum que le déterminisme des deux processus est à peu près identique.

A cet égard on peut noter que l'ordre de grandeur du coefficient de régression 0,31 entre D_{lim} (en cm) et p_{80} (en T/Ha) est compatible avec une relation causale directe. En effet, prenons deux hypothèses de distances de projection, plausibles d'après les résultats présentés dans le § 1.2.1. ; soit 2 et 8 cm. D'après le modèle théorique de réception du splash présenté dans la première partie (§ 2.2.2. B), le rapport de l'indice p_{80} à la masse totale projetée m_p serait alors respectivement de 0,2 et 0,8. Le coefficient de proportionnalité entre D_{lim} (cm) et m_p (T/Ha) serait donc non plus 0,31 mais 0,062 dans le premier cas et 0,24 dans le second. Si l'on se reporte aux valeurs des coefficients de proportionnalité $1/u$ (avec $D_{lim} = (1/u)m_i$) données dans le Tableau 29 pour différentes hypothèses géométriques, on constate que la gamme de ces valeurs (0,068 à 0,283) coïncide avec la fourchette que nous venons d'indiquer. Il est donc géométriquement possible que les quantités de splash obtenues au cours de phase 1 aient assuré un colmatage interstitiel permettant aux plaques continues de s'étendre au rythme effectivement observé à Palaiseau.

Cette conclusion, valable pour la tendance générale, est cependant parfois en défaut si on examine parcelle par parcelle l'évolution de D_{lim} au cours de la dégradation : sur la Fig. 34 on a signalé certaines variations brutales de D_{lim} , (se traduisant par une augmentation du rapport D_{lim}/p_{80}) que ne peuvent expliquer à elles seules les variations concomitantes de p_{80} et survenant spécialement sur des parcelles protégées.

FIG 34 : VARIATION DU ÇALIBRE ÉQUIVALENT D_{lim} EN FONCTION DE L'INDICE P80 CUMULÉ, (SITE DE PALAISEAU)



Cette observation suggère le déplacement à faible ou très faible distance d'une masse de terre mal reflétée par l'indice p_{80} ; une analyse plus détaillée présentée en Annexe 17.4 suggère que ces augmentations brutales de D_{lim} , se concrétisant par une forte extension des plaques, seraient liées à des pluies survenant en conditions de très forte humidité, à la surface du sol, notamment à la suite de phases de gel-dégel.

C/ - Discussion des résultats obtenus sur le site de Montluel
(Tableau 31)

Dans ce cas, la structure des données est différente : les répartitions chronologiques des épisodes pluvieux et des différents relevés, ainsi que la vitesse de dégradation de la surface, sont telles que l'on ne dispose que de 1 à 3 observations par parcelle en cours de phase 1⁽¹⁾. La variabilité des situations étudiées résulte donc principalement de la date d'exposition aux pluies et de différences de stabilité structurale.

a) - Relation entre D_{lim} et p_{80}

A la différence du cas précédent, les variations de D_{lim} sont très mal corrélées à celles de p_{80} . Ceci peut indiquer :

- . soit que le modèle de remplissage interstitiel, tel qu'il a été élaboré, n'est plus applicable ;
- . soit que l'indice p_{80} ne reflète pas correctement, dans ce cas, les masses de terre participant au remplissage interstitiel.

Nous penchons plutôt pour la deuxième hypothèse. En effet, supposons que dans certains cas le modèle de colmatage interstitiel soit faux, par exemple parce que les plaques se forment avant tout par dislocation ou déformation des fragments. On s'attendrait alors à ce que le schéma d'incorporation progressive des fragments soit alors lui aussi perturbé. Or, nous avons vu (§ 2.1.2.) que ce schéma était respecté de manière stricte et uniforme dans toutes les situations étudiées. Il est donc plausible que les mécanismes d'initiation et d'extension des plaques soient identiques aussi bien à Palaiseau que pour toutes les périodes d'observation à Montluel.

(1) Cette structure de données est illustré par l'Annexe 17-5

TABLEAU. 31.- RELATIONS ENTRE LE PARAMETRE D_{lim} (cm) ET DIFFERENTES VARIABLES
AU COURS DE LA PHASE 1 (SITE DE MONTLUEL).

<u>NATURE DE LA VARIABLE EXPLICATIVE</u>	<u>GROUPE DE PARCELLES</u> PRISES en COMPTE	<u>REGRESSIONS LINEAIRES</u>			<u>NOMBRE de RESULTATS</u>	
		<u>ORDONNEE A L'ORIGINE</u>	<u>PENTE</u>	<u>r^2</u>		
P. CUMULE (mm)	1	0,19	0,0589	0,734	60	
	2	0,28	0,0325	0,327	119	
Ec. CUMULE (J/m ²)	1	0,06	0,0036	0,792	60	
	2	0,08	0,0023	0,420	119	
KE 5 (J/m ²)	1	0,44	0,0046	0,625	60	
	2	- 0,17	0,0052	0,647	119	
KE 10 (J/m ²)	1	1,58	0,0031	0,186	60	
	2	0,93	0,0048	0,312	119	
P80 CUMULE (J/m ²)	1	2,26	0,087	0,177	42	
	2	1,56	0,140	0,132	66	
KE < 5 et KE 5 (J/m ²)	1	0,04	KE < 5 0,0031	KE 5 0,0039	0,797	60
	2	- 0,18	0,00003	0,0052	0,647	119

- 1 : Toutes parcelles de Colza (a, b1, b2) et de blé (Précédent Maïs et Colza)
2 : idem + parcelles de Maïs (a et b)

Les rapports D_{lim}/p_{80} observés en cours de phase 1 sont donnés dans le Tableau suivant (avec D_{lim} en cm et p_{80} en T/ha.

TABLEAU 32.- RAPPORTS MOYENS D_{lim} / p_{80} OBSERVES A MONTLUEL.

Type de parcelle	Maïs a	Colza a	Colza b ₁	Colza b ₂	Blé
Date de mesure	7/05	28/09	7/10	14/10	15/04
Rapport D_{lim}/p_{80}	0,34	0,27	0,90	0,94	0,68

Dans le cas où la surface n'a subi qu'une très courte dessiccation avant et entre les pluies (colzas b₁ ou b₂), ou une dessiccation de faible ampleur (Blé) les rapports sont nettement plus élevés que dans les cas où la surface a été fortement desséchée avant et entre les pluies (maïs et colza a). On retrouve alors des valeurs proches de 0,31, valeur observée à Palaiseau. Tout se passe comme si, en cas d'histoire hydrique humide, il fallait tenir compte d'une masse de terre déplacée additionnelle dont les variations ne sont pas prises en compte par le paramètre p_{80} .

b) - Relation entre D_{lim} et les critères climatiques

La situation est différente selon qu'on envisage les résultats avec ou sans les résultats du printemps 82. Sans ces résultats, l'énergie cinétique totale est un bon prédicteur (toutes les pluies seraient dégradantes). En intégrant ces résultats, la prédiction est meilleure avec KE_5 (seules les pluies d'intensité supérieure à 5 mm/h seraient dégradantes). Autour de cette régression d'ensemble, les écarts résiduels (D_{lim} observé - D_{lim} calculé) apparaissent d'autant plus élevés en valeur positive que le sol reste plus longtemps humide au cours de la séquence climatique considérée.

Si on distingue les histoires hydriques plutôt sèches (notées S) ou humides (notées H), l'analyse de covariance (Annexe 17.2) aboutit aux équations suivantes (D_{lim} en cm et KE_5 en J/m^2) :

. histoire S : $D_{lim} = -0,40 + 0,00475 KE_5$

. histoire H : $D_{lim} = 0,77 + 0,00475 KE_5$

Les effets de l'histoire et de la covariable sont tous deux hautement significatifs. Le coefficient de détermination est de 0,83 ce qui montre qu'on rend ainsi mieux compte des variations de D_{lim} que si on prend en considération la seule variable KE_5 , puisque dans ce cas $r^2 = 0,65$. Les valeurs des

TABLEAU. 33.- VARIATIONS DE D_{lim} ET DE LA STABILITE STRUCTURALE SUR LE SITE DE MONTLUEL.

	R O T A T I O N		
	A	B	C
D_{lim} moyen (cm) après environ 40 mm de pluie (a)	1,97	1,86	1,76
(b)	1,96	-	1,82
$\log 10 I_s$	1,42	1,23	1,22
Ag A %	12,6	16,2	15,1
Ag B %	7,0	9,7	10,2
Ag E %	8,7	11,7	10,5

- (a) Moyenne de 12 résultats correspondant à 3 dates, deux blocs, deux placettes hors roue
Analyse de variance en ANNEXE 17.3.a
- (b) Moyenne de 26 résultats correspondant à 9 dates, deux blocs, deux placettes hors roue
Analyse de variance en ANNEXE 17.3.b

TABLEAU. 34.- RAPPEL DES PRINCIPALES RELATIONS STATISTIQUES ENTRE D_{lim} (cm), p_{80} (T/Ha) VARIABLES CLIMATIQUES (indices KE en J/m^2)

SITE	EQUATIONS de REGRESSION	r^2	NOMBRE de RESULTATS
<u>PALaiseau</u>	(1) $P_{80} = 0,64 + 0,036 (KE 20) + 0,026 (KE 10-20)$	0,58	16
	(2) $D_{lim} = - 0,15 + 0,0028 (KE 5)$	0,73	106
	(3) $D_{lim} = 0,00 + 0,313 P_{80}$	0,79	106
<u>MONTLUEL</u>	(4) $P_{80} = 0,53 + 0,029 (KE 20) + 0,0030 (KE 10-20) + 0,0042 (KE 5-10) + 0,0015 (KE < 5)$	0,74	43
	(5) $D_{lim} = - 0,17 + 0,0052 (KE 5)$	0,55	119
	(6) $D_{lim} = 1,56 + 0,140P_{80}$	0,13	66

- (1) Equation relative au traitement Co. Valeurs P_{80} par séquence, donc non cumulées.
- (3) et (6) Valeurs P_{80} cumulées depuis la date d'exposition aux pluies
- (4) Les valeurs des séquences de Juin 82 (pluies très intenses) ne sont pas prises en compte

ordonnées à l'origine suggèrent que les seuils d'intensité correspondant à des pluies efficaces vis-à-vis de Dlim (c'est-à-dire "battantes") sont :

- . supérieurs à 5 mm/h en cas d'histoire hydrique sèche, puisqu'il faut alors soustraire un terme correctif si on tient compte de KE₅ ;
- . inférieurs à 5 mm/h en cas d'histoire hydrique humide puisqu'il faut alors majorer l'effet de KE₅.

c) - Influence de caractères liés à la constitution du sol

On peut tout d'abord souligner que si on prend le même prédicteur KE₅, le coefficient de régression obtenu (Cf. Tableaux 30 et 31) est nettement plus élevé dans le cas du site de Montluel que dans celui de Palaiseau : la même pluie est donc plus dégradante sur le sol de Montluel. On retrouve l'influence bien connue de la teneur en argile (10 % en moins sur le site de Montluel) sur le caractère "battant" des terres et plus précisément sur la stabilité structurale.

Par ailleurs, sur le site de Montluel, on peut systématiquement comparer, à chaque date d'observation située en cours de phase 1, les valeurs Dlim obtenues sur des parcelles de stabilité structurale variable. On constate (Tableau 33) que les valeurs obtenues en rotation A sont en moyenne un peu plus élevées, que celles obtenues en rotation C. Ces différences sont faibles et l'analyse de variance (Annexe 17.3) ne permet pas de les considérer comme significatives (P (F) = 0,115). Cependant, le seuil 0,10 est presque atteint et cette tendance à une dégradation moins prononcée pour les parcelles de la rotation C correspond bien aux observations antérieures (BOIFFIN et al., 1981 ; 1982). Or, elles se distinguent surtout par des taux d'agrégats stables après prétraitement benzène plus élevés (Tableau 33).

En définitive, il y a donc bien une certaine correspondance entre les variations de Dlim et celles de la stabilité structurale, mais l'influence de cette propriété sur le rythme de la dégradation est restée très discrète dans la gamme des statuts organiques qui a pu être explorée.

c) - Conclusion : valeur d'indicateur du paramètre Dlim, rapport entre déplacement et projection

La relation observée entre Dlim et p₉₀ à partir des résultats obtenus à Palaiseau démontre que le calibre équivalent Dlim a bien la signification attendue d'après le modèle de colmatage interstitiel. N'observant pas cette relation dans le cas du site de Montluel, nous n'avons donc pas, dans ce cas, de confirmation supplémentaire

directe de cette valeur indicatrice, mais les variations de D_{lim} en relation avec le climat et le sol n'en restent pas moins interprétables de manière cohérente en termes de déplacement de terre. Conservant le modèle de colmatage interstitiel, nous avons donc été conduits à invoquer une certaine divergence entre les indicateurs D_{lim} et p_{80} . Cette divergence tient à de nombreuses raisons majeures.

- a) - Par nature, l'indicateur p_{80} est plus restrictif que l'indicateur D_{lim} . En effet, il correspond essentiellement des particules (agrégats ou constituants granulométriques) qui ont été totalement séparées des fragments d'origine puis projetées au sein des récepteurs, et il sur-représente celles dont les distances de projection sont plus importantes.

Par contre, dans la détermination de D_{lim} (qui est indirecte puisqu'elle résulte d'une mesure du taux de recouvrement par les plaques) n'intervient aucune condition de cette nature. D_{lim} peut refléter des déplacements à très courte distance (chute de particules au pied même du front), voire même certains déplacements qui peuvent s'effectuer sans que le détachement se matérialise : entre autres exemples de ce type de déplacement, on peut citer les bourrelets qui se forment autour du micro-cratère créé par l'impact d'une goutte (MIHARA, 1951), ou sur les faces inclinées de mottes en cours de dégel. On conçoit donc que le remplissage interstitiel puisse avoir lieu sans que pour autant on recueille une masse importante de projections. En revanche, on peut supposer que la majeure partie des projections s'accumule dans les interstices et contribue à l'augmentation de D_{lim} , mais en définitive, les masses de terre projetée recueillies ne représentent qu'une fraction, d'importance variable, du matériau déplacé dans les interstices.

- b) - Le déterminisme des quantités de terre mise en jeu n'est pas identique dans l'un et l'autre cas ; autrement dit, la part respective des différents processus de détachement et de transport ne varie pas selon les mêmes règles. Ces deux indicateurs ne vont donc pas réagir de la même façon aux événements climatiques, comme le démontre le Tableau 34 où sont récapitulées les principales relations statistiques les concernant :

- l'indice p_{80} dépend avant tout de l'énergie cinétique des pluies de forte intensité. Les variations saisonnières semblent liées à l'histoire hydrique de surface du sol (Annexes 16.4) : tout se passe comme si, à la suite d'alternances d'humectation-dessiccation, les seuils d'intensité critique à partir desquels les pluies entraînent une projection, étaient plus faibles qu'en cas d'histoire hydrique uniformément humide.

- Le critère D_{lim} dépend également de l'énergie cinétique des pluies, considérée au-delà de certains seuils d'intensité mais ceux-ci sont plus faibles que dans le cas précédent et l'influence des différentes classes d'intensité semble moins hiérarchisée. Par ailleurs, l'histoire hydrique du sol ne semble pas jouer de la même manière que dans le cas précédent : les écarts résiduels sont, cette fois, d'autant plus élevés (en valeurs positives) que le sol reste plus humide au cours de la séquence climatique considérée (Annexe 17.1).

En fait, les conditions dans lesquelles la pluie agit sur le sol peuvent favoriser tel ou tel effet de l'impact des gouttes plutôt que tel autre. Des pluies de forte énergie cinétique sur une terre sèche relativement argileuse, ayant subi des alternances d'humectation-dessiccation, vont surtout provoquer la projection de particules ou d'agrégats préindividualisés et on peut alors s'attendre à une valeur faible du rapport D_{lim}/p_{80} . Ce régime de détachement correspondrait à celui qu'ont observé DE PLOEY et MUCHER (1981) pour certains sols "stables" ; inversement avec des pluies d'intensité moyenne mais susceptibles d'engendrer un excès d'eau microlocal même fugace, on risque d'obtenir plutôt une désagrégation ou une déformation sur place avec de faibles distances de déplacement et on peut alors s'attendre à une valeur élevée du rapport D_{lim}/p_{80} . Cette modalité s'apparenterait à celle observée par DE PLOEY et MUCHER, pour les sols instables et elle semble effectivement prédominante à Montluel en conditions humides.

Si les conditions qui déterminent ces modalités de détachement et de déplacement varient (ce qui est très probable si on considère des sols différents ou pour un même sol différentes dates d'exposition aux pluies comme c'est le cas pour le site de Montluel), le rapport D_{lim}/p_{80} doit varier et il est alors logique de ne pas voir apparaître de corrélation d'ensemble entre D_{lim} et p_{80} . Réciproquement, le fait d'observer une corrélation entre D_{lim} et p_{80} (comme pour le site de Palaiseau) signifie que les modalités de déplacement sont relativement peu variables entre les situations (dates et parcelles) considérées et que la modalité prépondérante comporte vraisemblablement un détachement total des particules de terre par rapport aux fragments d'origine.

2.1.5. - Conséquences de l'évolution morphologique sur le régime d'infiltration des pluies

A/ - Position du problème, observations et mesures réalisées

Dans la première partie, nous avons déjà indiqué que l'infiltration diminuait au cours de la phase 1, parallèlement

Tableau. 35. - OBSERVATION DU FLAQUAGE ⁽¹⁾ SUR LES DIFFERENTES PARCELLES DES SITES.

PALAISEAU	DATE DES PLUIES OBSERVEES (Intensité maximum) mm/h	TAUX DE RECEPTION DE L'ENERGIE CINETIQUE INCIDENTE		100		70	30		no.	
		ETAT STRUCTURAL INITIAL		FIN		GROSSIER	FIN	FIN		GROS-SIER
		HISTOIRE HYDRIQUE	normale	perturbée (bâche sous H1)	normale	perturbée (bâche sous H1)	normale	normale		normale
	27.11.81 (12 mm/h)	0	0	0	0	0	0	0		
	28.11 (3 ")	0	0	0	0	0	0	0		
	4.12 (3,5 ")	0	0	0	0	0	0	0		
	8.12 (20 ")	+	+	+	+	+	0	0		
	15.12 (1,5 ")	0	(+)	0	0	0	0	0		
	22.12 (4 ")	(+)	(+)	(+)	(+)	0	0	0		
	5.01.82 (1 ") (matin)	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	0	0		
	5.01 (2 ") a.m.	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)		+		
	23.01. (< 1 ")	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	0	0		
	29.01 (1 ")	(+)	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+		
	10.03 (4 ")	(+) 0*	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	0-	
	11.03 (2,5 ")	(+) 0*	(+)	(+)	(+)	(+)	+	+	0-	
MONILUET	DATE D'EXPOSITION AUX PLUIES	10/09	28/09	12/10	27/10	(1) 0 Absence de flaquage + Flaquage net (plus de 5 % de la surface) € Très petites flaques (moins de 5 % de la surface) Sans parenthèses : observation faite en cours de phase 1 (facès F1) Entre " " : " " " phase 2 (facès F2) * Absence de flaquage sur les parcelles exposées à partir du 9.03. * 0 sur la parcelle du Bloc I, + sur la parcelle du Bloc II.				
	6.10.82 (<1)	0	0							
	7.10 (2)	(0)	0							
	8.10 14h (3)	(+)	(0-€)							
	16 h (4,5)	(+)	(+)							
	13.10 14h30 (92)	(+)	(+)	+						
	15h (4)	(+)	(+)	€						
	16h (1,5)	(+)	(+)	€						
	14.10 16h (1)	(0)	(0)	(0)						
	16h30 (5)	(+)	(+)	(+)	pas d'observation directe					

(1) 0 Absence de flaquage
 + Flaquage net (plus de 5 % de la surface)
 € Très petites flaques (moins de 5 % de la surface)
 Sans parenthèses : observation faite en cours de phase 1 (facès F1)
 Entre " " : " " " phase 2 (facès F2)
 * Absence de flaquage sur les parcelles exposées à partir du 9.03.
 * 0 sur la parcelle du Bloc I, + sur la parcelle du Bloc II.

à l'extension des plaques continues. L'observation d'un large éventail de conditions et de rythmes de dégradation permet de rechercher si cette décroissance est liée à une évolution morphologique définie, indépendamment de la date d'observation, des conditions de mesure et des modalités de la dégradation structurale. Dans ce but, on a :

- noté la présence ou l'absence de flaques sur les différents types de parcelles présents au sein des dispositifs, lors de certains épisodes pluvieux (Tableau 35) ;
- réalisé les mesures d'infiltrabilité, selon la méthode des taches saturées, sur plusieurs parcelles au sein de chaque site, représentatives de différents états de surface présents à une date donnée. Nous obtenons ainsi, dans chaque cas, une estimation de l'infiltrabilité du sol humide I_H ;
- confronté ces mesures aux éléments de caractérisation morphologique des parcelles correspondantes (Tableau 36). Cette confrontation n'est possible que si les dates de mesure et d'observation coïncident ou sont suffisamment voisines pour que les valeurs des critères morphologiques puissent être intrapolées sans risque d'erreur importante.

B/ - Résultats

a) - Sur le site de Palaiseau, on note d'après le Tableau 35 (partie supérieure) :

- . une évolution pratiquement identique des symptômes de flaquage sur les parcelles différant par l'état structural initial,
- . des différences importantes d'évolution entre les parcelles se distinguant par l'interception de l'énergie cinétique : l'absence de flaquage se maintient d'autant plus tardivement que le taux de réception de l'énergie cinétique incidente est plus faible, c'est-à-dire que l'état de surface se dégrade plus lentement.

Cette influence de la vitesse de dégradation est précisée par la confrontation des mesures d'infiltrabilité et des critères morphologiques (partie supérieure du Tableau 36). En particulier, les observations des 9 et 17.12.1981 permettent de comparer des parcelles plus ou moins protégées et confirment que les résultats d'infiltrabilité se classent dans l'ordre inverse des taux de réception de l'énergie et, en tendance, dans l'ordre inverse des critères morphologiques de dégradation superficielle.

TABLEAU.36.- INFILTRABILITE ET STADE DE DEGRADATION DE LA SURFACE.

SITE	DATE des MESURES	PARCELLE	INFILTRABILITE MOYENNE (mm/h)	CRITERES de DEGRADATION STRUCTURALE.			
				NOTE D'ETAT DE LA TERRE FINE	SURFACE DES PLAQUES (Sp) - %	D _{lim} CALCULE cm	D _{lim} OBSERVE cm
PALAISEAU	20.11.81	II Co	10,0	1 ⁻	0	< 0,1	0,1
	24.11.81	I Co	10,3	0 ⁺ à 1 ⁻	5 ⁺	0,2	0,1
	26.11.81	II Co	6,3	1 ⁺	10 ⁺	0,2 ⁺	
	30.11.81	II Co	5,9	3	47 ⁺	0,85	0,4 - 0
	9.12.81	II Co	3,7	5	68,0	1,4	1,0
	17.12.81	II C4	3,7	2 à 3	31,4	0,5	0,2 - 0
		II C1	6,4	1	5,4	0,2	0,2
		II Co	< 1	6	90 ⁺	2,5 ⁺	2,0
		II C4	< 1	4 ⁺ -5	79,3	2,1	0,8
		II C1	4,4	2 ⁺	22,9	0,6	0,3
I C7	6,6	1	11,2	0,3	0,1 à 0,		
MONTLUEL	30.04.82	1 N2 a	37,8	1	1,3	0,1	0,1
		10 N2 a	47,1	1	7,1	0,1	0,1
		12 N2 a	36,6	1	1,2	< 0,1	0,1
		6.05.82	1 N2 a	23,2	3 - 4	60	1,0
		10 N2 a	20,4	3 - 4	55	1,2	0,4
		12 N2 a	23,2	3 - 4	60	1,3	0,45
		23.09.82	3 N2 a	45,3	1 - 2	10	< 0,1
	7.10.82	3 N2 a	8,8	6	90	3	2,0
	26.10.82	3 N2 b3 (Eo)	46,0	0	0	< 0,1	≤ 0,1
	+ +	3 N2 b3 (E1)	24,1	1	20	0,35	0,2
10.11.82	4 N2 a	7,8	5	75	2,3	1,5	
	2 N2 a	7,1	4 - 5	65	2,2	1,0	

+ Valeurs déterminées par intrapolation

++ parcelle b3 : analogue à b2 mais bâchée et découverte le 26.10 et non suiv. par la suite.

E1 : légère dégradation

Eo : surface rafraîchie au râteau

La variabilité des estimations ainsi réunies provient à part sensiblement égale de variations diachroniques et synchroniques. Pour tenter d'en rendre compte de manière unique, nous avons testé des ajustements statistiques entre l'infiltrabilité d'une part (I_H et mm/h) ; les taux de recouvrement par les plaques (Sp en %) ou le calibre équivalent D_{lim} (cm), d'autre part. Les formes d'ajustement choisies sont, d'une part la régression linéaire simple, d'après laquelle I_H s'annulerait pour une valeur finie des critères de dégradation, d'autre part la régression exponentielle $I_H = ae^{-bx}$ qui astreint I_H à tendre asymptotiquement vers zéro lorsque la dégradation se prolonge indéfiniment. Les résultats obtenus sont les suivants (pour 11 couples) :

$$I_H = 8,2 + 0,086 Sp \quad (r^2 = 0,76)$$

$$I_H = 8,0 + 3,32 D_{lim} \quad (r^2 = 0,74)$$

$$I_H = 10,0 e^{-0,029 Sp} \quad (r^2 = 0,78)$$

$$I_H = 10,1 e^{-1,20 D_{lim}} \quad (r^2 = 0,89)$$

- b) - Sur le site de Montluel, les parcelles se distinguent avant tout selon leur date d'exposition aux pluies. Les notations de flaquage (Tableau 35) sont peu discriminantes à l'automne, en raison des fortes intensités observées et de la rapidité de dégradation des parcelles, et au printemps, pour les raisons inverses⁽¹⁾. Cependant, le 13.10, on constate bien que sur les parcelles où la dégradation est le moins avancée (c'est-à-dire celles exposées le 12.10), le seuil d'intensité provoquant le flaquage est plus élevé que pour les parcelles exposées antérieurement aux pluies.

D'après le Tableau 3.6 (partie inférieure), on vérifie que la diminution d'infiltrabilité est parallèle à la dégradation de l'état structural superficiel et on obtient les relations suivantes (pour 12 résultats) :

$$I_H = 42,5 + 0,410 Sp \quad (r^2 = 0,83)$$

$$I_H = 40,1 + 13,2 D_{lim} \quad (r^2 = 0,84)$$

$$I_H = 44,9 e^{-0,019 Sp} \quad (r^2 = 0,78)$$

$$I_H = 42,0 e^{-0,64 D_{lim}} \quad (r^2 = 0,90)$$

(1) Aucun flaquage n'ayant été noté au cours des épisodes observés directement, on n'a pas reporté ces notations dans le Tableau 35.

c) - Discussion

Avant de dégager les conclusions communes aux deux sites on doit noter une différence importante. Pour les mêmes valeurs de S_p et D_{lim} , on obtient des valeurs d'infiltrabilité de sol humide beaucoup plus élevées pour le site de Montluel que pour celui de Palaiseau.

Lorsque les structures continues prédominent à la surface du sol (valeurs de S_p et D_{lim} élevées), cette différence peut être mise en relation avec celle des densités de crêtes, nettement plus faibles à Montluel comme nous le verrons par la suite, ce qui est conforme à l'influence de teneur en argile sur la densité texturale (FIES et STENG 1981 b).

En revanche, la différence observée pour des états fragmentaires initiaux (10 contre 40 mm/h) est plus difficile à expliquer puisqu'en principe l'écoulement s'effectue alors dans une porosité de type structural qui d'après les mesures effectuées sur l'horizon 0-8 cm n'est pas plus importante sur le site de Montluel. Une explication possible, non vérifiée dans ce travail, serait que l'apport d'eau puisse entraîner un certain gonflement des fragments sur site de Palaiseau. (sur ce site, ils sont généralement saturés au démarrage des mesures) ce qui restreindrait le passage par le pore structural où circule l'eau. Ce phénomène ne produirait pas dans le cas du site de Montluel (où l'écoulement gravitaire démarre vraisemblablement avant que les fragments ne soient totalement saturés et donc ne puissent gonfler).

Quoi qu'il en soit, en ce qui concerne l'évolution de l'infiltrabilité du sol humide, les résultats obtenus sur les deux sites sont convergents. En effet, il apparaît dans ce cas :

- que l'évolution morphologique de la surface, telle que nous l'avons appréhendée, rend compte de l'essentiel des variations de l'infiltrabilité du sol humide, que celles-ci se manifestent dans le temps ou entre parcelles ;
- que le critère le mieux corrélé à ces variations est le paramètre D_{lim} . Ceci apparaît en comparant les coefficients de détermination des relations mentionnées ci-dessus, mais vu le faible nombre de données cette conclusion n'est pas convaincante. Par contre, la similitude de l'évolution du comportement sous les pluies notée entre les traitements fins et motteux de Palaiseau permet d'affirmer que c'est bien le paramètre qui est à retenir : on a montré dans la première partie (Cf. Fig. 3 a et b) que sur ces deux types de parcelles la valeur du critère D_{min} , évaluation mineure

et grossière de D_{lim} , évoluait de façon très analogue sur ces deux types de parcelles alors que le critère S_p évoluait beaucoup plus lentement sur les parcelles motteuses.

- que les variations de I_H en fonction de D_{lim} semblent avoir une allure curvilinéaire avec une décroissance plus rapide au début de la dégradation.

Il apparaît donc, à nouveau, que le critère D_{lim} est un indicateur pertinent du stade de dégradation structurale de la surface.

La relation entre dégradation structurale et régime d'infiltration peut s'interpréter à la lumière de la Relation 1, soit avec les notations introduites dans la 1ère partie (§133)

$$q_i = K_s^C \frac{h_0 + h_i + z_i}{z_i}$$

Si la tache ne comporte pas de flaque $h_0 = 0$ et, I étant l'infiltrabilité :

$$q_i = I = K_s^C \frac{h_i + z_i}{z_i}$$

Si on admet, une fois les taches en équilibre, que le terme h_i , sans être nécessairement nul, est faible et peu variable, l'infiltrabilité mesurée I correspond à I_H , infiltrabilité du sol humide. Au cours de la dégradation structurale, celle-ci peut décroître selon plusieurs modalités éventuellement combinées :

- 1°/ - décroissance du terme K_s^C moyen par augmentation de la continuité latérale des croûtes (colmatage des orifices). Ce processus peut être rattaché à l'extension des plaques continues : les taches saturées, de par leur taille et la disposition des goutteurs, prennent en compte des surfaces composites où les plaques ont de plus en plus d'importance.
- 2°/ - décroissance du terme K_s^C moyen par augmentation de la compacité des croûtes sous l'action des impacts de gouttes. Les résultats des mesures de densité effectuées à plusieurs reprises sur des fragments de croûte structurale (1) n'excluent pas cette hypothèse.
- 3°/ - décroissance de K_s^C par modification de l'orientation de la porosité des croûtes. D'après les observations de lames minces ceci interviendrait à partir du début de la phase 2 en liaison avec l'apparition de dépôts stratifiés.

(1) Cf. plus loin § 3.2.1., Tableau 39.

4°/ - augmentation du terme z_i par épaississement des croûtes. Cette dernière modalité ne peut avoir de répercussions que si le terme h_i (potentiel de succion à la base de la croûte) est effectivement non nul, tout en restant faible et peu variable.

Les observations micromorphologiques ne sont pas suffisamment détaillées dans le temps pour permettre de vérifier de manière probante la réalité de cette modalité. Cependant, elles ne la contredisent pas : d'après le Tableau 7, on constate que l'épaisseur du microhorizon m_2 (croûte structurale constituant les plaques continues) augmente à fur et à mesure du déroulement de la dégradation structurale : on note des valeurs de 1 à 2 mm au début de la phase 1, et de 2 à 4 mm à la fin.

Or, selon le modèle de colmatage interstitiel que nous avons précédemment développé, le calibre équivalent D_l est proportionnel au volume de matériau interstitiel par unité de surface. De ce fait, l'augmentation de D_{lim} t devrait non seulement l'augmentation de continuité des croûtes (augmentation de S_p), mais aussi leur épaississement (selon le modèle D_{lim} est proportionnel à l'épaisseur maximum de matériau interstitiel rencontré au sein d'une plaque). En définitive, les relations statistiques liant D_{lim} à l'infiltrabilité du sol humide (qui seront d'une grande utilité pour l'étape de modélisation apparaissent redevables d'une interprétation physique cohérente.

2.2. - LA PHASE 2, PHASE DE FORMATION DES CROUTES STRATIFIEES

A la différence de la phase 1 dont le début est défini par la première pluie survenant après réalisation de l'état fragmentaire initial, la phase 2 ne se déclenche qu'en fonction de certaines conditions qui dépendent elles-mêmes des modalités de la dégradation antérieure. Avant d'appliquer le même type d'analyse que pour la phase 1, un problème préalable consiste à préciser ces conditions.

2.2.1. - Le déclenchement de la phase 2

A/ - Principales hypothèses

Il a déjà été établi dans la première partie (§ 1.3.) que l'avènement de la phase 2 est lié à l'apparition

des flaques et du ruissellement. Ceux-ci engendrant la formation de dépôts stratifiés peu perméables et donc une diminution supplémentaire de l'infiltrabilité, la phase 2 serait alors engagée de manière quasi-irréversible.

L'évènement critique déclenchant la phase 2 serait donc la première pluie répondant aux conditions suivantes :

- intensité supérieure à l'infiltrabilité ;
- hauteur d'eau apportée à cette intensité suffisante pour que les films d'eau acquièrent une certaine épaisseur et une certaine vitesse d'écoulement, et que les flaques soient suffisamment étendues et profondes ;
- détachement et déplacement d'une quantité significative de matériau, condition non indépendante de la première puisqu'il y a une étroite relation entre érosivité et intensité de la pluie.

Concrètement, l'appréciation des conditions C₁ et C₂ peut se faire de la manière suivante à partir des enregistrements pluviographiques : chaque pluie (groupe d'épisodes pluvieux consécutifs) peut être représentée (Fig. 35) par une courbe cumulative de la hauteur en fonction de l'intensité (on cumule les hauteurs obtenues pour chaque classe d'intensité, par ordre d'intensité croissante). Sur l'abscisse on repère la valeur de l'infiltrabilité du sol humide au début de la pluie (en première approche on supposera qu'elle varie peu au cours même de la pluie) : 3 cas sont envisagés sur la Fig. 35. Si une hauteur importante tombe à une intensité supérieure à l'infiltrabilité, on suppose que la pluie peut déclencher la phase 2 (cas 1) Sinon (cas 2 et 3.) on suppose que la phase 2 n'est pas déclenchée, la phase 1 se poursuit.

Selon ce schéma, la variabilité des dates de déclenchement de la phase 2 doit s'expliquer en fonction de deux séries d'éléments :

- la vitesse de dégradation de la surface du sol, qui dépend de l'agressivité des pluies et de la sensibilité du sol en cours de phase 1 ;
- la répartition chronologique des intensités pluviales et leur confrontation avec l'évolution de l'infiltrabilité.

B/ - Premier type de confrontation avec les résultats expérimentaux : variabilité des délais d'apparition du faciès F₂

Les différentes dates d'apparition du faciès F₂ sont indiquées dans les Tableaux 37 et 38,

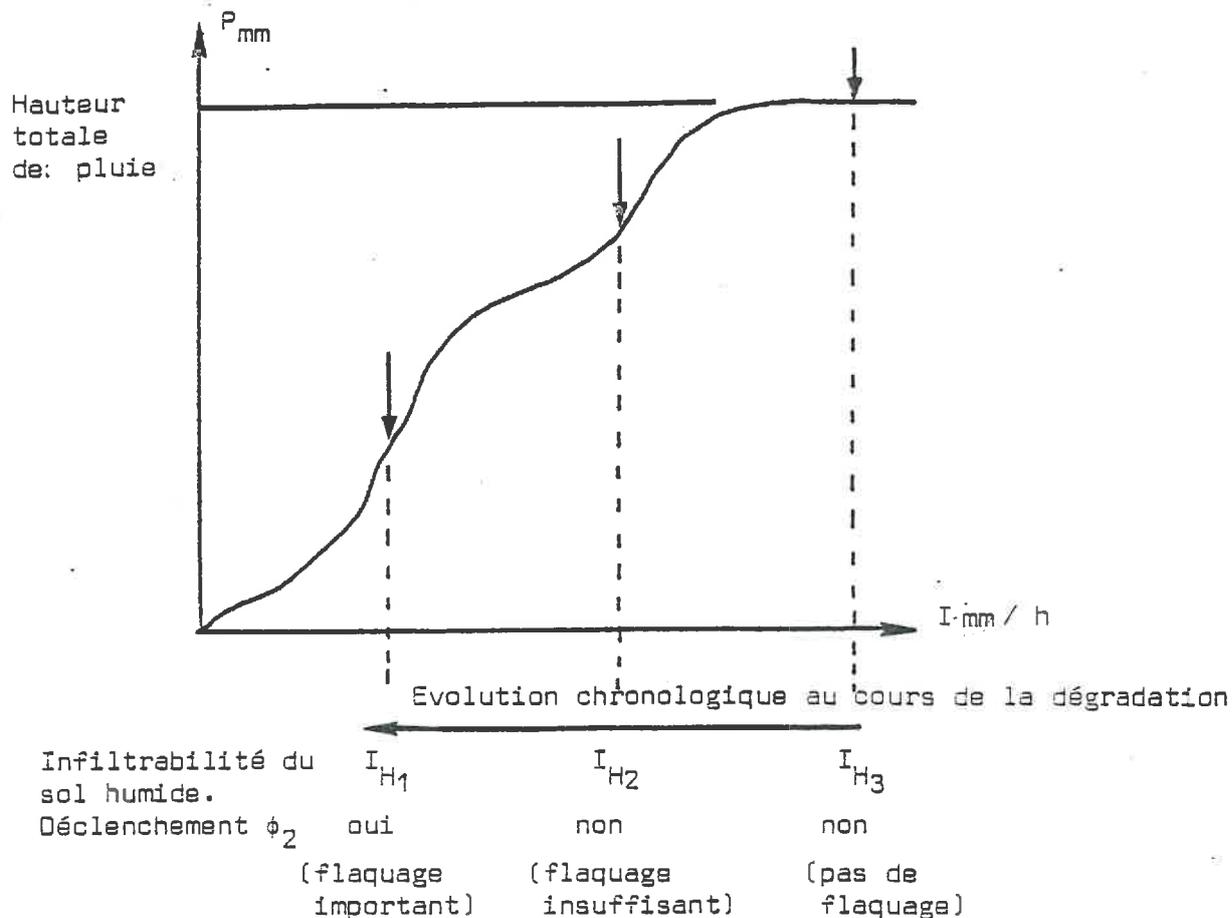


FIG. 35.- CARACTERISATION DE LA STRUCTURE D'UNE PLUIE DECLENCHANT OU NON LA PHASE 2.

DATE d'EXPOSITION AUX PLUIES	DERNIERE DATE D'OBSERVATION de F1 TYPIQUE	PREMIERE DATE D'OBSERVATION de F2 TYPIQUE	DUREE APPROXIMATIVE de F1 1 mois	TYPE DE PARCELLES CORRESPONDANTES			TAUX DE RECEPTION de l'ENERGIE CINETIQUE %
				IDENTIFICATEUR (Cf. Tab. 14)	ETAT INITIAL	HISTOIRE HYDRIQUE	
10/11/1981	6/12	8/12		I C6	Fin, plat	Modifiée	100
	12 12	16 12		I et II A0 I et II A6 I et II B0 I et II C0 I et II C2 II C6	Grossier, plat " Fin, billonné Fin, plat " "	Normale Modifiée Normale Normale Normale Modifiée	100 100 100 100 100 puis 30 100
	28/12	4/01		I et II C4 II C3	Fin, plat "	Normale Normale	70 30
8/03/1982	7/04 (Fin des observations)	-		I et II C1 I C3 I et II C7	Fin, plat " "	Normale Normale Normale	30 puis 100 30 20
	7 04 (Fin des observations)	-		I et II C5	Fin, plot	Normale	100

TABLEAU 38.- CHRONOLOGIE DES PHASES DE LA DEGRADATION DE SURFACE SUR LE SITE DE MONTLUEL.

DATE d'EXPOSITION AUX PLUIES	DERNIERE DATE D'OBSERVATION de F1 TYPIQUE	PREMIERE DATE D'OBSERVATION de F2 TYPIQUE	DUREE APPROXIMATIVE de F1 1 mois	TYPES DE PARCELLES CORRESPONDANTES (Cf. Tab. 15)	
29/04/82	7/06 (Changement probable vers le 13.06)	24/06		Toutes parcelles de type Mais a	
12/05/82	7/06 (Changement probable vers le 13.06)	24/06		Toutes parcelles de type Mais b	
10/09/82	28/09	28/09		Toutes parcelles de type Colza a	
28/09/82	7/10	7-8/10		Toutes parcelles de type Colza b1	
12/10/82	13/10	14/10		Toutes parcelles de type Colza b2	
27/10/82	10/11	15/11		Toutes parcelles de type Blé/Mais et Blé/Colza	

a) - Sur le site de Palaiseau, cette variabilité est particulièrement accentuée puisque dans certains cas la phase n'est même pas encore apparue à la fin de la période d'observation. Ce sont :

- soit des parcelles exposées très tardivement aux pluies (type C₅) où le flaquage critique ne s'est pas encore produit lors de l'interruption des observations ;
- soit des parcelles exposées à l'automne mais protégées par des grillages. Sur ces parcelles la dégradation au cours de la phase 1 a été plus lente et la surface a vu à diverses reprises son infiltrabilité réaugmentée avant que ne se produise le flaquage critique. Ces réaugmentations sont dues successivement à l'effet de fragmentation du gel ayant lieu du 6.01 au 18.01 puis à la dessiccation de la surface du sol qui survient à partir du mois de Février⁽¹⁾.

Sur toutes les autres parcelles, le flaquage critique se produit avant ces événements. Le passage de la phase 2 est noté à des dates variables selon les parcelles (8.01 au 4.01). En confrontant ces dates aux notations de calibre D_{min} (Annexe 12), on constate que ces dates sont proches de la date à laquelle on enregistre pour la première fois une valeur D_{min} supérieure à 1 cm. Réciproquement, cette condition n'est pas réalisée avant le 11.01 (gel) sur les parcelles qui n'atteignent pas la phase 2.

b) - Sur le site de Montluel, le délai entre les dates d'exposition et d'apparition de la phase 2 varie de 2 jours plus d'un mois, mais d'après l'Annexe 12, on constate que presque sans exception, la première date où est noté le faciès F₂ est aussi la première où est atteinte ou dépassée la valeur 1,5 cm de la notation D_{min} : on retrouve une coïncidence analogue à celle observée à Palaiseau.

c) - On peut conclure que la première proposition avancée ci-dessus (fin du § A) est vérifiée. En effet, la notation D_{min}⁽²⁾ peut être considérée comme un indicateur du stade de dégradation morphologique de la surface et son évolution est indépendante de l'état structural initial. Or, on constate que les variations de la vitesse de dégradation de la surface (vitesse d'augmentation de D_{min}) dépendent largement de celles du délai d'instauration de la phase 2.

(1) Cf. Fig. 8 a et clichés Ih, j, l.

(2) Rappelons qu'il s'agit de la notation directe sur le terrain et sur cliché, du calibre du plus petit fragment distinct.

Fig 36 a: STRUCTURE DES PRINCIPALES PLUIES PRÉCÉDANT LE DÉCLENCHEMENT DE LA PHASE 2 SUR LE SITE DE PALAISEAU

↑ Valeur approximative de l'infiltrabilité (à lire sur l'abscisse) au début de la pluie.

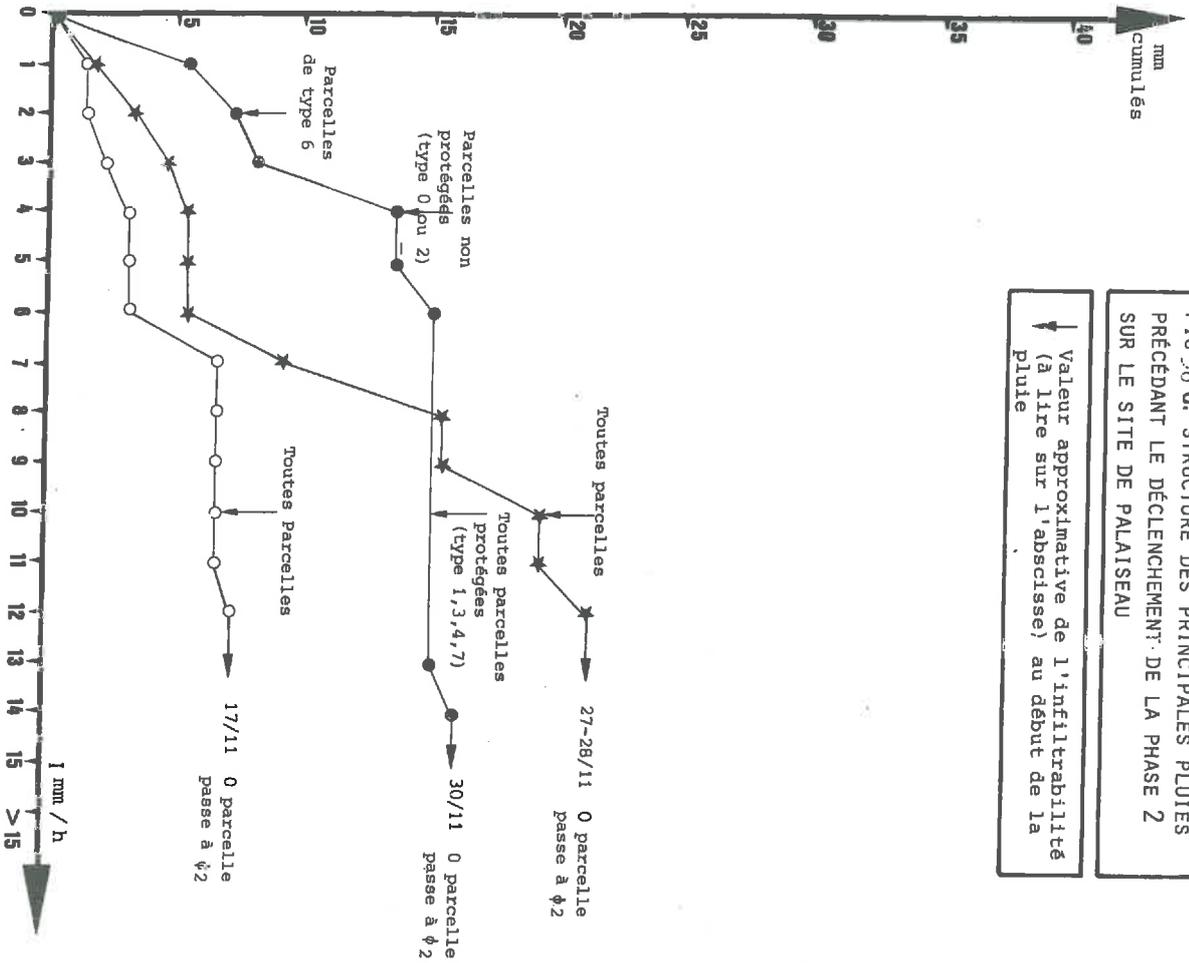


Fig 36 b: STRUCTURE DES PRINCIPALES PLUIES PRÉCÉDANT LE DÉCLENCHEMENT DE LA PHASE 2 SUR LE SITE DE PALAISEAU.

↑ Valeur approximative de l'infiltrabilité (à lire sur l'abscisse) au début de la pluie.

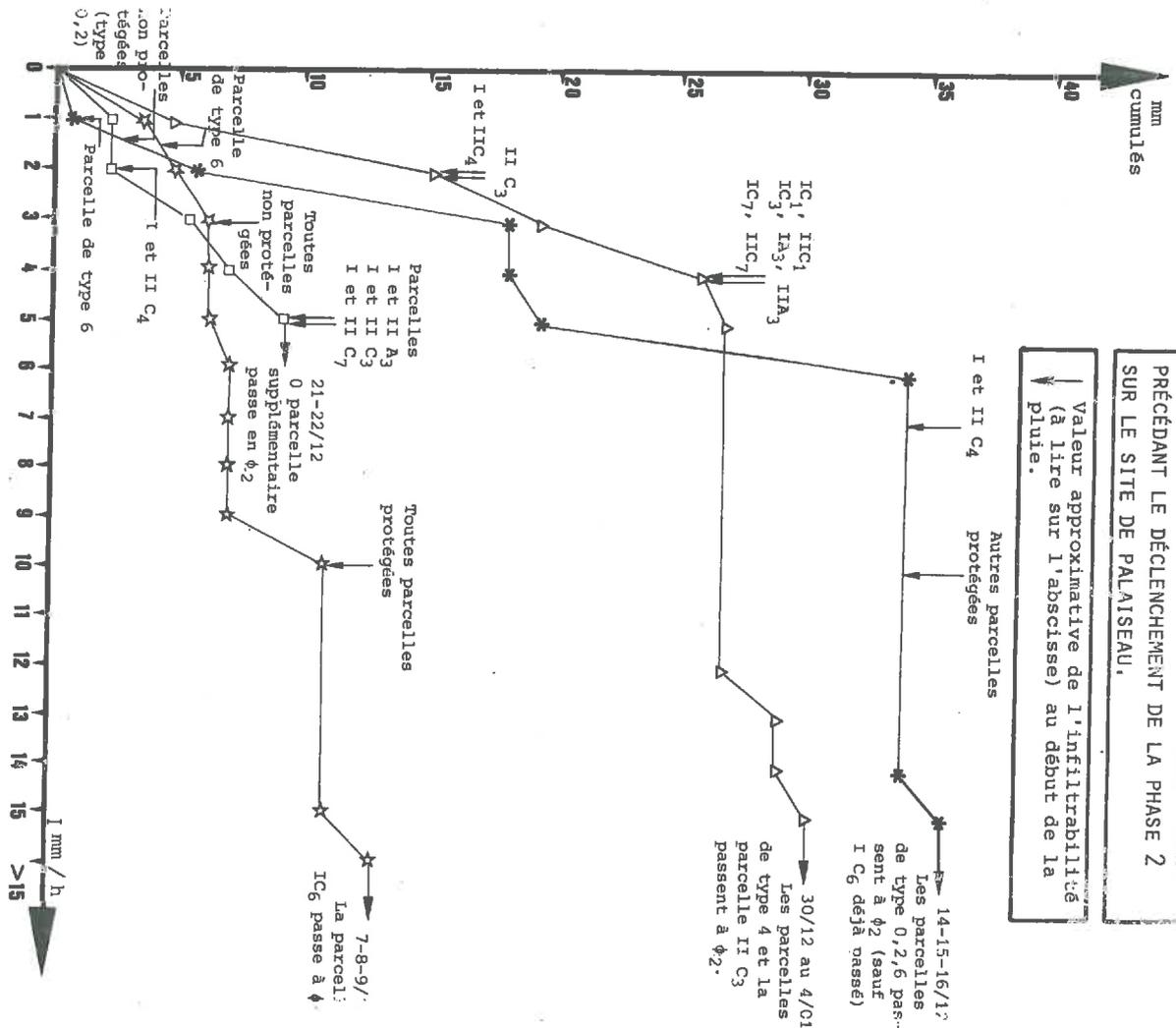


FIG 3C: STRUCTURE DES PRINCIPALES PLUIES PRÉCÉDANT LE DÉCLENCHEMENT DE LA PHASE 2 SUR LE SITE DE MONTLUEL (PRINTEMPS 82)

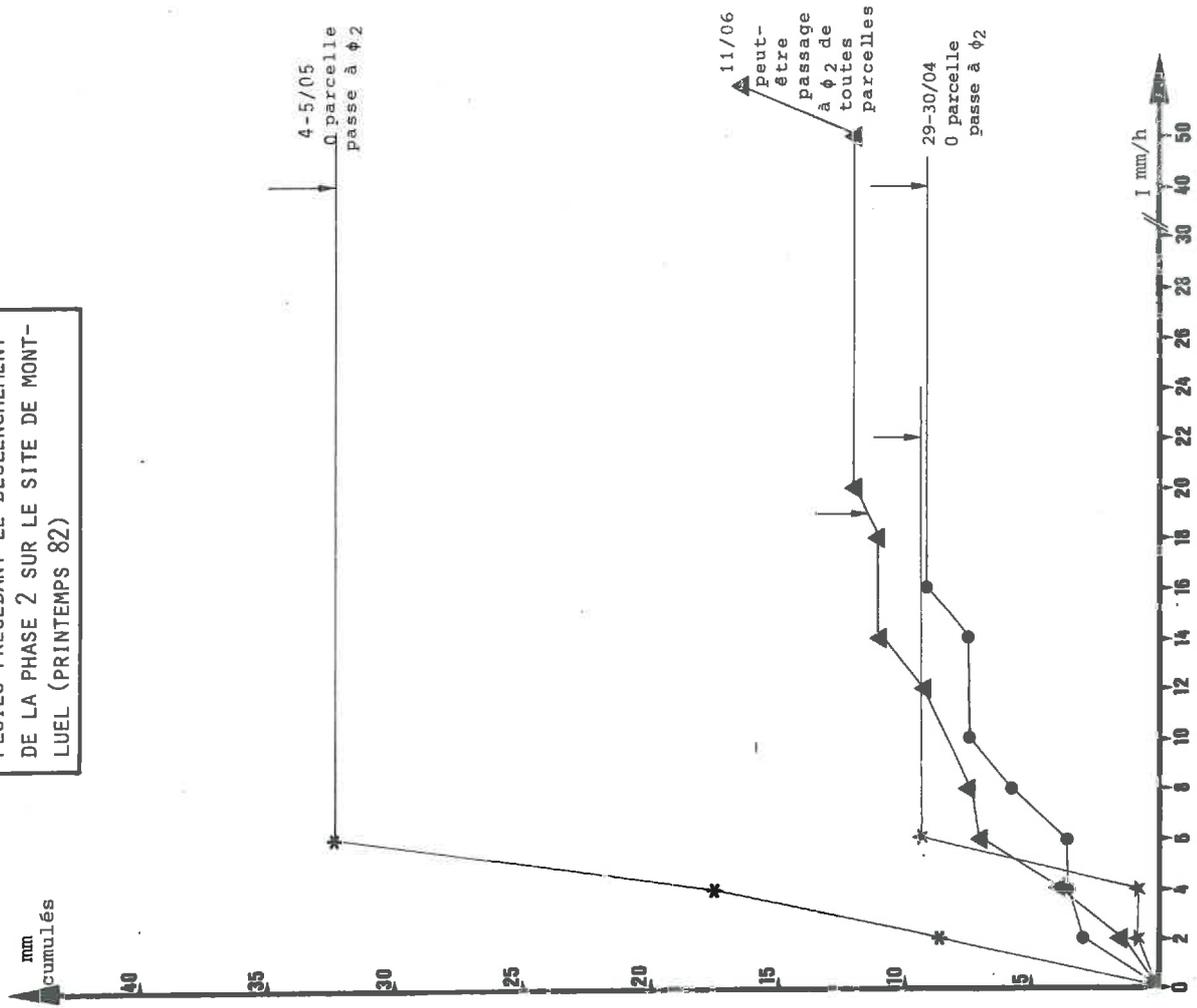
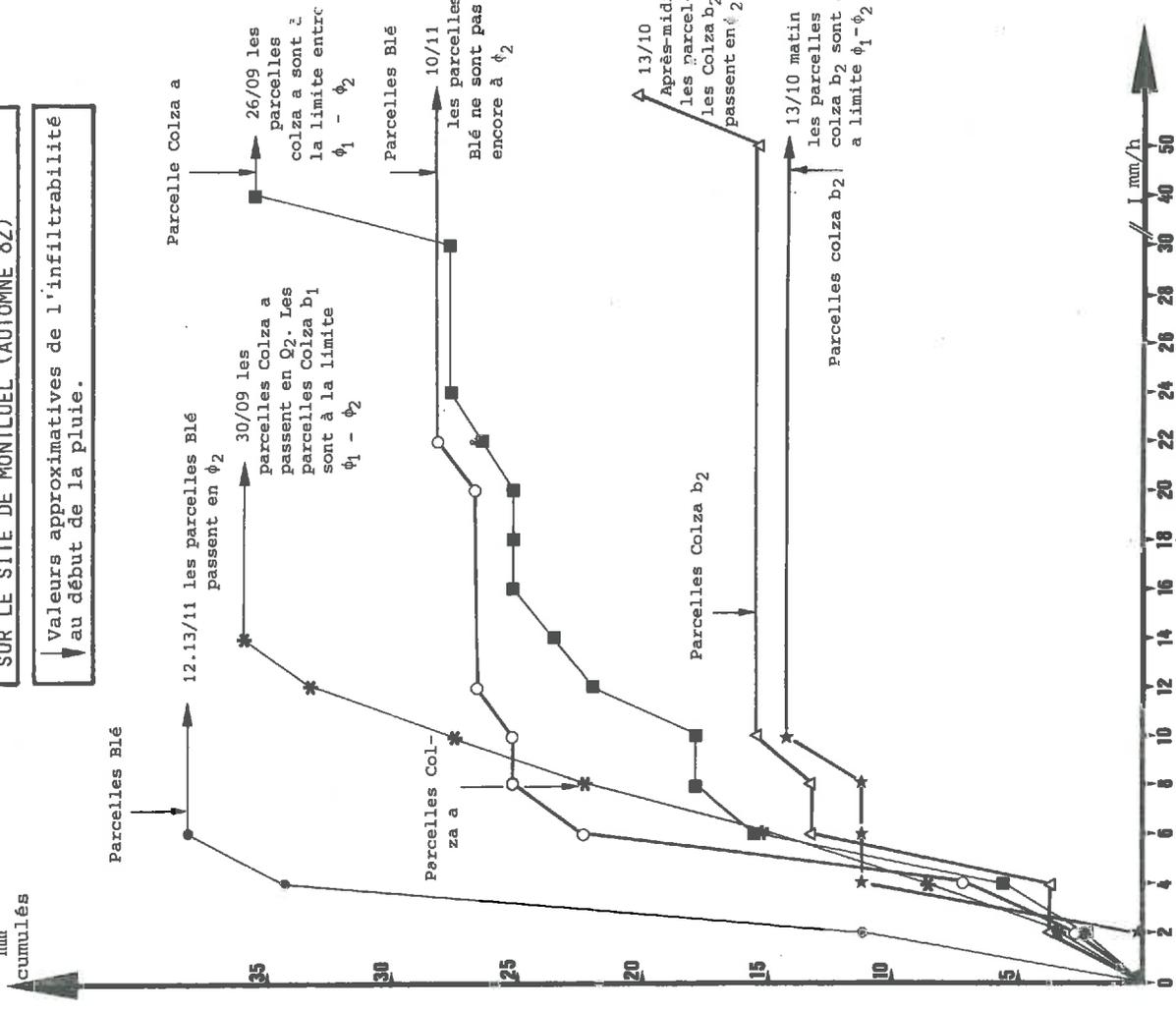


FIG 3D: STRUCTURE DES PRINCIPALES PLUIES PRÉCÉDANT LE DÉCLENCHEMENT DE LA PHASE 2 SUR LE SITE DE MONTLUEL (AUTOMNE 82)

Valeurs approximatives de l'infiltrabilité au début de la pluie.



C/ - Deuxième type de confrontation avec les résultats expérimentaux : analyse de la structure des pluies précédant l'établissement de la phase 2

Sur les Fig. 36 a, b, c, d on a représenté la répartition des hauteurs de précipitations cumulées par classes d'intensité pour les principales pluies survenant en cours de phase 2 sur les deux sites. A chaque courbe représentative d'une pluie sont associées deux indications supplémentaires : la valeur approximative de l'infiltrabilité de sol humide des différents groupes de parcelles au début de la pluie⁽¹⁾, et la mention des parcelles sur lesquelles, à l'issue de la pluie, est apparu le faciès F2.

Les premières pluies survenant au cours de la phase 1, même très intenses (Cf. Fig 36 a, par exemple) ne déclenchent pas la phase 2. L'infiltrabilité décroissant, les pluies suivantes, même moins intenses, peuvent plus aisément provoquer un flaquage. Mais le déclenchement de la phase 2 ne se produit sur une parcelle donnée, que lorsqu'une hauteur importante de pluies tombe avec une intensité supérieure à l'infiltrabilité de la parcelle au début de la pluie. Une exception à cette règle apparaît les 12/13/11/82 à Montluel (Fig. 36 d) : cette pluie déclenche la phase 2 sur les parcelles de blé dont l'infiltrabilité initiale dépasse l'intensité maximum enregistrée lors de la pluie. Cependant, on remarque que ces deux valeurs sont très proches (respectivement 7 et 6 mm/h). Or, on peut penser que l'infiltrabilité du sol a nettement diminué au cours de cette pluie très longue. Il y a donc lieu de remettre en cause, non pas l'interprétation avancée pour rendre compte des autres situations, mais le caractère discontinu de la description de l'évolution de l'infiltrabilité. le seul moyen en pratique pour résoudre ce problème consisterait à décrire l'évolution morphologique (notation D_{min} , approche directe de D_{lim} et indirecte de l'infiltrabilité) en cours de pluie.

. On peut donc conclure que la deuxième proposition énoncée ci-dessus est également vérifiée. En définitive, le déclenchement de la phase 2, du à la première pluie susceptibles d'engendrer un ruissellement notable, est un accident dont la probabilité augmente au cours du déroulement de la phase 1. A cet égard, le site de Montluel apparaît plus défavorisé que le site de Palaiseau (du moins si l'on se réfère aux périodes observées) en raison de la fréquence plus importante des pluies de forte hauteur totale et des épisodes pluvieux de forte intensité. Ce caractère climatique défavorable joue en sens inverse de la caractéristique texturale favorable que constitue l'infiltrabilité plus élevée, observée sur le site de Montluel.

(1) déterminée à partir des quelques mesures directes de I_H et des relations statistiques entre I_H et D_{lim} .

2.2.2. - Caractères généraux de l'évolution morphologique pendant la phase 2

Au cours de la phase 2, la poursuite de la dégradation structurale se manifeste par :

- la réduction des zones de départ au bénéfice des zones de dépôt,
- l'épaississement des croûtes stratifiées dans les micro-dépressions,
- la poursuite de la diminution de la rugosité, sans discontinuité apparente avec la phase 1 et sur un rythme de plus en plus lent : la décroissance des indices de rugosité peut être ajustée à des fonctions exponentielles de forme $I_r = I_{r0} e^{-bP}$ (I_r et I_{r0} indices de rugosité du temps t et initial, b coefficient positif, P pluie cumulée depuis le début de l'exposition aux pluies jusqu'au temps t), avec pour chaque parcelle des coefficients de détermination très élevés (Annexe 3.2.). DEXTER (1977) avait obtenu un résultat analogue en étudiant la variance des cotes en fonction de l'énergie cinétique cumulée.

L'évolution morphologique perceptible apparaît donc comme la résultante des déplacements latéraux de matière solide qui permet le ruissellement, et qui engendrent une réduction progressive des différences de cote entre points haut et bas du microrelief. A cet égard, il n'y a pas de différence qualitative par rapport à ce qui se passe en cours de phase 1, pendant laquelle il y a transfert irréversible des fragments vers les interstices. Ce qui distingue fondamentalement la phase 2 de la phase 1, c'est :

- la distance et les conditions du transfert, et par suite les possibilités de perception et d'appréhension de quantités de terres transférées et des espaces qu'elles affectent. Au cours de la phase 1, la répartition des sites de départ et de dépôt est si diffuse qu'il est pratiquement impossible avec les moyens dont nous disposons, d'évaluer les quantités perdues ou gagnées sur un microsite donné, de délimiter ce microsite et, a fortiori, de mettre en évidence l'existence d'échanges entre deux microsites donnés. C'est bien pourquoi nous avons dû recourir à des méthodes d'appréciation indirecte (indicateur D_{lim}). Au cours de la phase 2, les zones sont spécialisées à l'échelle décimétrique et métrique, il y a beaucoup plus de continuité dans le microrelief et la dissociation des constituants élémentaires entraîne un marquage différentiel très net des zones de départ et de dépôt.
- la prise en compte d'une limite aux transferts : Pendant la phase 1, les sources de terre peuvent être

considérées comme illimitées ; ce n'est plus le cas pour la phase 2 au cours de laquelle les sources de terre topographiquement transférable s'épuisent progressivement.

- Enfin, la micromorphologie particulière des croûtes de dépôt par rapport aux croûtes "structurales" non stratifiées, différence qui suggère que leurs conséquences physiques et agronomiques ne sont pas les mêmes. De ce point de vue, il est donc intéressant d'analyser et d'évaluer de manière distincte, les relations transferts-morphologie d'une phase à l'autre,

Pour représenter les transferts et leurs conséquences morphologiques, (principalement ici évolution des surfaces de départ ou de dépôt et de la rugosité), il faut adopter des hypothèses géométriques simplificatrices quant à la forme de la surface. Divers cas de figure sont envisageables. N'ayant guère les moyens de les choisir d'après l'observation directe, nous nous bornerons à l'un d'entre eux particulièrement simplifié. Le but de cette démarche n'est pas de simuler fidèlement l'évolution morphologique mais plutôt :

- d'inventorier les différents paramètres qui interviennent,
- d'identifier la forme sous laquelle ils doivent être pris en compte.

2.2.3. - Réduction des surfaces de départ et diminution de la rugosité

A/ - Modèle géométrique adopté, conséquences

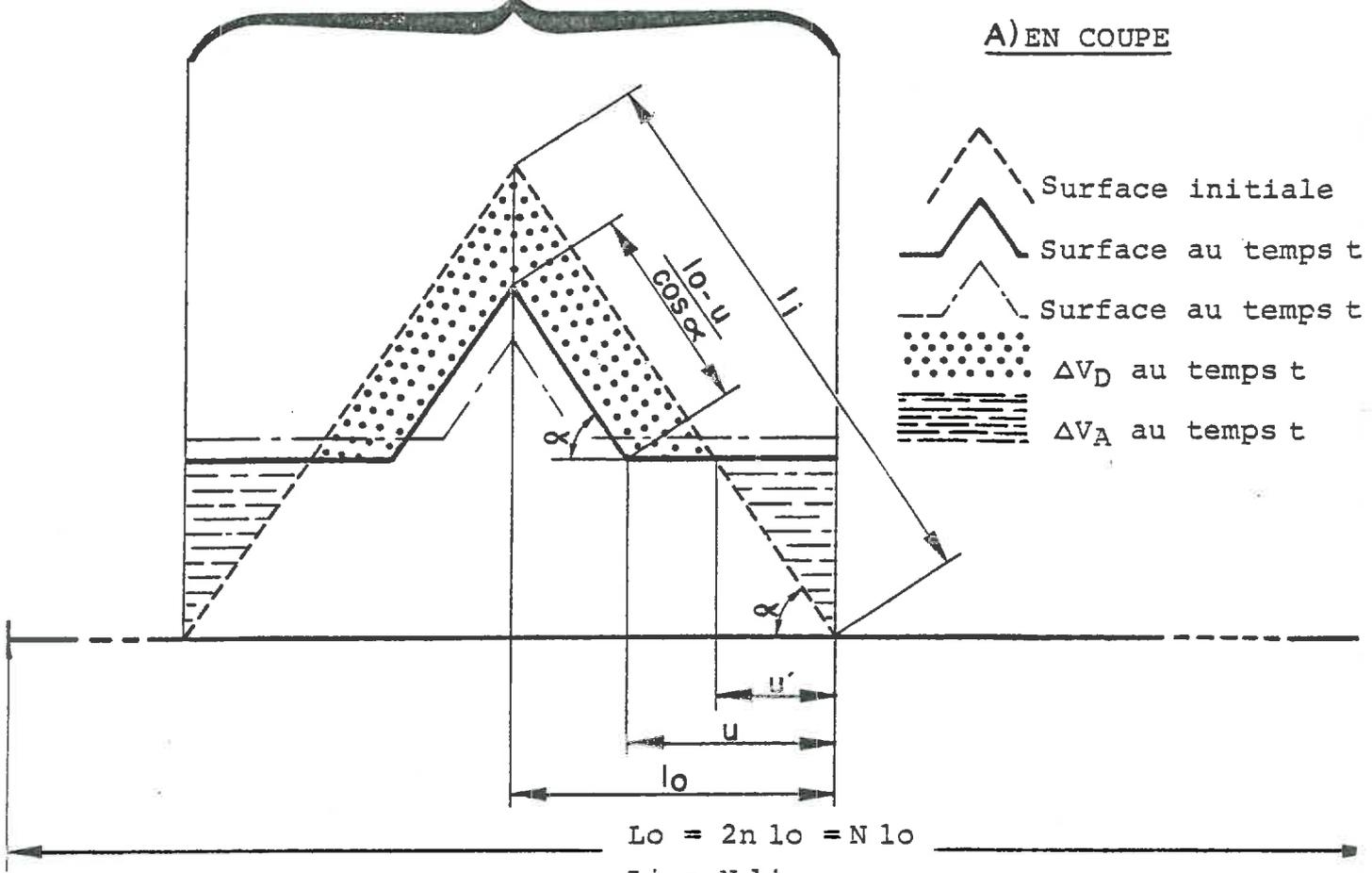
Considérons la surface du sol au début de la phase 2 comme la juxtaposition de pyramides solides à base carrée. Dans un plan de symétrie que nous supposons être celui du transect d'aspérimétrie⁽¹⁾, on obtient un motif de répétition schématisé sur la Fig. 37.

Supposons qu'un certain volume ΔV_0 de matériau soit transféré, au cours d'une séquence pluvieuse, d'une position haute en position basse, selon le schéma indiqué sur cette même figure ; conformément au modèle exposé précédemment (§ B 1) nous supposons que la terre éventuellement déplacée au sein des zones basses y est recyclée et donc n'a pas à être prise en considération.

(1) Le fait de supposer que l'aspérimètre passe systématiquement au sommet des pyramides revient à surestimer la rugosité.

MOTIF DE RÉPÉTITION

A) EN COUPE



- Surface initiale
- Surface au temps t
- ΔV_D au temps t
- ΔV_A au temps t

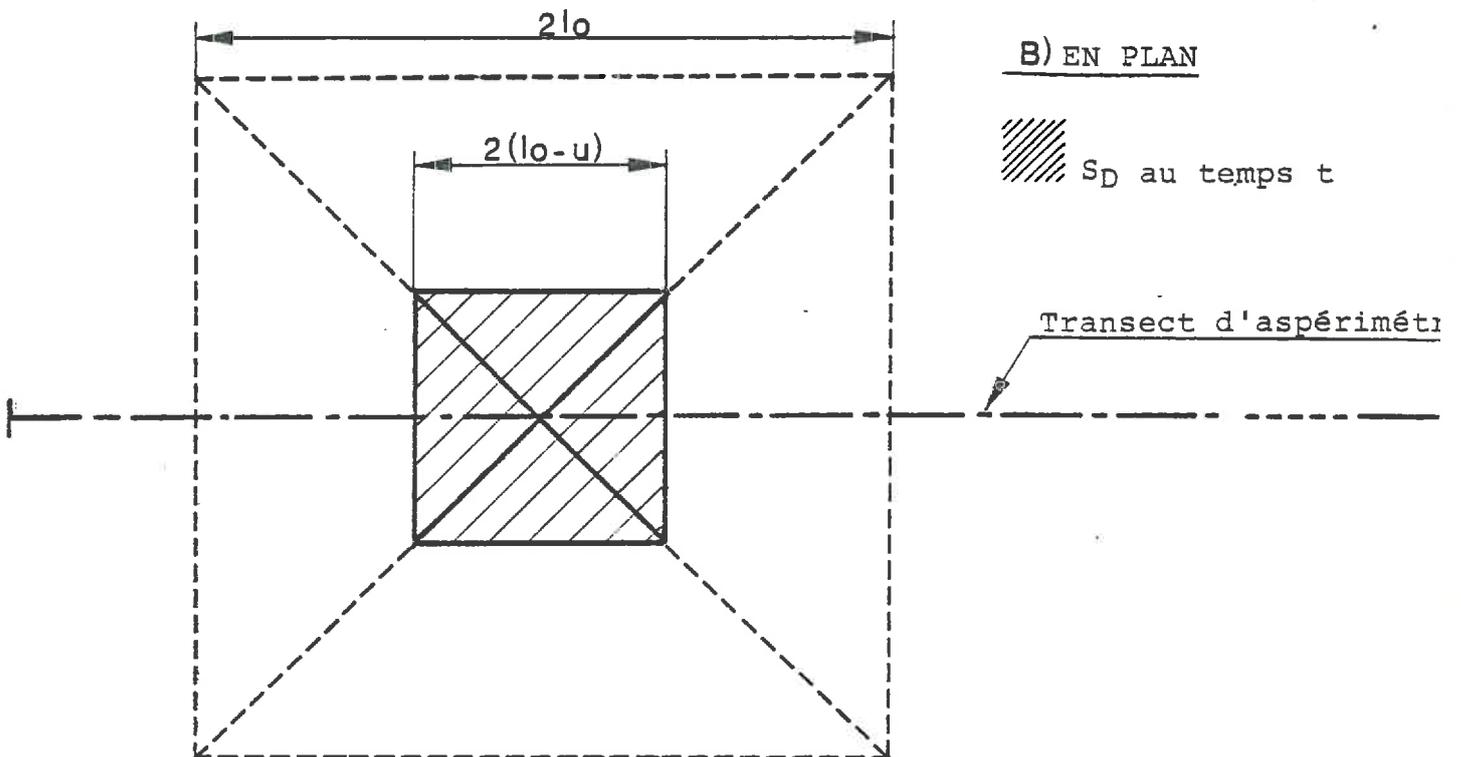
$$L_0 = 2n l_0 = N l_0$$

$$L_i = N l_i$$

$$L = N l$$

$$U = N u$$

B) EN PLAN



- S_D au temps t

Transect d'aspérimétri

FIG 37 : REPRÉSENTATION SCHEMATIQUE DE L'ÉVOLUTION MORPHOLOGIQUE AU COURS DE LA PHASE 2

Il résulte de ce transfert :

- une réduction du taux de recouvrement des zones de départ de terre (s_D), qui s'écrit selon les notations de la Fig. 37 :

$$s_D = \frac{(2l_0 - 2u)^2}{4 l_0^2} = \left(1 - \frac{u}{l_0}\right)^2$$

- une diminution de la longueur initiale l_i du relevé aspérimétrique jusqu'à une valeur l avec :

$$l = u + \frac{l_0 - u}{\cos \alpha}$$

$$\text{d'où : } I_r = \frac{l - l_0}{l_0} = \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1\right) \left(1 - \frac{u}{l_0}\right)$$

c'est-à-dire :

$$I_r = \left(\frac{1}{\cos \alpha} - 1\right) \cdot \sqrt{s_D}$$

et comme $\cos \alpha = \frac{l_0 - u_i^{(1)}}{l_i - u_i}$, nous pouvons écrire :

$$I_r = K_i \sqrt{s_D} \quad (\text{Rel. 6})$$

K_i étant un paramètre constant pour une même unité expérimentale, et dépendant de l'état de la surface au début de la phase 2, c'est-à-dire de la rugosité et de la surface de départ à ce moment.

B/ - Confrontation avec les résultats expérimentaux

Les taux de recouvrement s_D (en %) sont obtenus à partir des photographies de placettes prises au cours de la phase 2⁽²⁾. Les indices de rugosité (en %) sont obtenus par les relevés aspérimétriques réalisés aux mêmes dates ou intrapolés à

(1) Sur la Fig. 37, nous avons représenté $u_i = 0$ mais ce n'est pas obligatoire. Notons que si $u_i = 0$, $K_i = I_{r_i}$, indice de rugosité au début de la phase 2.

(2) Pour le site de Montluel, une partie seulement de ces photographies ont été dépouillées, correspondant essentiellement aux parcelles de colza.

FIG38 a: RELATION ENTRE INDICE DE RUGOSITÉ (IR) ET TAUX DE RECOUVREMENT DES ZONES DE DÉPART (SD) SUR LE SITE DE PALAISEAU.

- C (fin)
- ★ A (grossier)
- ⊕ valeurs ajustées

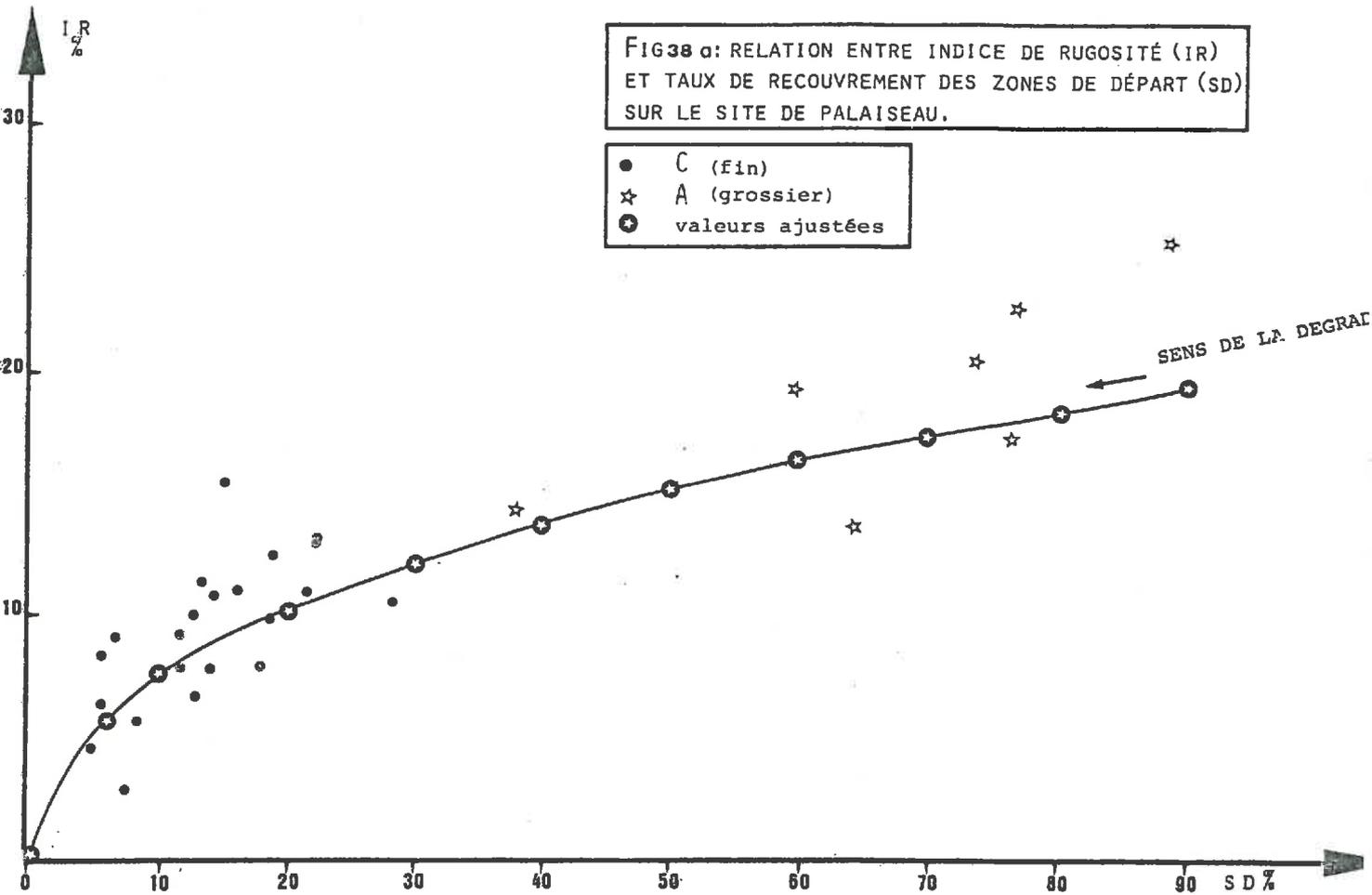
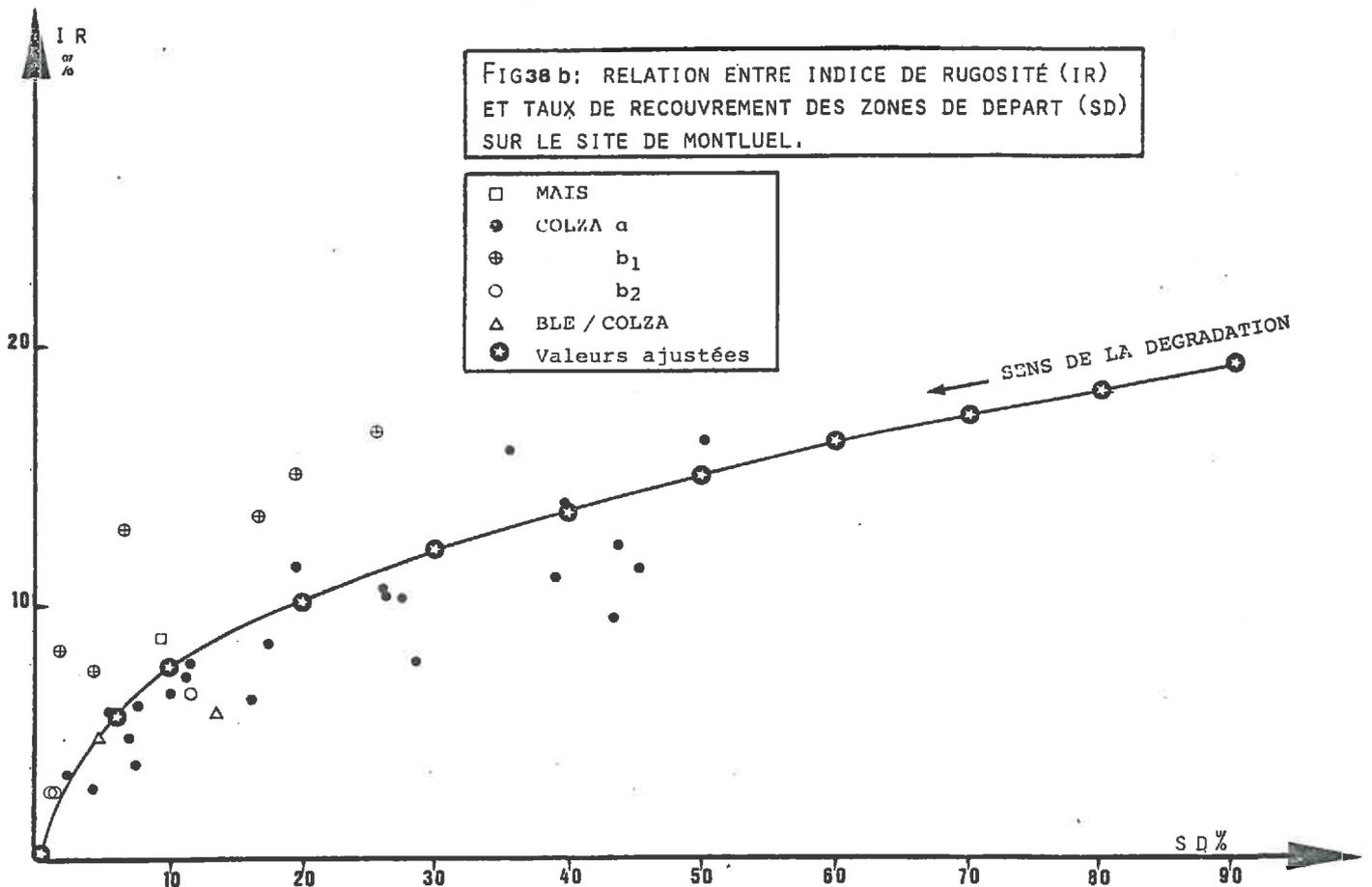


FIG38 b: RELATION ENTRE INDICE DE RUGOSITÉ (IR) ET TAUX DE RECOUVREMENT DES ZONES DE DÉPART (SD) SUR LE SITE DE MONTLUEL.

- MAIS
- COLZA a
- ⊕ b₁
- b₂
- △ BLE / COLZA
- ⊕ Valeurs ajustées



à l'aide des ajustements donnés en Annexe 3.2. Toutes dates d'observation et parcelles confondues (c'est-à-dire en mélangeant des variations synchroniques et diachroniques) on obtient les relations suivantes :

$$- \text{ Pour le site de Palaiseau : } I_r = 2,69 s_D^{0,463}$$

$$(r^2 = 0,71 \text{ pour } 36 \text{ résultats}).$$

$$- \text{ Pour le site de Montluel : } I_r = 3,03 s_D^{0,383}$$

$$(r^2 = 0,62 \text{ pour } 29 \text{ résultats}).$$

Pour l'ensemble des résultats (ajustement reporté sur les Fig. 38 a et) :

$$I_r = 2,87 s_D^{0,422} \quad (r^2 = 0,66 \text{ pour } 65 \text{ résultats}).$$

L'exposant est proche de 0,5 et la relation (6) n'est pas infirmée.

Par ailleurs, il n'est pas étonnant que subsiste une variance résiduelle non négligeable compte tenu :

- de la variabilité des états initiaux (c'est-à-dire des coefficients K_i de la relation précédente) ;
- du fait que les valeurs de s_D sont déterminées, non pas à partir du transect d'aspérimétrie, mais à partir de placettes de plus faible surface dont la représentativité est discutable en cours de phase 2.

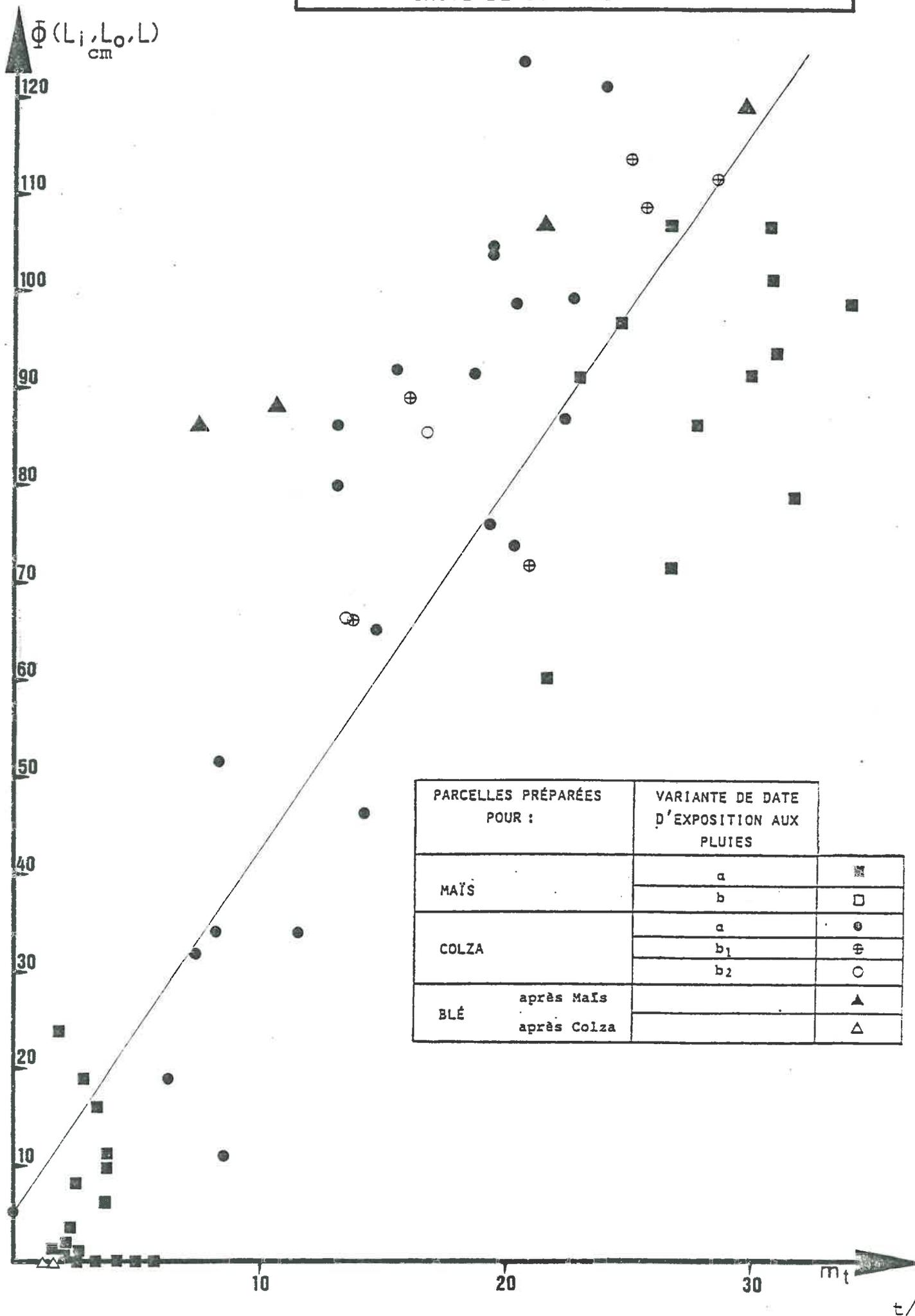
2.2.4. - Relation entre évolution morphologique et transfert de terre

A/ - Considérations géométriques

Considérons la surface d'une parcelle en début de phase 2 selon le même schéma que ci-dessus (Fig. 37) et avec les mêmes notations. Si une séquence pluvieuse survient, elle engendre le transfert d'une certaine masse de terre ΔM_T entre les zones de départ et d'accumulation. En considérant des portions de surface suffisamment étendues, admettons que cette masse de terre est sensiblement constante par unité de surface, soit $\Delta M_T \approx Cte$. Rappelons que la notation m_T correspond une variable cumulative (somme des Δm_T du début de la phase 2 jusqu'à une date donnée).

Au niveau du motif de répétition, ceci correspond à une diminution ΔV_D du volume des zones de départ et à un accroissement ΔV_A du volume des dépôts. En moyenne, et si

FIG 39. : RELATION ENTRE RUGOSITÉ (indice Φ) ET MASSE DE TERRE TRANSFÉRÉE PAR UNITÉ DE SURFACE.



Les densités apparentes des dépôts et du matériau agrégé sont peu différentes (et voisines de la densité texturale γ_t), on a, avec les notations de la Fig.37

$$\Delta V_A = \Delta V_B = \Delta V = 4 L_0^2 \Delta m_T \cdot \frac{1}{\gamma_t} = \frac{4 L_0^2}{N^2} \Delta m_T \cdot \frac{1}{\gamma_t}$$

Selon le schéma géométrique adopté, on peut aussi exprimer V_A et V_D en fonction de u et u' , éliminer u' grâce à l'égalité $V_A = V_D$, exprimer u en fonction de Δv puis m_T et enfin à partir des relations précédemment indiquées entre s_D et I_r et u aboutir à des expressions :

$$S_D = F (L_0, \alpha, L_i, N, m_T)$$

$$I_r = G (L_0, \alpha, L_i, N, m_T)$$

Pour vérifier que l'évolution morphologique s'apparente effectivement à ce schéma, il faudrait expliciter les fonctions F et G . Celles-ci sont relativement complexes du fait que le volume décapé et le volume déposé n'ont pas exactement la même forme (d'où la nécessité de paramètres intermédiaires u et u' et d'un système d'équations de degré 3). Plutôt que de développer cette démarche, nous nous bornerons à une approche en partie empirique. Celle-ci consiste à supposer l'existence d'une relation de forme simple entre la masse de terre réellement transférée m_T et la diminution de la masse de terre contenue dans la partie exhaussée des mottes qui constitue en quelque sorte une masse de terre potentiellement transférable (soit m_{pT}). En effet, on peut aisément établir la relation entre m_{pT} et les caractéristiques aspérimétriques :

$$m_{pT} = \gamma_t \frac{\text{tg } \alpha}{3 N L_0^2} (L_0 - U)^3$$

En explicitant U et $\text{tg } \alpha$ (1), on obtient :

$$m_{pT} = \frac{\gamma_t}{3 N} \sqrt{L_i^2 - L_0^2} \left(\frac{L - L_0}{L_i - L_0} \right)^3$$

La diminution de m_{pT} depuis le début de la phase 2 s'écrit :

$$m_{pTi} - m_{pT} = \frac{\gamma_t}{3 N} \sqrt{L_i^2 - L_0^2} \left[1 - \left(\frac{L - L_0}{L_i - L_0} \right)^3 \right] = C \phi (L_0, L_i, L)$$

Cette fonction ϕ nous indique comment il faut combiner et exprimer les données issues des relevés aspérimétriques pour obtenir un indice compatible avec les masses de terre transférées m_T . Un tel indice doit donc permettre de dégager des relations générales, à cette réserve près que le coefficient C est inconnu puisqu'il dépend de N et n'est pas forcément identique d'une parcelle à l'autre.

(1) Pour simplifier les calculs, on suppose, dans ce cas, comme indiqué sur la Fig. 37, que $u_i = 0$

B/ - Confrontation avec les données expérimentales

Les observations réalisées permettent d'étudier la relation entre m_T et le terme Φ . En effet :

- comme précédemment indiqué et sous les mêmes conditions (Cf. § 1.3.2.) les relevés de jalons gradués fournissent une estimation directe de m_T à différentes dates pour une même parcelle ;
- les relevés aspérimétriques fournissent les valeurs de L_i et L correspondant à la date d'installation et à chaque date de relevé des jalons, ce qui permet de calculer le terme Φ .

On obtient ainsi le graphique de la Fig. 39, où sont reportées les valeurs de Φ en fonction de m_T ; un calcul d'ajustement linéaire donne le résultat suivant (avec Φ en cm et m_T en T/Ha), toutes parcelles et dates d'observation confondues (66 résultats) :

$$\Phi = 4,8 + 3,74 m_T \quad (r^2 = 0,773)$$

Cette relation résulte essentiellement de la croissance simultanée dans le temps de Φ et m_T . Le crédit qu'on peut lui accorder tient surtout au fait que pour différentes dates d'exposition aux pluies, différentes parcelles et différents stades de dégradation, les rapports entre Φ et m_T sont du même ordre de grandeur. Il n'en reste pas moins que la variabilité résiduelle autour de cette tendance est en partie liée au groupe de parcelles considéré : les points les plus écartés correspondent à des parcelles de type Blé. Comme ces groupes de parcelles se différencient notamment par l'état initial (ainsi les parcelles de Blé sont motteuses contrairement aux parcelles de Maïs), on peut penser que ce facteur n'a pas été totalement pris en charge dans le calcul de Φ et que le coefficient C de la relation $m_T = C\Phi$ est systématiquement différent d'un type d'état initial à l'autre.

Quoiqu'il en soit, la relation observée entre les variables Φ et m_T , bien qu'assez lâche, n'infirme pas les considérations géométriques précédemment exposées et autorise à le conserver comme première base d'interprétation.

S'ajoutant à la relation observée entre surface de départ et indice de rugosité, ce résultat est une deuxième confirmation du fait que l'évolution morphologique de la surface du sol au cours de la phase 2 peut s'interpréter à partir de lois géométriques qui régissent les transferts de volumes des parties hautes vers les parties basses du microrelief.

Il est clair qu'une modélisation fine de l'évolution morphologique pendant la phase 2 (ce qui n'était pas notre objet ici) nécessiterait la prise en compte de schémas géométriques moins sommaires que celui sur lequel nous nous sommes appuyés ici.

3 - LA REORGANISATION VERTICALE DES COUCHES SUPERFICIELLES

3.1. - CONSIDERATIONS GENERALES

A/ - Causes de diminution du volume apparent

Nous avons précédemment établi (BOIFFIN, SEBILLOTTE, 1976), que la pluie engendre une diminution du volume apparent du sol étroitement corrélée à la hauteur reçue. Ceci est confirmé par les résultats obtenus tant à Palaiseau qu'à Montluel (Cf. 1ère partie, § 1.2.1.), qui montrent par ailleurs (Fig. 4), que des parcelles de stabilité structurale très voisine présentent des diminutions de volume apparent d'ampleur et de vitesse assez variables.

Pour expliquer cette augmentation de compacité et sa variabilité, on peut invoquer :

- des processus de division des fragments (par désagrégation ou fissuration), susceptibles d'engendrer un réarrangement grâce à l'effondrement de certains points d'appui et au comblement des interstices par les particules fines issues de cette division, même si les observations morphologiques ne permettent pas de déceler de signes de désagrégation poussée en deçà des 10 mm superficiels⁽¹⁾. Les conditions d'humectation de ces couches "internes" sont d'ailleurs moins favorables à la désagrégation qu'en surface puisque l'imbibition est moins brutale et que l'effet d'agitation des gouttes disparaît.
- des processus de tassement proprement dit. A première vue, l'effet de la pluie présente une certaine analogie avec le compactage dynamique. Dans le test Proctor standard, au cours duquel une charge tombe à plusieurs reprises sur une éprouvette de sol, l'énergie cinétique totale E_p appliquée à l'échantillon est de 590 kilojoules / m^3 de terre, soit $0,59 J/cm^3$. Si on assimile la pluie à une multitude d'impacts qui, directement ou après rejaillissement, transmettent au sol leur énergie cinétique, on peut évaluer à plusieurs milliers de joules/ m^2 la quantité d'énergie reçue par celui-ci au cours d'une campagne culturale. Prenons par exemple 6 000 joules/ m^2 ; si cette énergie est absorbée sur, respectivement

(1) Cf. 1ère partie, § 1.2.1 et 1.2.2. : même dans les conditions les plus propices à la présence d'eau libre (parcelles de type 6 à Palaiseau), nous observons en fin d'expérience une structure à tendance fragmentaire: les fragments sont soudés mais peuvent encore être individualisés (Cf. cliché IX f)

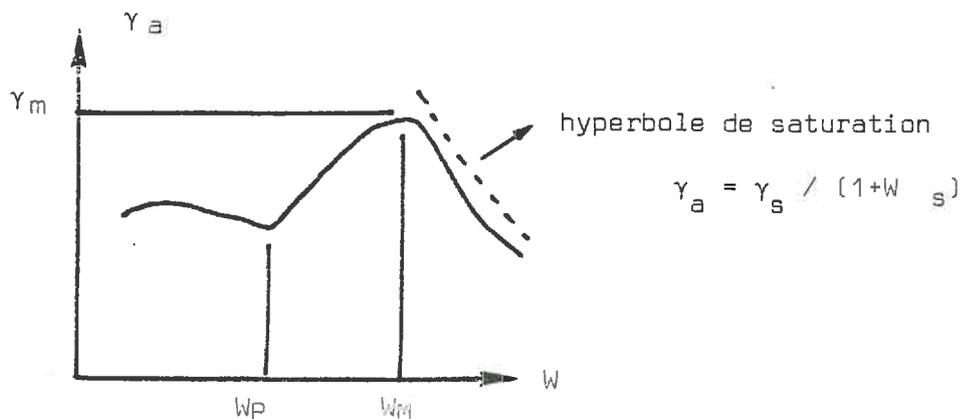
1, 10 ou 100 millimètres d'épaisseur, ceci représente δ ; $0,6$; $0,06 \text{ J/cm}^3$ c'est-à-dire $10 E_p$; E_p ; $\frac{E_p}{10}$. Il n'est pas surprenant que l'on puisse observer une réduction sensible du volume apparent.

Cette analogie comporte des limites évidentes : d'une part l'énergie des pluies est appliquée de manière extrêmement fracti-
née ce qui, en principe réduit considérablement son efficacité (SOWERS et KENNEDY, 1954, cités par FAURE, 1978). D'autre part dans un milieu agrégé une fraction indéterminée de l'énergie des pluies est utilisée pour détacher les particules. On peut donc s'attendre à une augmentation de compacité :

- globalement moins importante que sous l'effet des tests conventionnels avec des niveaux d'énergie comparables ;
- répartie de manière hétérogène verticalement et plus importante en surface.

B/ - Facteurs de variation des augmentations de compacité

Si on se réfère aux phénomènes de tassement, le premier d'entre eux est la teneur en eau du matériau. Pour un matériau donné soumis à une pression ou une énergie données, la densité γ_a atteinte à de faibles humidités est faible et peu variable. A delà d'un certain seuil W_p la densité finale augmente sensiblement avec la teneur en eau jusqu'à un maximum γ_m correspondant à une valeur W_M , à laquelle le sol est pratiquement saturé, puis elle décroît en suivant l'hyperbole de saturation.



Les valeurs de W_p , W_M , γ_M dépendent :

- de la teneur en argile et en matière organique libre et liée (FAURE, 1978 ; GUERIF et FAURE, 1979 ; GUERIF, 1979 ; METTAUER et al., 1983) ;
- de l'énergie de compactage : lorsque celle-ci diminue W_p et W_M augmentent, γ_M diminue.

GUERIF (1982) a précisé l'analyse du phénomène en soumettant des échantillons agrégés à une compression statique en cellule oedométrique et en étudiant les variations de l'indice des vides structural. Cet auteur met en évidence trois domaines de teneur en eau correspondant à des modalités de tassement différentes : réarrangement des fragments sans déformation ni rupture aux faibles humidités, puis réarrangement avec ruptures et diminution de l'angle de frottement inter-agrégats, et enfin réarrangement avec déformation à partir d'un seuil d'entrée en plasticité. A partir d'une certaine humidité, le massif est saturé et se trouve à son maximum de compacité.

La pluie est donc à la fois un agent de compactage et un agent de sensibilisation au compactage. Ignorant les énergies de compactage et les niveaux de contraintes réellement subies par les différentes couches de profil, nous ne sommes pas en mesure de situer les humidités observées par rapport à des limites d'entrée en plasticité. Toutefois, nous disposons pour le même sol (celui de Montluel) de séries de résultats obtenues en conditions d'humidité assez contrastées (automne-hiver 82-83 contre printemps 82).

C/ - Evolution du volume apparent dans le cas du sol en place, signification des variations de cote

Les variations de cote de la surface traduisent la réaction d'un système complexe aux perturbations que constituent les pluies. En effet, supposons que le sol soit constitué de n couches d'épaisseur d_k pour la k ème couche. La variation totale Δh de la cote de surface, résultat de l'augmentation des densités apparentes γ_k de chacune des couches, s'écrira (les indices i et f correspondant respectivement à l'état initial et final) :

$$\Delta h = h_{ik} - h_{fk} = \sum_k (d_{ik} - d_{fk})$$

$$\text{Or : } \frac{d_{fk}}{d_{ik}} = \frac{\gamma_{ik}}{\gamma_{fk}} \quad (\text{Rel. 7})$$

$$\text{d'où : } \boxed{\Delta h = \sum_k d_{ik} \left(1 - \frac{\gamma_{ik}}{\gamma_{fk}}\right)} \quad (\text{Rel. 8})$$

Cette relation exprime le fait que la variation globale du volume du sol dépend :

- de l'épaisseur initiale des horizons concernés ;
- de la manière dont se répartissent verticalement les augmentations de compacité.

Sur ce dernier point, en dehors de certains résultats relatifs au tassement par les pneumatiques (DURAN 1982 (1), GUERIF, 1984, très peu de références sont disponibles. Elles conduisent à supposer que pour une contrainte donnée, les augmentations de compacité sont d'autant plus importantes que l'état initial est moins compact. Ainsi, la rencontre d'un horizon massif dans un profil permet-elle de repérer la limite inférieure probable des déformations. Les observations morphologiques (1ère partie, Tableau 5), suggèrent que cette limite se situe :

- soit à la base de l'horizon H₁ ameubli par les faibles superficielles (cas du dispositif de Palaiseau) ;
- soit à la base de la couche labourée (cas du dispositif de Montluel, pour les parcelles observées au printemps).

Pour les parcelles du dispositif de Montluel observées l'automne (types Colza et Blé), la limite entre les horizons H₁ et H₂ sous-jacent (horizon labouré non repris) est repérable mais ce dernier n'est pas massif au départ.

Dans un premier temps, nous examinerons les données expérimentales relatives aux densités apparentes et aux variations de cote de la surface ce qui nous permettra de caractériser la répartition des augmentations de compacité dans le profil. Nous serons alors en mesure d'évaluer, conformément aux indications du § 2.2.3. (1ère partie), l'indice des vides structural et son évolution.

3.2. - RESULTATS ET DISCUSSION

3.2.1. - Répartition dans le profil des augmentations de compacité, conséquences pour le volume apparent des couches superficielles

A/ - Mesures de densités

Il s'agit :

- d'une part, de mesures in situ réalisées à l'aide de la sonde à atténuation γ à différentes profondeurs

(1) Cité par CHEVERRY, 1983

TABLEAU. 39 .- DENSITES DES FRAGMENTS DE CROUTES.

SITE	DENSITE TEXTURALE SECHE		MESURES SUR FRAGMENTS DE CROUTES			
	calculée (1)	mesurée sur agglomérats	DATE DE PRELEVEMENT	HAUTEUR DE PLUIE DEPUIS L'EXPOSITION DE LA PARCELLE (mm)	CROUTES NON STRATIFIEES (2) (microhorizon m ²)	CROUTES STRATIFIEES (2) (microhorizon m ²)
PALAISEAU	1,72	1,747 0,034 (6)	30.06.81	165	1,672 0,019 (6)	inexistantes
			23.01.82	221	1,742 0,055 (2)	1,669 0,017 (4)
MONTLUEL	1,63	1,585 0,048 (8)	11.11.82 sous blé	35	1,424 0,084 (4)	inexistantes
			7.05.82 sous maïs	46	1,428 0,026 (2)	inexistantes
			27.05.82 sous maïs	64	1,407 (1)	inexistantes
			4.07.82 sous maïs	177		1,450 0,039 (12)
			14.10.82 sous colza	164	1,573 0,005 (2)	1,515 0,001 (2)
			9.04.81 sous blé	276	1,602 0,034 (4)	1,511 0,033 (4)

(1) D'après les relations statistiques obtenues par FIES et STENGEL, 1981.

(2) ligne supérieure : moyenne
ligne inférieure : écart type, et nombre de résultats entre parenthèses.

TABLEAU. 40.- COHERENCE DES VARIATIONS DE DENSITE ET DE COTE DE SURFACE.

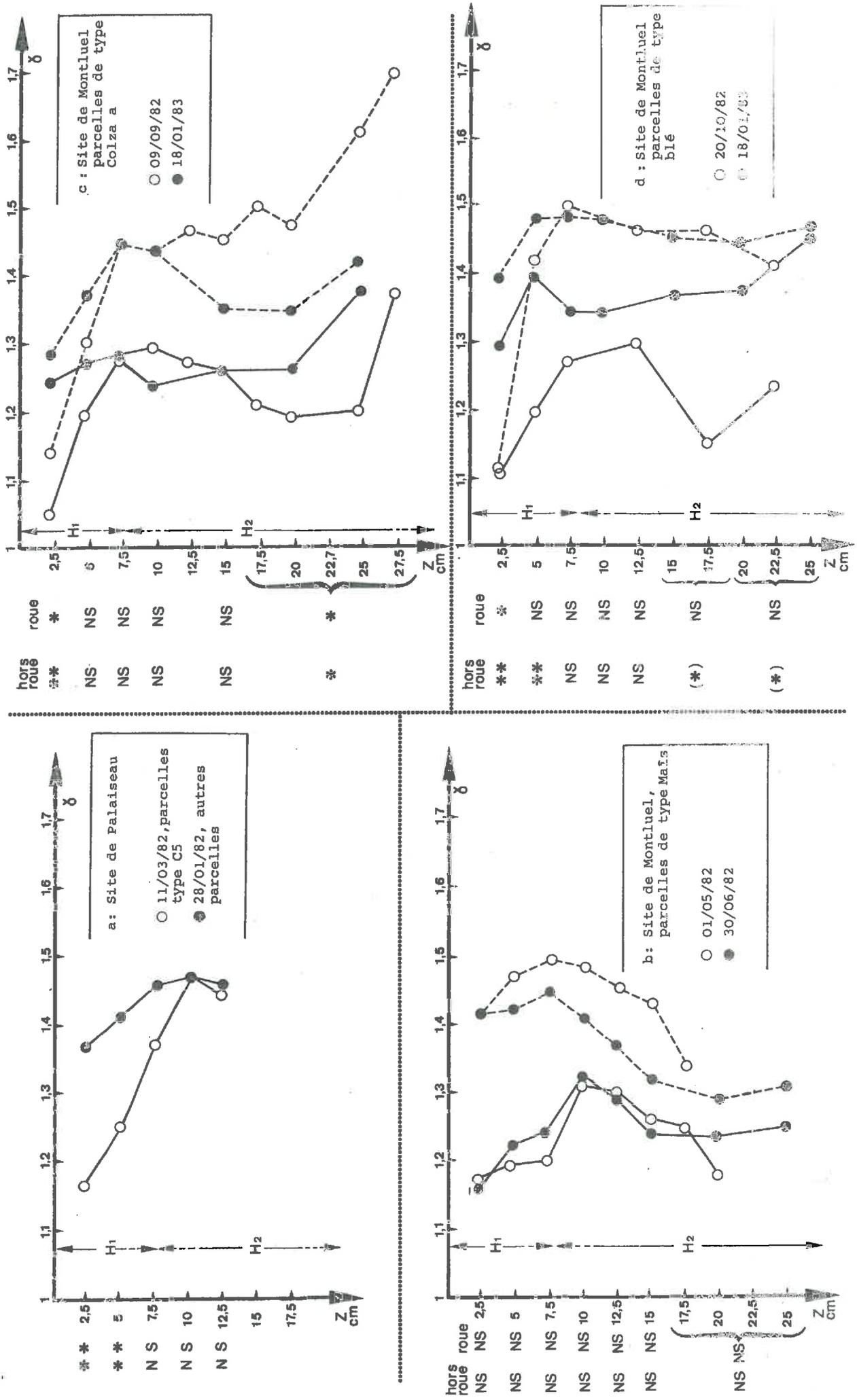
GRUPE DE PARCELLES	RAPPORT DES DENSITES MOYENNES (6/2)	RAPPORT DES EPAISSEURS (2/6)	LIMITE INFERIEURE SUPPOSEE DU TASSEMENT
PALAISEAU (1)	1,16	1,18	Base de H ₁ (Fonds des façons superficielles)
MONTLUEL Maïs	1,00	1,03	Base de H ₂ (Fond de labour)
MONTLUEL Colza	1,05	1,11	
MONTLUEL Blé	1,11	1,11	

(1) Dans ce cas, les densités et épaisseurs prises en compte pour calculer les rapports ne sont pas initiales et finales, mais correspondent aux dates de mesure de la Fig.40 a .

FIG 40 : PROFILS DE DENSITE AU CHAMP

- densité en début de dégradation
- densité en fin de dégradation
- profils hors roue
- - - profils sous trace de roue

- ** $\leq 0,01$
- * $\leq 0,05$
- (*) $\leq 0,10$
- NS > 0,10



pour 2 ou 3 profils par parcelle. Toutes les parcelles n'ont pu faire l'objet de mesures et généralement on ne dispose pas de plus d'une date de mesure par parcelle scrutée ; cependant les séances ont été réparties soit au début, soit à la fin de la période d'observation et on peut donc comparer des états moyens initiaux et finaux.

- d'autre part, de déterminations portant sur des fragments de croûtes superficielles, obtenues par volumétrie au pétrole (MONNIER et al., 1973 ; FIES et STENGEL, 1981 a). Ces mesures n'ont pas été réalisées systématiquement sur chaque parcelle, mais à différentes dates et sur différents microsites de façon à caractériser les deux grands types de microhorizons superficiels m_2 (croûte "structurale") et m_3 (croûte stratifiée avec ségrégation des constituants granulométriques) précédemment inventoriés.

Les résultats des mesures sur fragments de croûtes figurent dans le Tableau 39. On note que :

- les densités mesurées sur des agglomérats de 3 à 5 mm (densité dite texturale) sont très voisines de celles prévues d'après la constitution granulométrique selon les relations statistiques établies par FIES et STENGEL (1981 b) ;
- la densité des fragments extraits de microhorizons m_2 présente une allure croissante lorsque la quantité de pluie reçu par le sol augmente ; elle se rapproche ainsi de la densité texturale (différence non significative en moyenne⁽¹⁾) ;
- les fragments extraits de microhorizons m_3 présentent une densité légèrement mais significativement⁽¹⁾ inférieure à la densité texturale.

Les résultats correspondant aux profils de densité in situ sont reportés sur les Fig. 40 a à d, où sont distingués les différents groupes de parcelles étudiées. En comparant dans chaque cas les profils moyens obtenus au début et à la fin de la dégradation, on note :

- pour le site de Palaiseau, une augmentation sensible de la densité de l'horizon H_1 , alors que celle de l'horizon H_2 beaucoup plus compact au départ ne varie pas en moyenne ;
- pour le site de Montluel (campagne de printemps), une variation pratiquement insensible de la densité apparente. Compte tenu de la diminution faible mais indiscutable du volume apparent constatée d'après le relevé aspérimétrique, nous admettons donc que l'augmentation de compacité est alors répartie de manière diffuse dans l'ensemble du profil ;

(1) Cf. Annexe 19.

- Pour le site de Montluel (campagne d'automne), une évolution tout à fait identique à celle notée à Palaiseau pour les profils situés au niveau des traces de roues⁽¹⁾. Par contre, hors de ces traces, une certaine augmentation de compacité se manifeste au sein de l'horizon H₂, notamment pour les niveaux les plus profonds. Cette augmentation est plus marquée pour les parcelles de type Blé.

Si nous négligeons le tassement plus accentué de la mince couche immédiatement superficielle⁽²⁾, nous pouvons donc considérer que :

- les profils observés à Palaiseau et Montluel au printemps sont constitués d'une seule couche déformable limitée respectivement par le sommet de H₂ et le fond de lat
- les profils observés à Montluel au cours de l'automne sont constitués de 2 couches déformables (H₁ et H₂).

B/ - Variations de cote : cohérence globale avec celles des densités apparentes

Si les limites des horizons qui subissent la prise en masse sont correctement repérées, on doit avoir pour chacun d'eux, avec les notations précédentes :

$$\frac{df_k}{d_{ik}} = \frac{\gamma_{ik}}{\gamma_{fk}}$$

En calculant pour chaque profil une densité moyenne $\bar{\gamma}$, on doit avoir :

$$\frac{\sum_k df_k}{\sum_k d_{ik}} = \frac{\bar{\gamma}_i}{\bar{\gamma}_k}$$

Ces rapports, calculés en moyenne pour chaque groupe de parcelles figurent dans le Tableau 40. On voit qu'il y a une cohérence d'ensemble satisfaisante entre les deux types de données, ce qui signifie que, en moyenne, les limites inférieures de déformation sont bien celles qui étaient prévues.

(1) Sur les Fig. 40 b, c ; on note que les densités finales en profondeur semblent plus faibles que les densités initiales ce qui est surprenant. En fait, les profils sous roue sont établis à partir de points 2 fois moins nombreux que hors-roue alors que les valeurs de densité en profondeur y sont très hétérogènes.

(2) Il n'a qu'une incidence minime et à première vue assez uniforme d'une parcelle à l'autre, sur la variation de cote. L'erreur absolue commise en négligeant le tassement plus accentué de la croûte superficielle est de l'ordre de 0,5 mm sur la cote moyenne.

C/ - Variations entre parcelles de la diminution du volume apparent

D'une parcelle à l'autre, au sein de chaque site et période d'observation, la diminution totale de cote présente une certaine variabilité. D'après la relation 8, une partie de cette variabilité doit être liée à celle de l'épaisseur des horizons initialement meubles (termes d_{ik}).

Nous avons cherché à tester cette hypothèse dans le cas des deux groupes de données pour lesquelles les mesures de d ont été suffisamment précises au niveau de chaque parcelle, c'est-à-dire :

- les données provenant du site de Palaiseau. Dans ce cas, le profil étant supposé assimilable à une monocouche, la relation 8 ne comporte, a priori, qu'un seul terme. La Fig. 41 montre que la relation attendue est bien obtenue. La position particulière de certains points est tout à fait conforme à l'interprétation générale : pour la parcelle II C5, les valeurs h sont inférieures à celles que l'on peut attendre pour des valeurs d_i correspondantes. Or, cette parcelle a été exposée plus tardivement que les autres. Inversement, la parcelle II A0 subit une diminution de volume apparent beaucoup plus importante que prévu d'après d_i . Or, les observations morphologiques montrent que, dans ce cas, la discontinuité entre H_1 et H_2 est peu marquée, ce dernier étant nettement moins compact qu'au sein des autres parcelles. Le schéma de monocouche ne s'applique plus pour cette parcelle, et un terme supplémentaire correspondant au tassement des couches sous-jacentes serait à prendre en considération.
- Les données provenant de la campagne d'automne sur le site de Montluel. Dans ce cas, le profil est supposé assimilé à une bicouche et les valeurs de h doivent être mises en relation avec deux paramètres explicatifs : d_{i1} et d_{i2} , épaisseurs initiales des horizons H_1 et H_2 . En tenant compte seulement de d_{i1} on obtient :

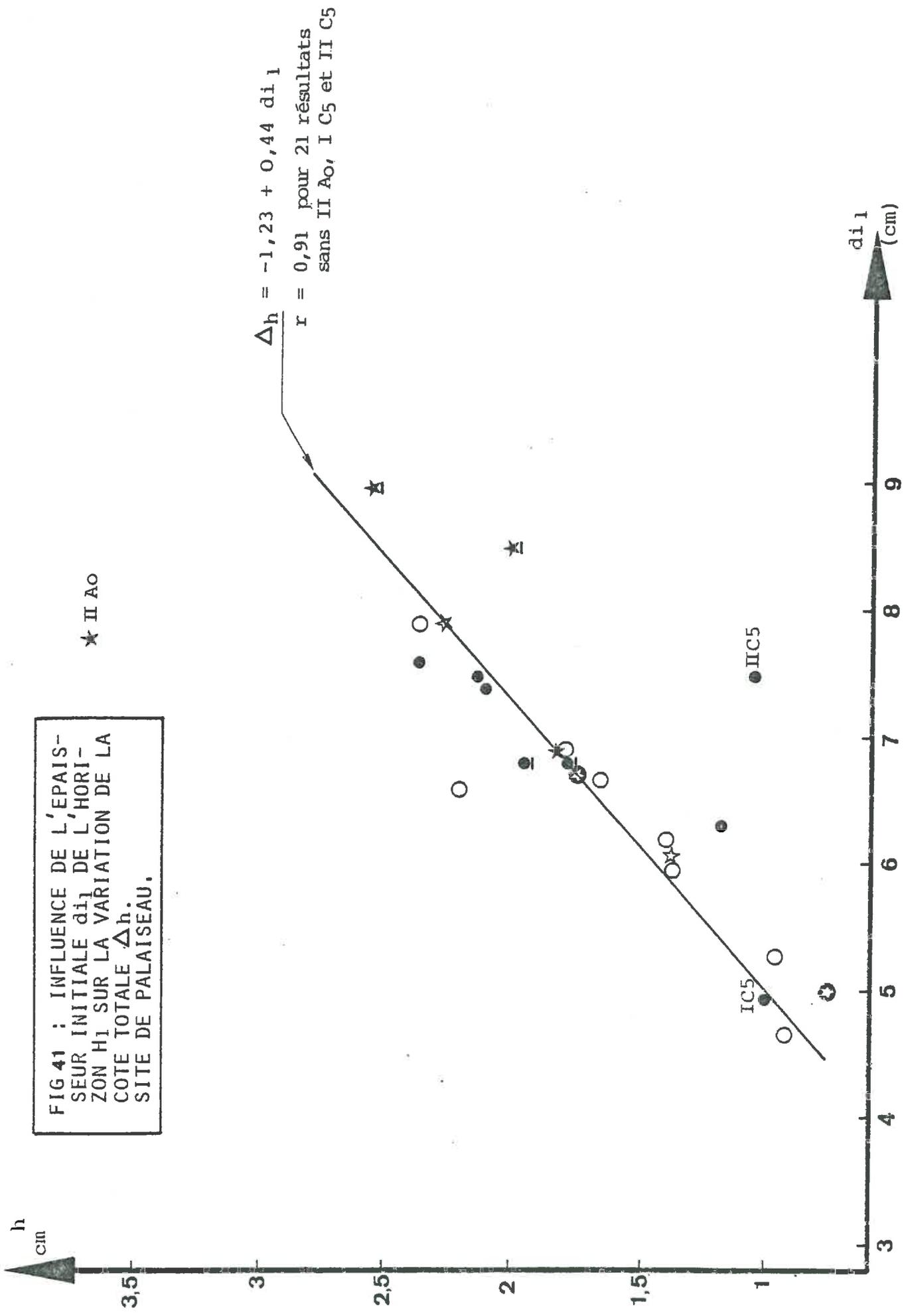
$$\Delta h = 1,00 + 0,21 d_{i1} \quad (r = 0,39 \text{ pour } 14 \text{ couples})$$

Par contre, en tenant compte des deux variables, on a :

$$\Delta h = - 4,95 + 0,37 d_{i1} + 0,23 d_{i2} \quad (r = 0,60)$$

Le schéma de bi-couche est donc plausible. Il n'est d'ailleurs pas étonnant que subsiste une variabilité résiduelle non négligeable puisque nous intégrons

FIG 41 : INFLUENCE DE L'ÉPAIS-
SEUR INITIALE d_{i1} DE L'HORI-
ZON H_1 SUR LA VARIATION DE LA
COTE TOTALE Δh .
SITE DE PALAISEAU.



dans ce groupe de données des parcelles qui ont atteint des densités finales assez différentes. Si nous tenons compte de cette information supplémentaire en formant la variable $x_k = d_{ik} (1 - Y_{ik}/Y_{fk})^{(1)}$, nous obtenons :

$$\Delta h = - 0,88 + 3,17 x_1 + 0,45 x_2 \quad (r = 0,79)$$

Cette relation confirme la cohérence générale des relevés aspérimétriques et des mesures de densité ; et le fait que l'épaisseur initiale des horizons meubles susceptibles de se tasser est bien le premier facteur de variation de la diminution du volume apparent.

3.2.2. - Variations de l'indice des vides structural au cours de la dégradation

A/ - Remarques préalables

Cet indice (notés e_s) est donné par la relation 5 (Cf. 1ère partie, § 2.2.3.). Les résultats ne sont qu'indicatifs, car ils intègrent différentes hypothèses et incertitudes dont l'effet est très sensible sur le calcul :

- affectation de valeurs de densité moyenne ou extrapolée aux parcelles n'ayant pas fait l'objet de mesures ;
- hétérogénéité importante des mesures de densité ;
- incertitude sur la répartition exacte des augmentations de compacité dans le profil, particulièrement dans le cas d'une bi-couche meuble (données de la campagne d'automne à Montluel). On a alors admis que la répartition entre les couches des diminutions de volume apparent était constamment identique à la répartition finale, celle-ci pouvant être déduite des variations de densité apparente de chaque horizon d'après la relation 7. Les proportions des variations de cote attribuées respectivement aux horizons H_1 et H_2 ont été de :
 - . 50 et 50 % pour les profils sous colza,
 - . 30 et 70 % pour les profils sous blé ; les augmentations de compacité étant, dans ce cas (Fig. 39 c et d) mieux réparties en profondeur.

Il faut aussi souligner que les valeur calculées constituent un indice moyen intégrant des hétérogénéités latérales. Certaines d'entre elles sont systématiques (traces

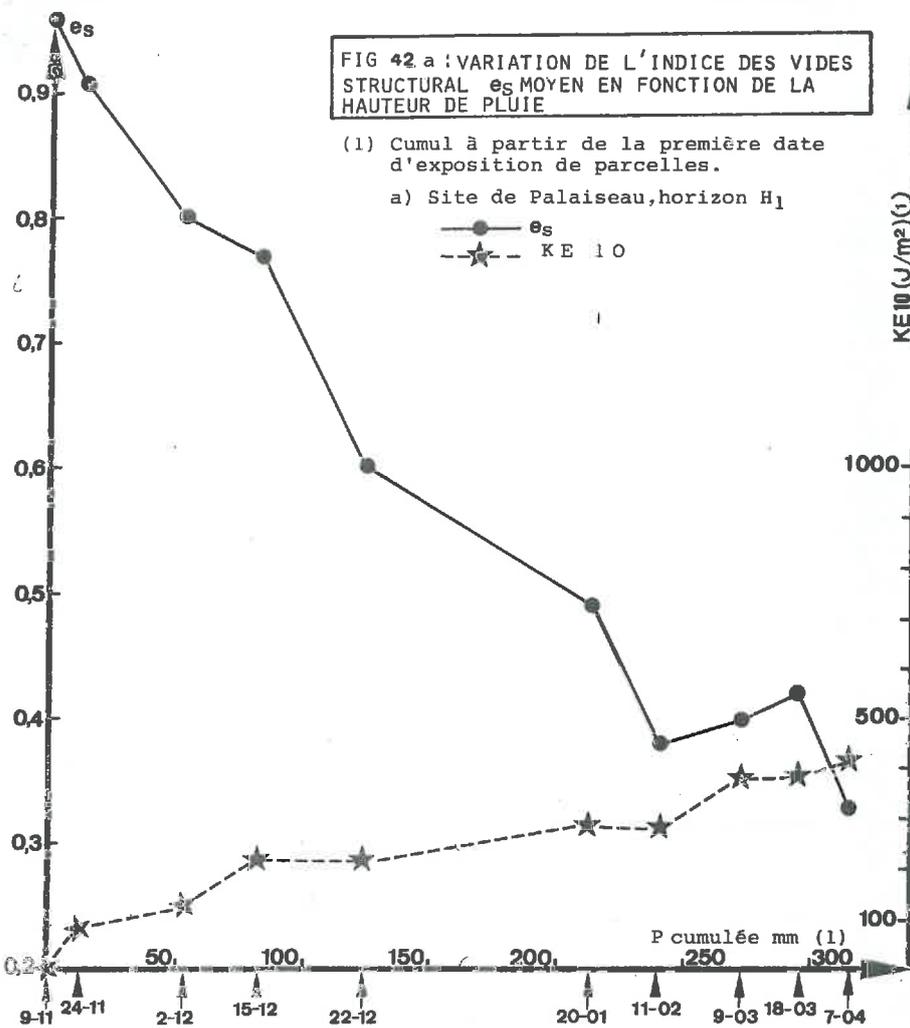
(1) Les rapports Y_{ik}/Y_{fk} étant estimés en moyenne pour chaque groupe de parcelles correspondant à une date d'exposition.

FIG 42 a : VARIATION DE L'INDICE DES VIDES STRUCTURAL e_s MOYEN EN FONCTION DE LA HAUTEUR DE PLUIE

(1) Cumul à partir de la première date d'exposition de parcelles.

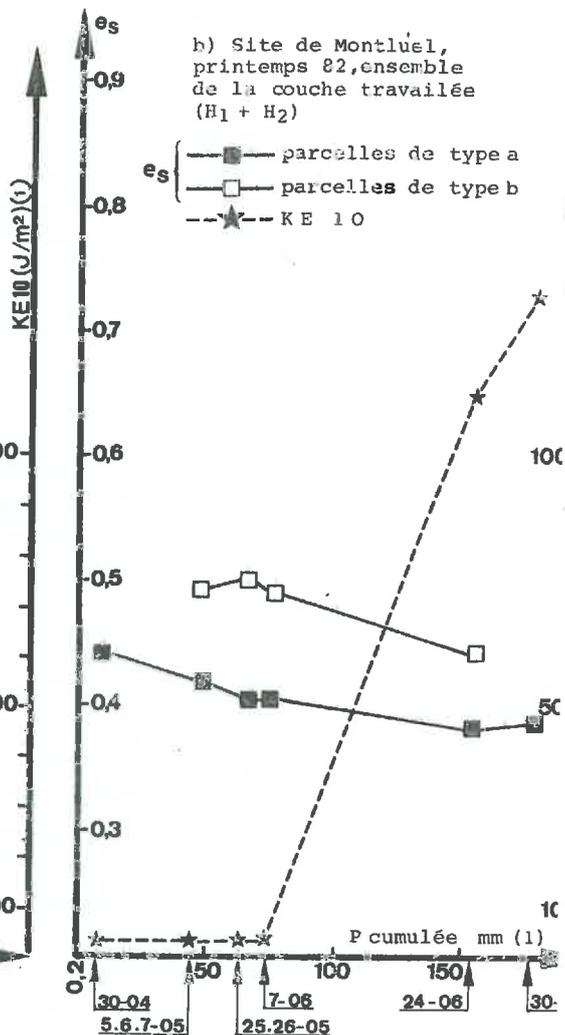
a) Site de Palaiseau, horizon H_1

e_s —●—
KE 10 —★—



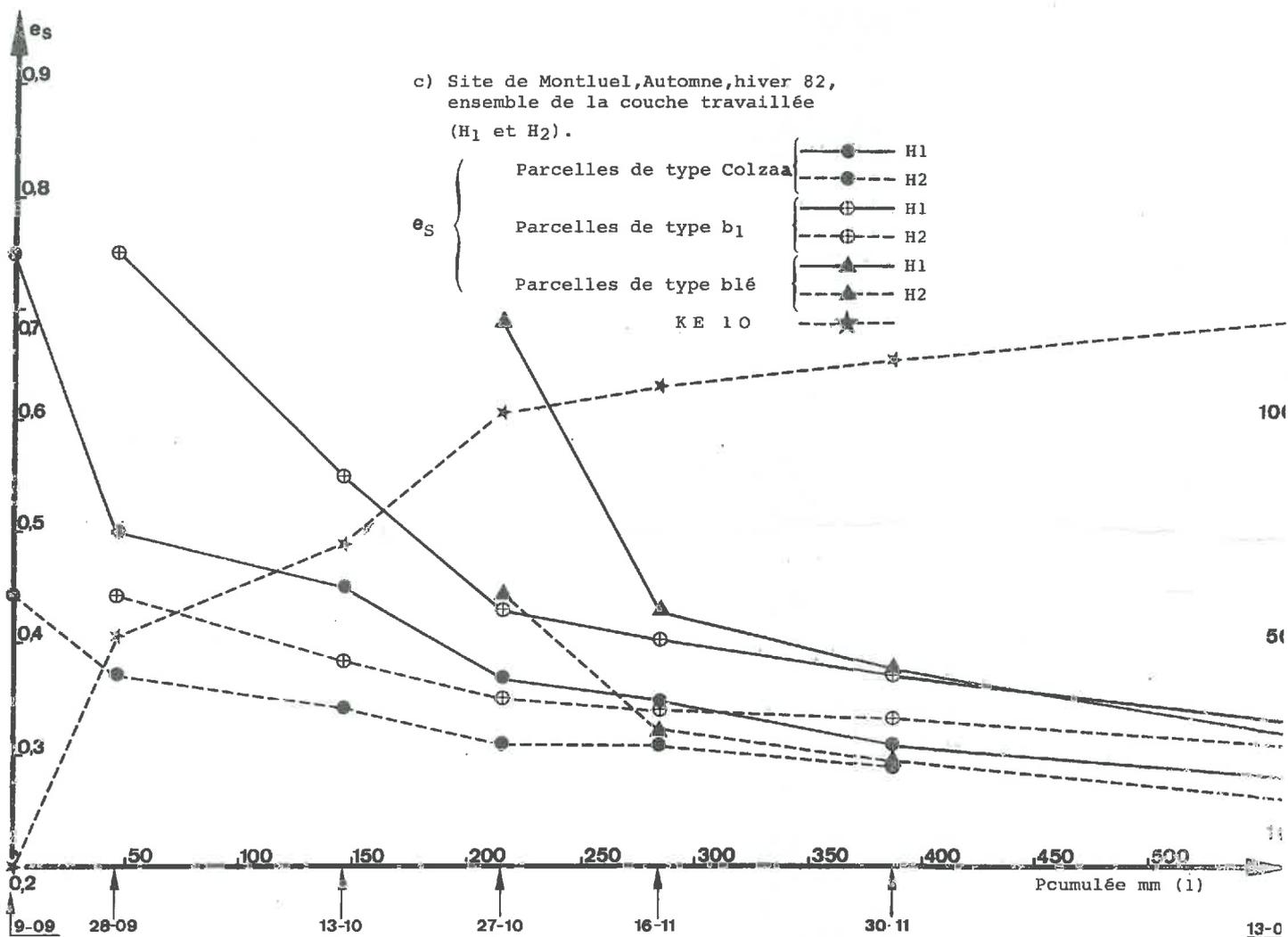
b) Site de Montluél, printemps 82, ensemble de la couche travaillée ($H_1 + H_2$)

e_s —■— parcelles de type a
—□— parcelles de type b
KE 10 —★—



c) Site de Montluél, Automne, hiver 82, ensemble de la couche travaillée (H_1 et H_2).

e_s { Parcelles de type Colzaa —●— H_1
—○— H_2
Parcelles de type blé —⊕— H_1
—⊕— H_2
Parcelles de type blé —▲— H_1
—▲— H_2
KE 10 —★—



de roue, etc...) et ont pu être repérées, ce qui a permis de pondérer les mesures de densité effectuées dans chaque type de zone par la surface occupée.

Enfin, on n'a pas tenu compte des variations de densité texturale liées à celles de l'humidité. On peut certes, admettre que le gonflement-retrait résiduel est faible compte tenu des teneurs en argile des sols étudiés. Par contre, pour des teneurs en eau du massif supérieures à celles qui satureront la porosité texturale (fréquemment obtenues à Palaiseau) il n'est pas exclu qu'un certain gonflement des fragments ait lieu aux dépens de la porosité structurale. Faute d'indications sur la répartition exacte de l'eau dans le massif, nous l'avons négligé.

B/ - Evolution dans le temps : tendances générales

L'évolution des valeurs moyennes des indices e_s en fonction de la hauteur de pluie cumulée depuis l'état initial (P) est représentée sur les Fig. 42 a à c.

Dans la plupart des cas distingués e_s décroît de plus en plus lentement et semble se stabiliser, pour les valeurs de P les plus importantes, dans une gamme restreinte de valeurs situées autour de 0,25 - 0,30.

D'un tracé à l'autre, le rythme de décroissance initial paraît d'autant plus élevé que l'indice initial est plus élevé.

Pour décrire de manière à la fois générale et adaptée à chaque cas particulier, cette décroissance, on peut donc proposer un modèle empirique de forme hyperbolique⁽¹⁾, qui s'écrit pour chaque couche :

$$e_s = e_{s1} + \frac{e_{si} - e_{s1}}{aP + 1}$$

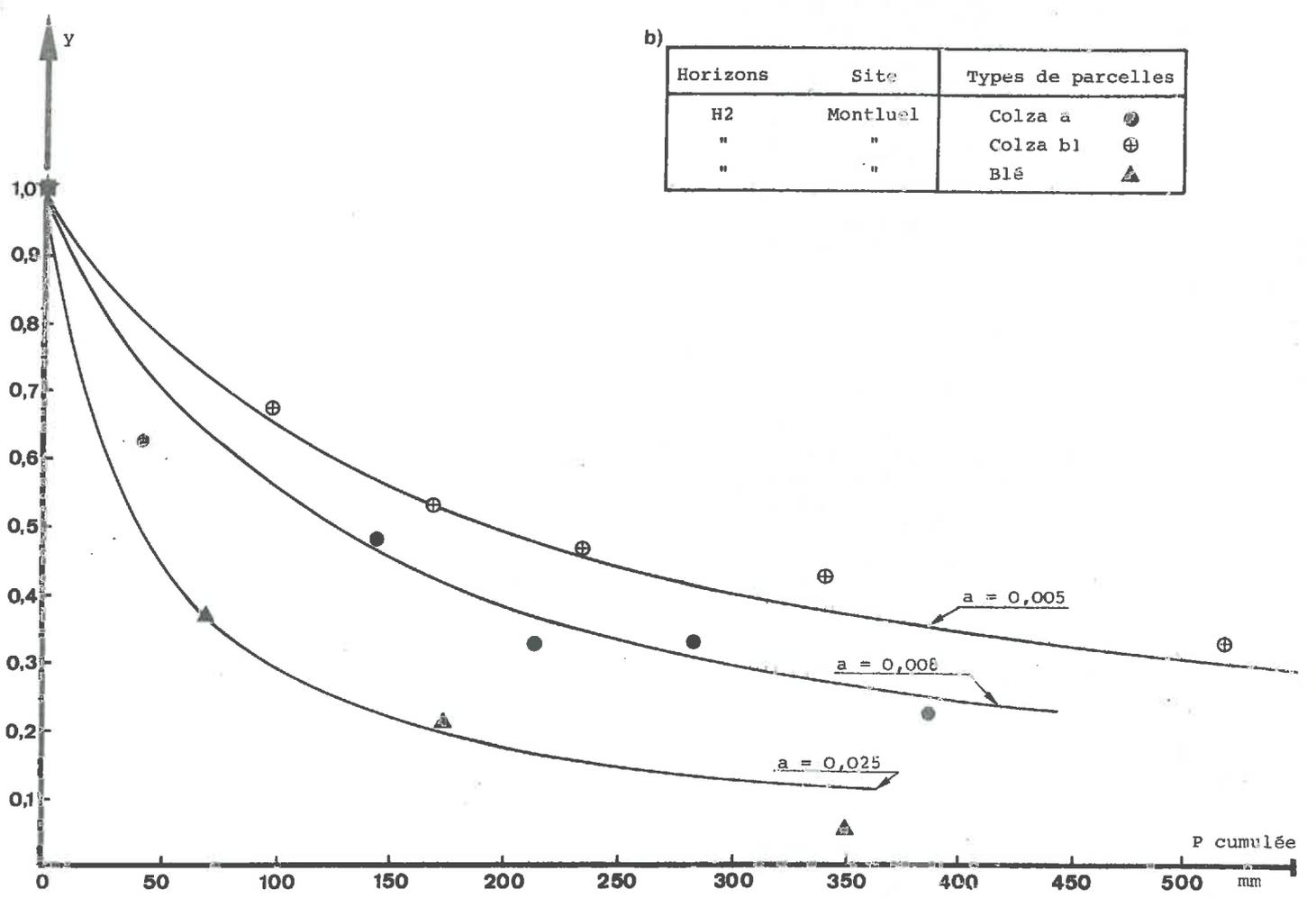
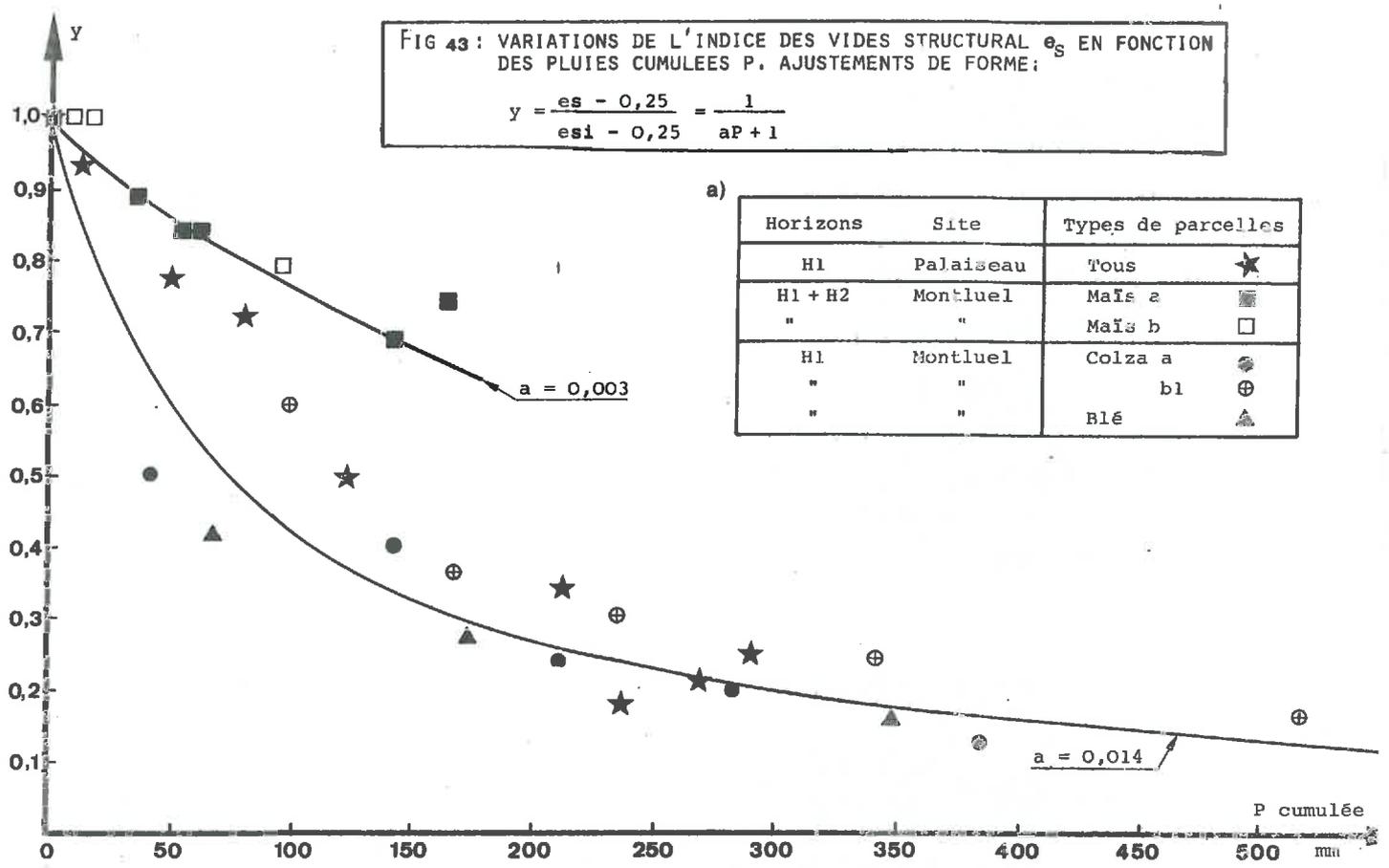
Où e_{si} et e_{s1} sont respectivement l'indice initial et sa valeur limite qui a priori serait contingente des différentes conditions, notamment hydriques, dans lesquelles s'opère le tassement. Le coefficient a exprime, lui, l'efficacité de la pluie par rapport à la diminution relative de l'indice des vides.

Sur la Fig. 43, on voit que, en prenant une valeur commune $e_{s1} = 0,25$, et en prenant dans chaque cas un coefficient a approprié on peut décrire de manière très satisfaisante les variations du terme $(e_s - e_{s1}) / (e_{si} - e_{s1})$. On remarque, en outre que :

(1) la forme exponentielle $e_s = e_{s1} e^{-kP}$ traduit moins bien la décroissance initiale rapide.

FIG 43 : VARIATIONS DE L'INDICE DES VIDES STRUCTURAL e_s EN FONCTION DES PLUIES CUMULEES P. AJUSTEMENTS DE FORME:

$$y = \frac{es - 0,25}{esi - 0,25} = \frac{1}{aP + 1}$$



- la même description peut être donnée en ce qui concerne l'évolution des horizons H_1 de Palaiseau et Montluel observée à l'automne (c'est-à-dire en conditions humides) ;
- par contre, l'évolution observée à Montluel au printemps (c'est-à-dire en conditions plus sèches en moyenne) présente une vitesse plus lente (et peut-être en fait une limite e_{s1} plus élevée).

Autour de cette tendance générale, le rythme de décroissance de e_s présente malgré tout certaines irrégularités, perceptibles sur les tracés des Fig. 42 a, b, et c. Or, la considération des pluies les plus intenses ne rend pas compte de ces irrégularités. Ceci est flagrant dans le cas du site de Palaiseau (Fig. 42 a) pour lequel deux séquences à tassement prononcé (Du 15 au 22.12. et du 20.01 au 11.02) correspondent à une absence de pluies d'intensité supérieure à 10 mm/h alors qu'au contraire la séquence du 11.02 au 9.03, qui comporte une importante proportion de pluies intenses, correspond à un ralentissement relatif de la décroissance de e_s . En revanche, il est à noter qu'au cours des deux séquences citées ci-dessus, le sol a subi un gel important affectant tout l'horizon H_1 pendant plusieurs jours), qui a entre autres effets provoqué dans la partie supérieure de cet horizon une élévation considérable de l'humidité. On est donc conduit à tempérer l'idée selon laquelle l'énergie cinétique des gouttes de pluies jouerait un rôle prédominant.

C/ - Variations entre parcelles de la diminution de e_s

Elles sont, avant tout, d'assez faible ampleur pour une même date d'exposition aux pluies. On se bornera à mentionner trois tendances :

- Influence de l'état initial : d'après les données provenant du site de Palaiseau, pour lequel on dispose d'un nombre suffisant d'informations au niveau de chaque parcelle, on observe une corrélation positive entre la variation totale Δe_s et l'indice e_{s1} ($r = 0,67$ pour 21 résultats). Ceci montre que la variabilité intra site répond bien aux règles dégagées à partir des résultats moyens.
- Influence restreinte de l'énergie cinétique des gouttes : sur le site de Palaiseau, le protocole expérimental comporte différents taux d'interception de l'énergie cinétique des gouttes. L'effet de ce facteur n'est pas significatif bien que les résultats moyens se classent dans l'ordre attendu (Tableau 41). Ceci est cohérent avec l'absence de rôle privilégié des pluies les plus intenses.

Tableau 41.- EFFET DE L'INTERCEPTION DES GOUTTES DE PLUIE SUR LA VARIATION Δe_s DE L'INDICE DES VIDES STRUCTURAL PENDANT LA PERIODE D'OBSERVATION. (Site de Palaiseau, parcelles à état structural fin et histoire hydrique normale, horizon H₁)

<u>TAUX de RECEPTION de l'ENERGIE CINETIQUE</u>	100	70	30	20
Δe_s (1) (moyenne de 2 blocs)	0,75	0,71	0,54	0,53

(1) L'effet du taux de réception n'est pas significatif (Cf. ANNEXE 20-1)

TABLEAU 42.- EFFET DE L'HISTOIRE CULTURALE SUR LA VARIATION Δe_s DE L'INDICE DES VIDES STRUCTURAL PENDANT LA PERIODE D'OBSERVATION (Site de Montluel, campagne d'automne, horizon H₁)

<u>TYPE de PARCELLES</u>	<u>COLZA a</u>			<u>BLE</u>	
	<u>ROTATION</u> (pailles exp. sans prairie)	B (pailles enf. sans prairie)	C (pailles exp. sans prairie)	A	
TENEUR EN CARBONE ‰	8,1	9,1	10,1	8,6	10
Δe_s (1)	0,50	0,42	0,48	0,41	0

(1) Moyenne pour 2 parcelles. L'effet rotation est significatif à 10 % (Cf. ANNEXE 20-2)

- . Influence du statut organique du sol : d'après les résultats obtenus sur le site de Montluel à l'automne (Tableau 42) on constate que la diminution de e_s est en moyenne plus marquée sur les parcelles les moins riches en matières organiques. Déjà observé à Versailles (BOIFFIN et SEBILLOTTE, 1976), ceci est cohérent avec les conclusions des auteurs précédemment cités selon lesquels les matières organiques libres et liées, par des mécanismes différents dans ces deux cas, diminuent la sensibilité du sol au tassement.

3.3. - ELEMENTS DE SYNTHÈSE

La diminution du volume apparent des couches superficielles meubles sous l'action de la pluie correspond à la disparition d'une proportion importante de la porosité dite structurale. Le travail réalisé ne permet pas d'élucider les mécanismes de ce phénomène mais précise son allure, ce qui apporte différents éléments d'interprétation et de prévision empirique de l'indice des vides structural.

a) - Les mesures réalisées, cohérentes avec les observations morphologiques, montrent que cette évolution se réalise de manière différente suivant la position dans le profil et l'état initial des couches concernées :

- Dans la couche immédiatement superficielle (2 à 10 millimètres) toute porosité structurale disparaît à l'exclusion de quelques discontinuités entre les strates des croûtes de dépôt et des vésicules liées à l'emprisonnement d'air ou de gaz carbonique. Cette évolution poussée peut être attribuée à la conjonction de plusieurs facteurs : proximité des impacts et donc concentration de leur énergie cinétique, humidités localement et temporairement élevées⁽¹⁾, état de division du matériau lié notamment aux processus de désagrégation et qui facilite les réarrangements.
- Les couches meubles sous-jacentes subissent une augmentation moins marquée de densité qui d'après les observations morphologiques correspond à une diminution de la porosité intermottière, plutôt par réarrangement des fragments initiaux que par destruction ou déformation de ceux-ci.

(1) Ce qui au-delà d'un certain degré de compacité est un facteur de non augmentation de la densité (saturation).

- les couches dont l'état initial est massif ne subissent pas d'augmentation sensible de densité ce qui amène à penser qu'elles servent de socle pour la déformation des couches sus-jacentes.

b) - Sur le plan quantitatif, si on néglige le caractère particulier de la mince couche de surface, l'approximation consistant à assimiler chaque profil à une superposition de couches meubles se tassant de manière homogène s'avère satisfaisante pour rendre compte de la diminution du volume apparent, à partir du moment où les limites entre les couches sont repérées avec précision. La manière dont se répercutent les augmentations de compacité entre deux couches meubles superposées apparaît variable et pourrait être liée à la netteté de la discontinuité structurale qui les sépare. Cependant, dans des conditions climatiques données, la diminution du volume apparent du sol est avant tout déterminée par sa valeur initiale, qui dépend elle-même de l'épaisseur de terre ameublie et de la densité conférée à ce massif lors du travail du sol. Ceci tient au fait que l'indice des vides structural des couches meubles s'établit dans une gamme de valeurs assez restreinte à partir d'une certaine hauteur de pluie reçue.

L'allure de la décroissance de l'indice des vides structural des couches superficielles meubles peut être représentée par une branche d'hyperbole, la variable prédictive étant la hauteur de pluie reçue.

c) - Le rôle respectif des processus de désagrégation et de compactage, reste difficile à apprécier. Si on admet que l'analogie avec les processus de compactage dynamique se justifie au moins à titre de référence, on constate que tout se passe comme si :

- l'essentiel de l'énergie cinétique était absorbée au niveau d'une mince couche superficielle,

- Une fraction de cette énergie, indéterminée, mais sans doute faible et dépendant de la morphologie de la surface, était transmise à la masse du profil.

Au-delà de cette analogie, rien n'exclut que le tassement réponde à d'autres lois (quantité de mouvement et non énergie cinétique, auquel cas la vitesse des gouttes aurait moins d'importance) ou à d'autres processus (désagrégation, division par le gel) que celles et ceux pris en compte dans le compactage dynamique, ce qui expliquerait que l'énergie cinétique des pluies apparaisse peu déterminante.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE :

Au cours des 2 phases de la dégradation, l'évolution morphologique de la surface du sol peut être appréhendée comme la résultante géométrique de déplacements de terre dirigés par les forces de gravité. Cette évolution morphologique est donc déterminée par :

- la géométrie initiale de la surface,
- le déplacement selon différentes modalités, d'une certaine masse de terre par unité de surface.
- l'effet de compactage qu'exercent les impacts de goutte sur le matériau déposé dans sa nouvelle disposition.

Pour rendre compte de l'expansion progressive des plaques continues caractéristiques de la phase 1, on a proposé un modèle de colmatage interstitiel. Celui-ci donne une signification intéressante au paramètre D_{lim} , équivalent à la limite supérieure du calibre des fragments incorporés : D_{lim} serait étroitement corrélé au volume de matériau interstitiel par unité de surface. Les variations de D_{lim} sont cohérentes avec cette déduction et sur l'un des sites d'expérience une confirmation directe de l'efficacité du modèle de colmatage interstitiel est fournie par l'étroite corrélation qui lie D_{lim} aux masses de projections solides recueillies. En définitive, la vitesse de dégradation structurale de la surface au cours de la phase 1 est la résultante de deux composantes pratiquement indépendantes :

- la vitesse d'augmentation de D_{lim} , c'est-à-dire l'intensité du déplacement de matière solide (qui dépendrait essentiellement de l'interaction climat-propriétés du matériau),
- l'influence des variations de D_{lim} sur le taux de recouvrement de la surface par les plaques (qui ne dépend que de la morphologie initiale de la surface), conformément au schéma d'incorporation progressive des fragments.

La diminution de l'infiltrabilité est corrélée à l'augmentation de D_{lim} ce qui suggère qu'elle est davantage liée à l'épaississement de la croûte qu'à l'expansion latérale des plaques. La conjonction de cette diminution et de pluies intenses déclenche la phase 2.

Au cours de celle-ci, le schéma géométrique qui rend compte de l'évolution morphologique ne diffère pas, dans son principe, de celui envisagé pour la phase 1, puisque dans les deux cas, on suppose l'accumulation irréversible en position basse d'un matériau très divisé épousant la forme du réceptacle. Mais, au cours de la phase 2, la spécialisation des microsites en zones de départ ou d'accumulation

TABLEAU 43a. - FONCTIONS ELEMENTAIRES ET PROCESSUS DE LA REDISTRIBUTION SPATIALE .

() processus n'ayant pas lieu dans les conditions étudiées

DEPLACEMENT	INITIAL	0		ε (distances) millimétriques)		+ (distances décimétriques ou métriques)		
	CONVECTIF	0	+	0	+	0	+	
DETACHEMENT	0	<ul style="list-style-type: none"> Pas d'évolution des fragments 		<ul style="list-style-type: none"> Réarrangement interfragments Déformation plastique 		<ul style="list-style-type: none"> (. Glissement de terrain) 		
		pas de transfert mT = 0	(charriage de fragments)	pas de transfert mT = 0	(charriage de fragments)	(Eboulement)	(Solid flux)	
	+	<ul style="list-style-type: none"> Rupture, fissuration ou microfissuration sur place 		<ul style="list-style-type: none"> Séparation et chute d'agrégats et de particules 		<ul style="list-style-type: none"> Projection d'agrégats et de particules (. Arrachement par ruissellement) 		
		mT = 0	Transfert possible	mT = 0	Transfert possible	mT = 0	Transfert possible	

dépend de leur position par rapport à la circulation superficielle de l'eau, ce qui entraîne une maille de répartition d'ordre décimétrique. Comme les zones de départ se réduisent au cours du temps, les transferts sont progressivement limités par la source et la surface atteint un état d'équilibre (qui n'est définitif que si la pente est nulle).

Dans l'analyse du déterminisme de la redistribution spatiale, nous avons mis en cause différents processus de redistribution spatiale de matière solide. Les différentes hypothèses émises au fur et à mesure de cette analyse peuvent être récapitulées à l'aide du Tableau 43 dérivé de celui donné en introduction de cette 2ème partie (Tableau 17).

L'étude quantitative de la redistribution spatiale doit être envisagée à la lumière de cet inventaire et en particulier de la distinction fondamentale entre détachement et déplacement. C'est en effet seulement en tenant compte de cette complexité qualitative que devient intelligible le caractère fluctuant et peu étroit des relations statistiques entre les différents indicateurs de redistribution spatiale, ou entre ces indicateurs et les facteurs et conditions de la dégradation. En effet, chaque processus inventorié répond de manière spécifique à ces facteurs et conditions.

A défaut d'être totalement élucidées, en particulier pour ce qui concerne les faibles distances, les lois du déplacement semblent du moins mettre en jeu des variables bien identifiées et hiérarchisées, au premier rang desquelles se trouvent les caractéristiques énergétiques et cinétiques des gouttes de pluie et du ruissellement. C'est loin d'être le cas vis-à-vis du détachement qui résulte d'interactions complexes entre la constitution du matériau, son état et son histoire hydriques, et les caractéristiques de la pluie.

Or, même si certains déplacements peuvent s'effectuer sans détachement, c'est la fonction détachement qui vraisemblablement détermine, pour une large part, et dans une large gamme de conditions, la limite supérieure des quantités de terre redistribuées, au moins à la surface du sol. A contrario, si la gravité de la dégradation des couches internes du profil apparaît modérée, c'est bien parce que la fonction détachement y semble peu active (ce qui n'est pas nécessairement vrai pour toutes les conditions de milieu).

L'appréhension de cette fonction apparaît donc comme un maillon faible des connaissances actuellement disponibles pour bâtir un modèle de prévision de l'évolution structurale du sol en place. C'est pourquoi, nous lui avons consacré un travail expérimental spécifique, présenté dans la troisième partie de ce mémoire.

TROISIÈME PARTIE :

ÉTUDE DES MODALITÉS DE DIVISION
DES FRAGMENTS TERREUX

P L A N

	<u>PAGE</u>
<u>INTRODUCTION</u>	226
<u>1 - MISE EN EVIDENCE DE L'INTERVENTION DE DIFFERENTES MODALITES</u> ...	226
1.1. - <u>Démarche entreprise</u>	226
1.2. - <u>Résultats</u>	228
1.2.1. - <u>Evolution structurale</u>	228
1.2.2. - <u>Abondance et nature des particules déplacées</u>	230
1.2.3. - <u>Discussion</u>	233
<u>2 - ETUDE DES MODALITES DE LA DESAGREGATION</u>	236
2.1. - <u>La transposition au champ des connaissances relatives à la désagrégation : position du problème</u>	236
2.2. - <u>Effet des impacts de gouttes à faible énergie cinétique.</u>	238
2.2.1. - <u>Démarches entreprises</u>	238
2.2.2. - <u>Allure générale de la désagrégation ; influence de la hauteur de chute des gouttes et de l'état hydrique de la terre</u>	240
2.2.3. - <u>Influence de la taille des fragments</u>	242
2.2.4. - <u>Discussion</u>	243
2.3. - <u>Etude de certaines conditions de sensibilité des fragments de la désagrégation</u>	244
2.3.1. - <u>Démarches entreprises</u>	244
2.3.2. - <u>Influence de l'état hydrique des fragments</u>	245
A/ - Résultats	
B/ - Discussion	
2.3.3. - <u>Influence du calibre des fragments</u>	250
A/ - Résultats	
B/ - Discussion	
2.3.4. - <u>Influence de la localisation des fragments dans le profil et de leur remaniement</u>	254
A/ - Résultats	
B/ - Discussion	
<u>CONCLUSION DE LA TROISIEME PARTIE</u>	257

INTRODUCTION

L'importance de la fonction détachement vient d'être soulignée. Elle tient au fait que l'impact d'une goutte met en jeu des grandeurs énergétiques et cinétiques très faibles, et que par suite les tailles critiques des particules autorisant le déplacement, sont également très faibles. Une fois que les fragments les plus fins créés directement par les opérations de travail du sol sont soudés, il ne peut y avoir de redistribution spatiale importante du matériau que si les processus naturels de division des fragments assurent la libération de particules de beaucoup plus petite taille que les fragments d'origine.

Dans un premier temps, nous chercherons à vérifier que les différents processus et modalités de division que nous avons invoqués au cours de la 2ème partie ont bien lieu. En effet, il n'est pas évident que des processus de fissuration puissent intervenir de façon importante dans des sols à texture plutôt ou même franchement limoneuse. Quant à la désagrégation, nous en connaissons mal les conditions et les modalités au champ.

Après avoir acquis ces données qualitatives, nous nous attacherons à préciser comment varient les masses de terre concernées par les différentes formes de la désagrégation.

1 - MISE EN EVIDENCE DE L'INTERVENTION DE DIFFERENTES MODALITES

1.1. - DEMARCHE ENTREPRISE

Dans les travaux dont on a fait état jusqu'à présent, il était difficile d'identifier les processus de division des fragments, en raison :

- d'une part, du caractère trop discontinu des observations, les particules émises lors d'un épisode étant souvent remaniées avant de pouvoir être observées, y compris au sein des récepteurs de projections ;
- d'autre part, de la difficulté à distinguer des particules d'apport récent de celles n'ayant pas changé de position.

Pour résoudre ces problèmes, nous avons mis en oeuvre, à proximité immédiate du laboratoire, un protocole d'observation très simple consistant à exposer aux pluies des échantillons de terre contenus dans des boîtes de Pétri, placées au centre d'une plaque recouverte de toile claire sur laquelle les particules émises sont bien visibles et restent adhérentes. La toile réceptrice est changée à différentes reprises.

Les boîtes (10 cm de diamètre) sont remplies de fragments non remaniés (n'ayant subi aucune déformation ni fragmentation) après leur prélèvement au champ, mais calibrés

TABLEAU. 44.- PRINCIPALES ETAPES DE L'HISTOIRE CLIMATIQUE, HYDRIQUE ET STRUCTURALE DES ECHANTILLONS EXPOSES AU PRINTEMPS 1983.

ETAPE	DATE	P CUMULE mm	KE 10 CUMULE J/m2	NOMBRE d'ALTERNANCES HYDRIQUES (1)		SYMPTOMES DE FISSURATION (2)		SYMPTOMES DE DESAGREGATION (3)	
				H.H.	H.A.	H.H.	H.A.	H.H.	H.A.
1	11.04.83	0	0	1 (humectation initiale)	0	+	0	0	0
	15.04.83	2,3	0	1	0	++	0	1 ⁻	0
2	17.04.83	6,1	0	1	1 (incomplète)	++	+	1 ⁻	0
	20.04.83	17,2	15	1	4	++	+++	1	1 ⁻
	22.04.83	23,6	30	1	6	++	+++	1 ⁺	1
3	23.04.83	37,5	196	1	7	++	0	2	4 ⁺
	17.05.83	81	288	3 (assèchement accidentel)	18	++	0	4	6

(1) 1 alternance = 1 variation d'au moins 2 classes de couleur
(du clair au foncé ou inversement)

(2) Densité de micro fissures croissant avec le nombre de +

(3) Cf. échelle de notation en ANNEXE 2.

HH et HA = histoires hydriques respectivement humide et alternée.

TABLEAU. 45.- CLASSEMENT DES ECHANTILLONS D'APRES LES SYMPTOMES D'EVOLUTION STRUCTURALE.

Les chiffres du tableau sont des rangs (1) dans le classement.

PROVENANCE	HISTOIRE HYDRIQUE	ALTERNEE (H.A.)				CONSTAMMENT HUMIDE (H.H)			
	SITE	MONTLUEL			PALaiseau	MONTLUEL			PALaiseau
	TYPE DE PARCELLE	ROT A (P16)	ROT B (P14)	ROT C (P3)	II A ₀	ROT A (P16) ⁺	ROT B (P14)	ROT C (P3)	II A ₀
SYMPTOMES DE FISSURATION	17.04	4	6	7	5		2	3	1
	19.04 au 21.04	3	4	5	1		6	7	2
	23.04 au 11.05	6	6	6	3		2	4	1
SYMPTOMES DE DESAGREGATION	22.04 à 11h30	1	4	5,5	7		2	5,5	3
	23.04 à 10h30	1	2,5	4	2,5		5,5	7	5,5
	28.04 matin	1	2	3,5	3,5		5	7	6

+ Echantillon détruit accidentellement

(1) En cas d'ex-aequo le chiffre est la moyenne des rangs obtenus s'il n'y avait pas eu d'ex-aequo.

(triés par classes de taille) entre 0,5 et 2 cm et disposés sur une hauteur d'environ 2 cm. Les 7 échantillons exposés correspondent à :

- a) - 2 types d'histoire hydrique, facteur dont le rôle a été invoqué, à plusieurs reprises, dans la 2ème partie :
- . l'une alternée (H.A.), les échantillons étant soumis librement aux alternances pluie-évaporation qui provoquent au sein du petit volume défini par la boîte des variations de teneur en eau très importantes et très rapides ;
 - . l'autre monotone et humide (H.H.), les échantillons étant placés juste au-dessus d'une petite réserve d'eau distillée qui permet, par l'intermédiaire d'une mèche, de maintenir les fragments à l'état saturé.
- b) - 4 types de matériaux, provenant respectivement :
- . du site de Palaiseau,
 - . du site de Montluel, et en son sein de parcelles soumises aux trois types de rotations (A, B, C) mentionnées précédemment.

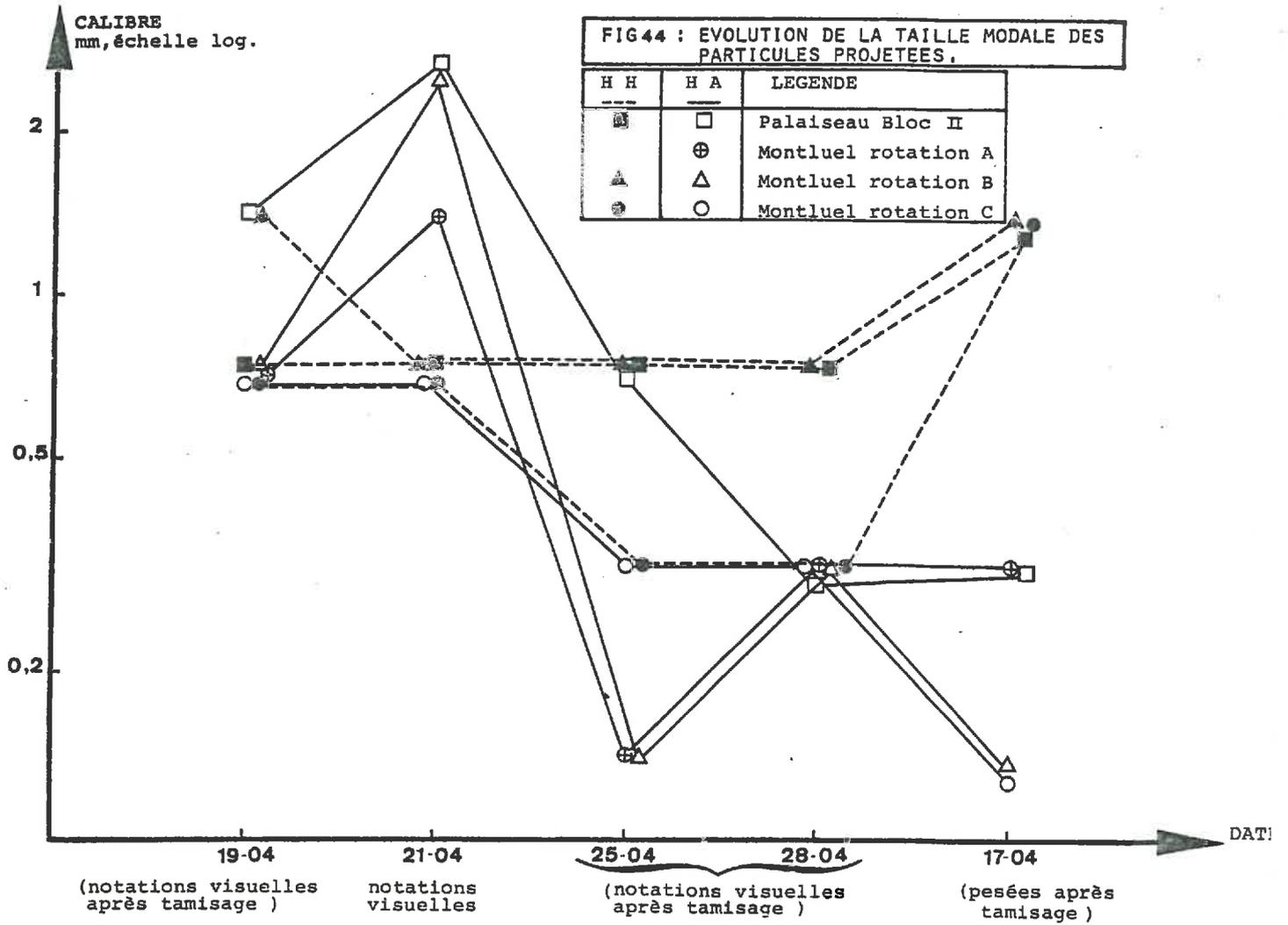
Après son exposition à l'air libre, le dispositif est observé aussi souvent que possible et fait l'objet de notations visuelles de type qualitatif ordonné. Cette procédure est apparue suffisante compte tenu de l'aspect principalement qualitatif des informations recherchées ; elle permet une réaction très rapide aux événements climatiques. Cependant lors du renouvellement des toiles réceptrices, les particules recueillies ont été séchées et triées sur une colonne de tamis afin de mieux appréhender leur répartition granulométrique.

L'exposition a eu lieu à Paris du 11.04 au 17.05.83 avec une interruption du 28.04 au 10.05 ; les échantillons ont reçu au total 61 mm de pluie répartie en 11 pluies principales et ont été observés à 14 reprises. Au début de chacune de ces 11 pluies, les échantillons H.A. sont toujours secs et les fragments des échantillons HH toujours saturés sauf pour la dernière pluie qui survient alors que les réserves d'eau ont été épuisées.

1.2. - Résultats

1.2.1. - Evolution structurale

Les principaux traits de cette évolution sont présentés dans le Tableau 44. L'intensité des symptômes notés étant variables d'un échantillon à l'autre, on a établi à différentes reprises des classements systématiques figurant dans le Tableau 45. On peut distinguer trois étapes principales :



- Une étape préliminaire (11 au 15/04) au cours de laquelle les seules modifications observables sont l'apparition de fissures au sein des échantillons H.H. à la suite de l'humectation initiale. Le fait marquant est que ces fissures apparaissent sur tous les échantillons y compris ceux provenant de Montluel qui ne contiennent que 10 % d'Argile. Plus ou moins denses et profondes selon les échantillons, elles délimitent à la périphérie des fragments, de petits agrégats de taille millimétrique.
- Dans une deuxième étape (lignes 3 à 5 du Tableau 44 ; 1 et 2 du Tableau 45), les échantillons H.A. subissent des alternances d'humectation-dessiccation et se fissurent à leur tour de plus en plus intensément jusqu'à s'émietter alors que les échantillons H.H. ne montrent aucun changement si ce n'est de légers signes de désagrégation (petites accumulations interstitielles). Pour une même histoire hydrique, les échantillons les plus fissurés sont finalement ceux du site de Palaiseau, plus argileux ; les moins fissurés provenant des parcelles C (rotation avec prairie) de Montluel (Cf. Tableau 45 , lignes 1 et 2).
- Les fortes pluies du 22-23/04 déclenchent une troisième étape au cours de laquelle les fragments H.A. sont brutalement désagrégés, les échantillons prenant un aspect continu avec symptômes de dispersion et disparition totale des fissures. Pendant le même temps les fragments H.H. sont peu modifiés. Ils conservent leurs fissures et ne se dégradent nettement qu'à la fin des observations. Les classements des symptômes de désagrégation (partie inférieure du Tableau 45 et cliché Xg) montrent nettement l'influence de l'histoire hydrique, mais aussi, pour une même histoire hydrique, celle de la stabilité structurale : les échantillons les plus dégradés (Montluel A) sont ceux dont les taux d'agrégats stables sont les plus faibles et inversement les moins dégradés (Montluel C et Palaiseau) sont ceux dont les taux d'agrégats stables (respectivement après prétraitement benzène et alcool) sont les plus élevés.

1.2.2. - Abondance et nature des particules déplacées

Les notations systématiques relatives aux particules observées à l'extérieur des échantillons sont résumés dans le Tableau 46, où on a indiqué, pour différentes séquences d'observation l'abondance relative des particules et leur aspect dominant. On note que :

TABLEAU.46. - OBSERVATION DES PROJECTIONS EMISES PAR LES ECHANTILLONS EXPOSES AU PRINTEMPS 1983.

[HH et HA = histoiues hydriques respective- ment humide et altérée].

ETAPE D'EVOLUTION STRUCTURALE	SEQUENCE d' OBSERVATIONS DE PROJECTIONS		CARACTERES CLIMATIQUES			EVALUATION ET NATURE DES PROJECTIONS(1)	
	DEBUT	FIN	P mm	KE 5 J/m ²	KE 10 J/m ²	H.H	H.A
1	11.04 (16h30)	11.04 (19h)	1,8	16,8	0	0	0
	12.04	17.04 (13h)	4,3	0	0	ε à + (a)	0 - ε
2	17.04	19.04	11,1	14,6	14,6	+ (a)	+
	19.04	21.04	6,4	15,3	15,3	+ (a)	++ (A)
	21.04	23.04 (matin)	13,9	210,5	165,6	++(+)(a)	+++ (a + p)
3	23.04 (matin)	25.04 (matin)	3,9	42,3	42,3	+ (+)(a)	++ (p)
	25.04 (matin)	28.04 (matin)	4,9	40,6	0	++ (a)	+ (p)
	10.05 (matin)	11.05 (matin)	5,1	0	0	+ (a)	ε à + (p)
	11.05 (matin)	13.05 (16h)	4,9	0	0	+ (a)	ε à + (p)
	13.05 (16h)	16.05 (soir)	4,7	50,4	50,4	+++ (A + a)	++ (a + p)

(1) Abondance des particules croissant avec le nombre de +

a : petits agrégats (≤ 2 mm) ; A gros agrégats (> 2 mm)

p : particules fines avec constituants granulométriques individualisés.

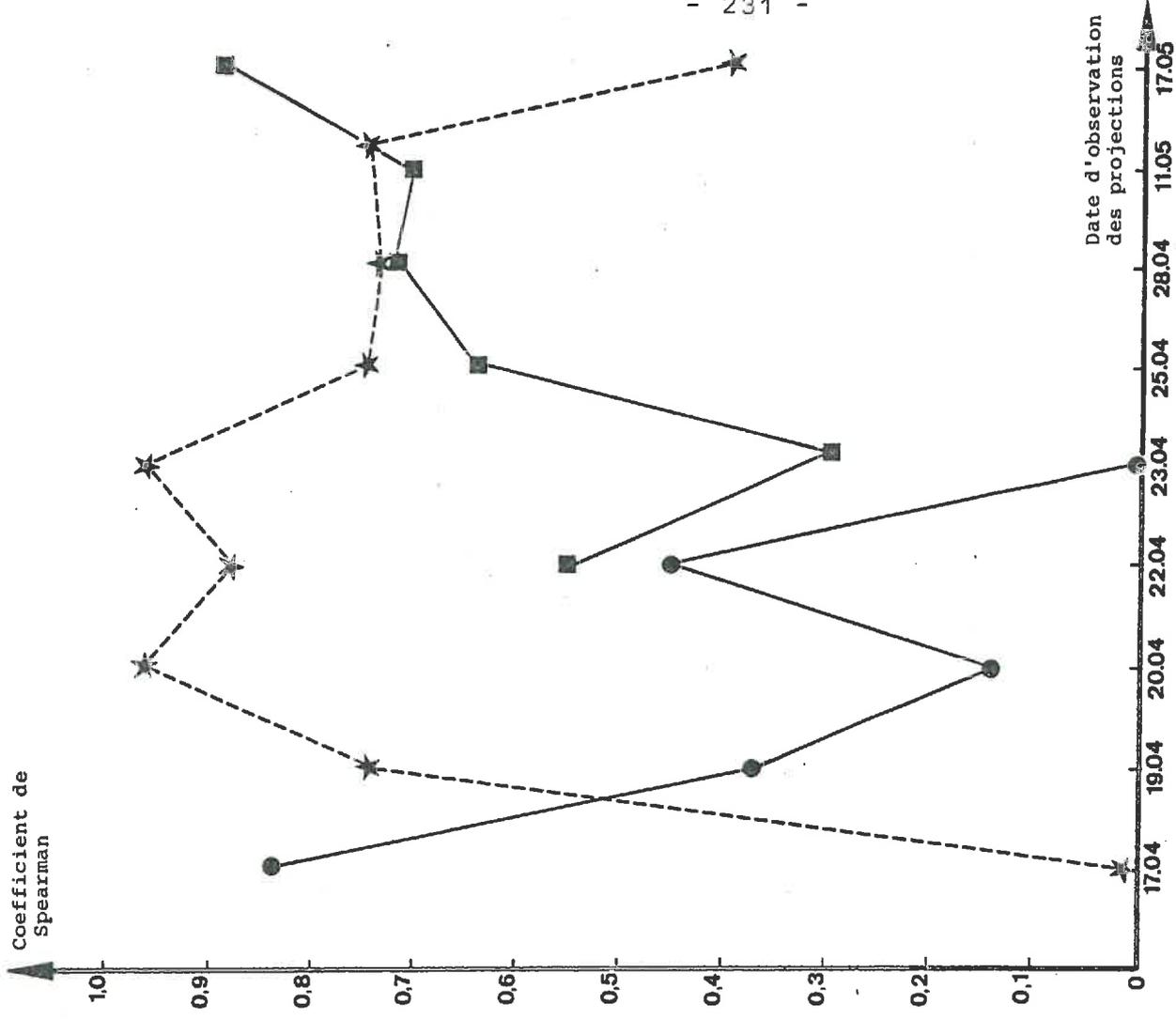


FIG45 : CORRELATION ENTRE LES CLASSEMENTS D'ABONDANCE DES PROJECTIONS A DIFFERENTES DATES ET LES CLASSEMENTS D'INTENSITE DE LA FISSURATION.

Date du classement de fissuration

- 17 - 04
- ★ 19 - 04
- 25 - 04

- a) - d'une séquence climatique à l'autre, les classements d'abondance des particules projetées traduisent bien la répartition des pluies par classes d'intensité. Il se confirme d'ailleurs que des pluies de faible intensité ($KE_5 = 0$) peuvent projeter des particules.
- b) - la nature des particules projetées est variable. Pour un même échantillon lors d'une pluie donnée, les projections sont généralement constituées d'un mélange comprenant des agrégats plus ou moins gros et des particules élémentaires. Selon que tel ou tel type de particule prédomine, on obtient différents cas de figure illustrés par les clichés Xa à f. En fait, ceci dépend de l'histoire hydrique et structurale des échantillons. D'après le Tableau 46 (2 dernières colonnes, caractères entre parenthèses) et la figure 44 on voit que :
- . pour les échantillons de type H.H., les projections sont constamment surtout constituées de petits agrégats dont le calibre est de l'ordre du millimètre (Cf. Cl. Xb et Xf),
 - . pour les échantillons de type H.A., elles sont constituées, au cours de l'étape 2, principalement d'agrégats (parfois nettement plus gros que dans le cas précédent, notamment (cf. Cl. Xa et Xc) à la suite de la fissuration intense consécutive aux premières alternances hydriques), puis, au cours de l'étape 3, de particules fines parmi lesquelles les constituants granulométriques les plus grossiers sont visiblement individualisés. Ce changement coïncide avec la dégradation brutale (pluies du 22-23/04) signalée précédemment.
- c) - l'abondance des projections dépend elle aussi de l'histoire des échantillons. Elles sont plus abondantes pour les échantillons H.A. au cours de l'étape 2, puis ce classement s'inverse lors de l'étape 3, ce qui suggère une influence prédominante de l'état de fissuration des fragments lorsque surviennent les pluies. Ce point est confirmé par la prise en compte de la variabilité inter-échantillons. Ayant établi à 9 reprises un classement d'abondance des projections recueillies entre les 7 échantillons observés, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les rangs ainsi obtenus⁽¹⁾

(1) coefficient dit de SPEARMAN qui varie également de -1 à + 1.

et ceux des classements de degré de fissuration indiqués dans le tableau 45, qui ont été réalisés à 3 dates. Ces résultats sont reportés sur la Fig. 45.

Les classements d'abondance des projections sont d'abord bien corrélés avec le classement de fissuration du 17.04 (ligne 1 du Tab. 45), puis cette corrélation s'estompe au bénéfice d'une forte corrélation avec le nouveau classement du 19.04 (lignes 2 du Tableau 45), qui elle-même finit par s'effacer : in fine l'abondance des projections est bien corrélée avec la fissuration notée le 25.04 une fois l'étape 3 entamée (ligne 3 du Tab. 45).

L'influence de la microfissuration préalable vis-à-vis de l'émission ultérieure de projections est donc nette.

Cependant, la sensibilité à la désagrégation intervient secondairement comme l'indiquent les résultats détaillés donnés en annexe 21 : pour un même rang dans le classement de fissuration ce sont les parcelles les plus instables qui obtiennent les projections les plus abondantes.

Globalement, les échantillons provenant des parcelles de rotation C (avec prairie) du site de Montluel, à la fois les plus stables et les moins fissurés, n'émettent qu'une quantité très faible de particules.

- d) - La distance de déplacement des particules dépend de leur nature et des modalités d'évolution structurale au sein des échantillons : les particules les plus grosses (agrégats et sables) sont souvent retrouvées à plus de 5 cm des bords de l'échantillon alors qu'à proximité immédiate on retrouve une auréole de matériau désagrégé comportant tout le spectre granulométrique (Cf. Cl. Xd et Xe). Au sein de l'échantillon lorsque la désagrégation l'emporte sur la fissuration on assiste à une sorte d'effondrement sur place.

1.2.3. - Discussion

Réalisée de façon à pouvoir caractériser directement et qualitativement les matériaux déplacés, l'observation détaillée du comportement d'échantillons de terre de petite surface, exposés aux pluies naturelles, confirme les hypothèses précédemment émises à partir de données quantitatives globales obtenues au champ.

- a) - On peut effectivement distinguer deux modalités principales de division des fragments terreux :

- la microfissuration, qui consiste en l'individualisation progressive et plus ou moins poussée d'agrégats à la périphérie des fragments initiaux, ceux-ci demeurant peu altérés ou se subdivisant en fragments de relativement grande taille,
 - la désagrégation, dont résulte l'émission de particules de taille variable, en moyenne beaucoup plus petite que dans le cas précédent et comportant une certaine fraction de constituants granulométriques élémentaires. Cette modalité s'accompagne d'une destruction des fragments initiaux pouvant aller jusqu'à disparition complète.
- b) - Ces modalités influent sur le déplacement primaire immédiatement consécutif ;
- c) - L'importance que prend chacune d'elles est fortement déterminée par l'histoire hydrique du sol.

. La première est liée aux alternances d'humectation-dessiccation et de gonflement-retrait qui en résultent. Elle se manifeste non seulement à des teneurs en argile de l'ordre de 20 % pour lesquelles elle est couramment évoquée mais aussi à des teneurs d'environ 10 %. Dans ce dernier cas, son intensité est moindre et semble dépendre du statut organique des échantillons mais elle apparaît cependant de manière indiscutable. Les agrégats ainsi formés sont de petite taille et donc très sensibles à la désagrégation. Ceci explique que ce phénomène puisse passer inaperçu⁽¹⁾ si les observations sont trop espacées.

. La deuxième correspond à un effet direct de la pluie sur le sol. Ayant particulièrement affecté les échantillons de type H.A., et parmi ceux-ci, les échantillons les moins riches en argile et en matière organique, elle peut être reliée à la conjonction de trois conditions :

- fragments non saturés lors de la pluie,
- apparition rapide d'eau libre au contact des fragments superficiels (permise ici par l'imperméabilité totale du fond de la boîte),
- terre mouillable et peu cohérente.

(1) Au champ nous l'avions observé épisodiquement, y compris à Montluel, sous forme d'accumulation de petits agrégats néoformés, signalées dans la 1ère partie (Cf. cliché IIIc).

A contrario lorsque les fragments restent saturés (échantillons H.H.) même en cas de pluie intense et de terre instable la destruction des fragments initiaux est beaucoup moins poussée.

Il est probable qu'au champ, lors d'une séquence climatique de plusieurs jours, il peut y avoir alternance et interaction entre microfissuration et désagrégation. Les observations rapportées ci-dessus montrent cependant que, par l'ampleur et la rapidité des modifications qu'elle engendre, et aussi par la variabilité des conditions qui l'affectent, la désagrégation est bien le processus-clé des phases initiales de la dégradation structurale : en effet il contrôle non pas la totalité mais une partie importante et surtout très fluctuante des masses de terre mobilisée.

2 - ETUDE DES MODALITES DE LA DESAGREGATION

2.1. - LA TRANSPOSITION AU CHAMP DES CONNAISSANCES RELATIVES A LA DESAGREGATION : POSITION DU PROBLEME

La désagrégation peut être envisagée à différents niveaux d'assemblage des constituants granulométriques. Nous nous situons pour notre part à l'échelle du fragment terreux, ce qui nous conduit à nous référer au schéma explicatif dit de HENIN-YODER, présenté dans le chapitre introductif, et à utiliser le test de comportement intrinsèque qui en dérive directement, c'est à dire le test d'analyse d'agrégats.

Le schéma de HENIN-YODER s'applique idéalement à un fragment terreux de petite taille, initialement sec, imbibé sur toute sa périphérie par de l'eau à potentiel nul. Dans ces conditions le volume d'air emprisonné, et par suite les contraintes exercées sur le matériau par la compression de ce volume, sont maximisés. La destruction de l'agglomérat s'opère alors par éclatement sans qu'il soit nécessaire d'envisager un apport d'énergie au système sol-eau. Cependant lors du test, une énergie cinétique importante est apportée au système par agitation mécanique. L'éclatement n'est donc pas dans ce cas le seul processus destructeur, mais les prétraitements mis en oeuvre permettent de mettre plus ou moins en valeur chacun des deux processus élémentaires qui interviennent lors d'une telle imbibition (diminution de cohésion et compression de l'atmosphère interne): le prétraitement alcool minimise les effets d'éclatement qui sont au contraire maximisés après prétraitement benzène dans le cas des terres pauvres en matière organique ; alors que le prétraitement air correspond, à l'agitation près, aux conditions de référence du schéma de HENIN-YODER.

On peut se demander dans quelle mesure les taux d'agrégats stables obtenus à l'issue de ces procédures, pourraient être utilisés comme indicateurs des masses de terre mobilisables sous l'effet d'une pluie donnée. Or, au champ les conditions de mise en contact de l'eau avec les fragments terreux sont très différentes :

- a) - l'apport d'eau libre est réparti en une multitude de gouttes de taille millimétrique alors que les fragments terreux sont souvent de taille plus importante. Sauf excès d'eau brutal il leur est donc impossible de se trouver instantanément en contact avec de l'eau libre sur toute leur périphérie.
- b) - les fragments sont souvent déjà humides lors d'une pluie ce qui signifie que le volume d'air susceptible d'être emprisonné est réduit,

- c) - Sous la pluie les fragments terreux subissent le choc des gouttes, chaque impact pouvant être caractérisé par une certaine énergie cinétique (ou encore par une certaine quantité de mouvement et un certain temps d'application de la contrainte). A première vue cette énergie est à rapprocher de celle qui s'exerce sur les fragments terreux au cours des agitations que comportent les tests mais les modalités d'apport sont très différentes et les niveaux quantitatifs très difficiles à comparer.

On peut donc supposer que, pour un sol soumis à des pluies naturelles :

- la fréquence et l'intensité du phénomène d'éclatement sont en moyenne réduites et surtout beaucoup plus variables que dans les conditions idéales du schéma de HENRI YODER,
- les deux facteurs principaux de cette variabilité seront la taille des fragments et leur état hydrique lors des pluies. Ce dernier point est corroboré par les résultats rapportés dans le chapitre précédent : à un moment donné les échantillons les plus secs ont été brutalement dégradés alors que les échantillons humides ont subi une dégradation progressive et beaucoup moins accentuée.
- les taux d'agrégats stables après prétraitement air et alcool représentent par rapport aux conditions naturelles deux références opposées correspondant à une intervention respectivement maximum et minimum du phénomène d'éclatement.

En définitive, la transposition au champ des connaissances et des méthodes acquises sur la désagrégation nous impose d'obtenir deux séries d'éléments.

- . la vérification des hypothèses énoncées ci-dessus. Il s'agit notamment de s'assurer que l'apport d'eau sous forme de gouttes peut entraîner les mêmes effets que l'imbibition réalisée lors des tests d'analyse d'agrégats autrement dit que la pluie peut ou non provoquer l'éclatement selon l'état de la terre ;
- . une meilleure connaissance de ce qui se produit dans les situations intermédiaires entre celles des tests après prétraitement eau et alcool, et où les conditions sont moins bien définies et beaucoup plus variables que dans les conditions de référence.

L'histoire hydrique et la taille des fragments sont à cet égard les deux principaux aspects à considérer mais doivent être re-situés dans le problème plus général du remaniement des échantillons avant réalisation du test, qui outre ces deux paramè-

tres modifie aussi l'état et la nature des surfaces au niveau desquelles s'établit le contact terre-eau.

2.2. - EFFETS DES IMPACTS DE GOUTTES A FAIBLE ENERGIE CINETIQUE

2.2.1. - Démarches entreprises

Il s'agit ici de vérifier que l'effet de la chute des gouttes sur le sol est bien redevable du schéma de HENIN-YODER.

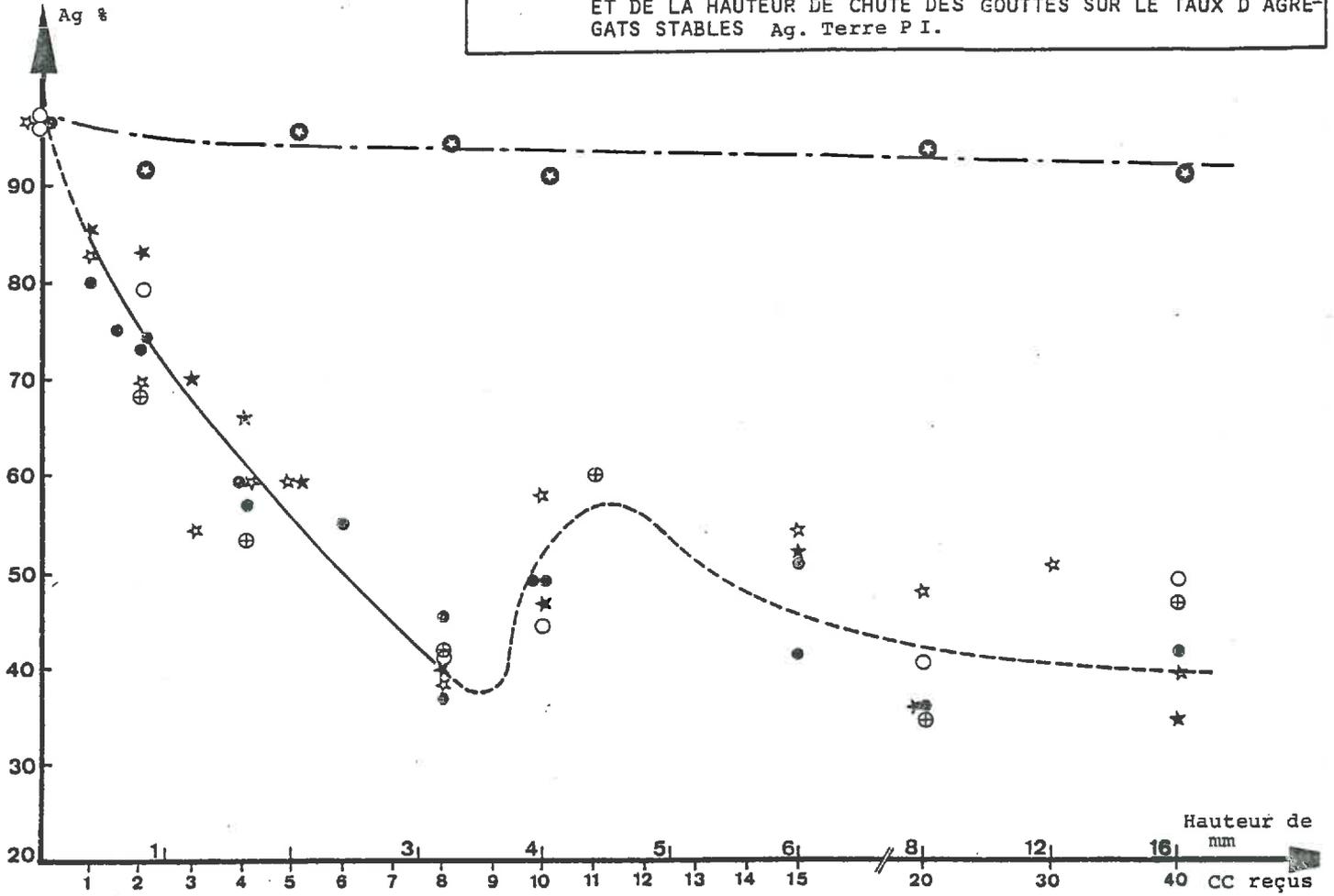
Les expériences réalisées dans ce but ont été basées sur une procédure simplifiée utilisée lors des premières étapes des recherches sur l'érosion (Mc CALLA 1944 ; VILENSKY, 1934). Elle consiste à soumettre des échantillons de terre aux impacts de gouttes formées à partir d'une burette. Ce dispositif permet de fixer la taille et la hauteur de chute des gouttes, celle-ci ne pouvant varier que dans une gamme assez restreinte ce qui entraîne des énergies cinétiques individuelles très faibles par rapport aux gouttes des pluies naturelles.

Les échantillons de terre, d'environ 10 g sont constitués d'agrégats non remaniés mais calibrés en différentes classes (toujours au-dessus de 1 mm), placés au sein d'un petit anneau de polystyrène de 1 cm de haut et 25 cm² de surface.

L'ensemble est posé sur la toile d'un tamis à maille carrée de 0,2 mm de côté. Le volume des gouttes est de 0,5 cm³ (soit un diamètre d'environ 5 mm ce qui correspond aux plus grosses gouttes de pluie naturelle). Elles sont émises à un rythme de 1 par seconde environ et pendant ce temps l'échantillon est déplacé de manière à ce que les impacts soient répartis de façon aussi homogène que possible. Pour un certain volume écoulé on interrompt la chute de gouttes, le tamis portant l'échantillon est alors placé dans un cristalliseur rempli d'alcool éthylique et agité grâce à l'appareil de FEODOROFF (1969). Cette opération⁽¹⁾ permet de séparer les fractions "désagrégées" et "stables"

(1) Inspirée directement de la méthode préconisée par MONNIER et BUI HUU TRI (1971) pour étudier la répartition dimensionnelle des fragments au sein d'échantillons de sol non remaniés.

FIG 46 : INFLUENCE DU VOLUME D'EAU RECU, DE L'ETAT HYDRIQUE INITIAL ET DE LA HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES SUR LE TAUX D'AGREGATS STABLES Ag. Terre P I.



	ETAT HYDRIQUE INITIAL		HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES (cm)
	SEC	SATURE	
POINTS EXPERIMENTAUX	★		30
	⊙		20
	☆	⊕	10
	⊕		5
	○		0
COURBES MOYENNES AJUSTEES	————		AJUSTEMENT STATISTIQUE
	- - - - -	- - - - -	AJUSTEMENT GRAPHIQUE

de l'échantillon (c'est à dire constituées de fragments dont le calibre à l'issue de l'épreuve est respectivement inférieur ou supérieur à 0,2 mm) avec le minimum de destruction supplémentaire. La fraction qui reste sur le tamis est séchée et pesée, et exprimée en taux "d'agrégats stables" par rapport à la prise d'essai. En soumettant à un nombre variable de gouttes plusieurs échantillons de la même terre préparés de la même façon on obtient une courbe de variation du taux d'agrégats stables (Ag) en fonction du volume versé (v) qui peut être comparée à d'autres courbes correspondant à des terres, à des modalités de préparation ou à des hauteurs de chute différentes.

2.2.2. - Allure générale de la désagrégation ; influence de la hauteur de chute des gouttes et de l'état hydrique de la terre

Dans un premier groupe des tests les variantes expérimentales portent sur la hauteur de chute des gouttes (0 à 30 cm). Les échantillons de sol proviennent du Bloc I de Palaiseau. Ils sont calibrés entre 1 et 2 mm et secs au départ. Un deuxième groupe de tests est réalisé à partir d'un échantillon de la même terre préalablement humectée par capillarité pour éviter tout effet d'éclatement, la hauteur de chute étant alors fixée à 20 cm. Enfin, un troisième groupe de tests met en comparaison différentes terres, provenant de Palaiseau (Bloc I et II) et de Montluel (Rotations A et C).

L'évolution du taux d'agrégats de calibre supérieur à 0,2 mm en fonction du volume d'eau apporté est représentée sur la Fig. 46 pour la terre de Palaiseau Bloc I, sur laquelle on détient les résultats les plus détaillés ; on note les tendances suivantes :

- il y a un contraste total entre les comportements des échantillons respectivement secs et humides au départ, ces derniers restant pratiquement intacts alors que les premiers subissent une désagrégation importante.
- dans ce dernier cas le taux d'agrégats stables décroît d'abord rapidement en fonction du volume reçu puis atteint un premier minimum pour environ 8 cc reçus. C'est généralement à peu près à ce moment qu'apparaît un plan d'eau libre à la surface de l'échantillon. On note un petit accroissement du taux d'agrégats supérieurs à 0,2 mm, qui décroît ensuite à nouveau mais beaucoup plus lentement et se stabilise à des valeurs de l'ordre de 40 %.

FIG 47 : INFLUENCE DU VOLUME D'EAU RECU, DE LA TAILLE DES FRAGMENTS ET DE LA HAUTEUR DE CHUTE DES GOUTTES SUR LE TAUX D'AGREGATS STABLES.

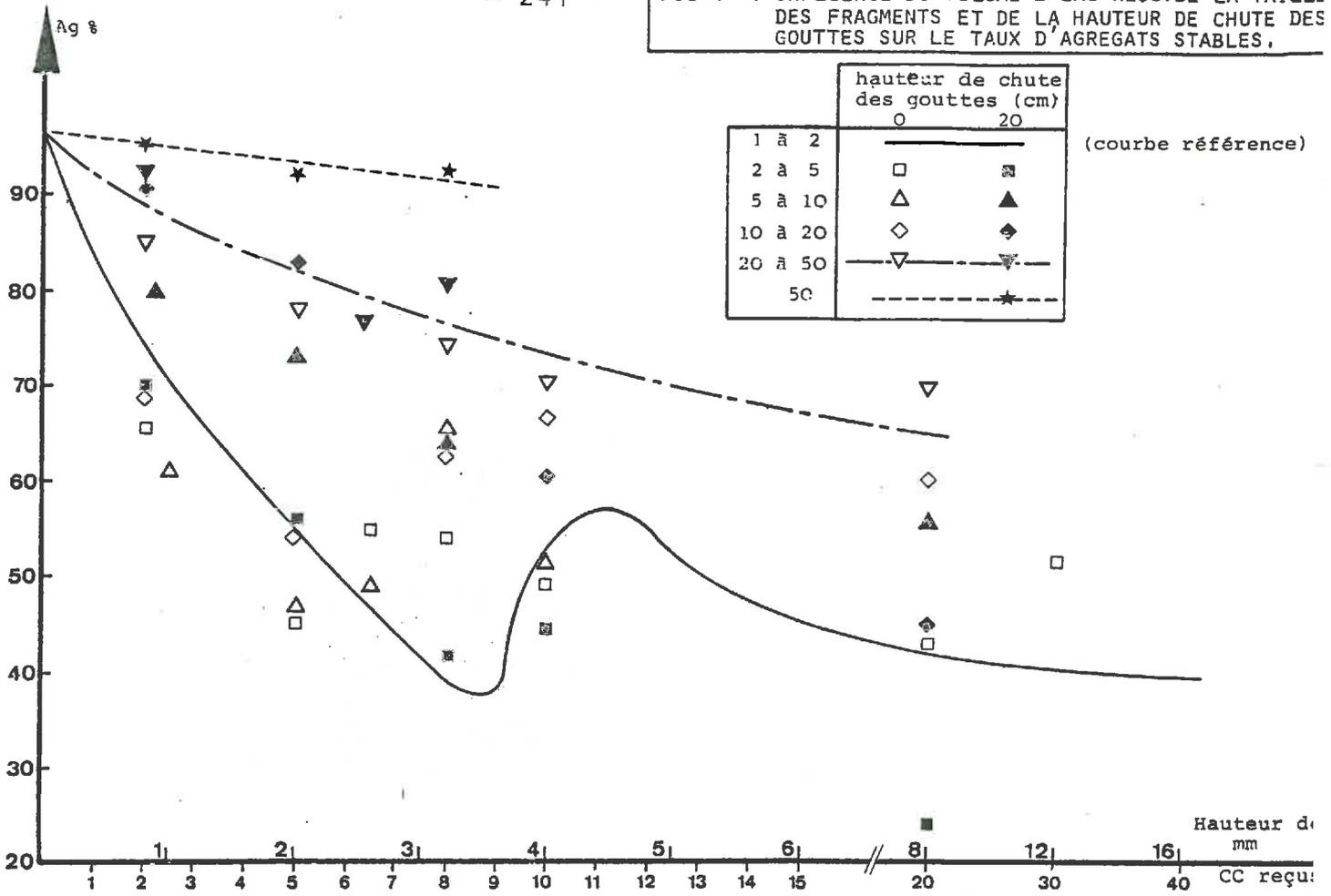
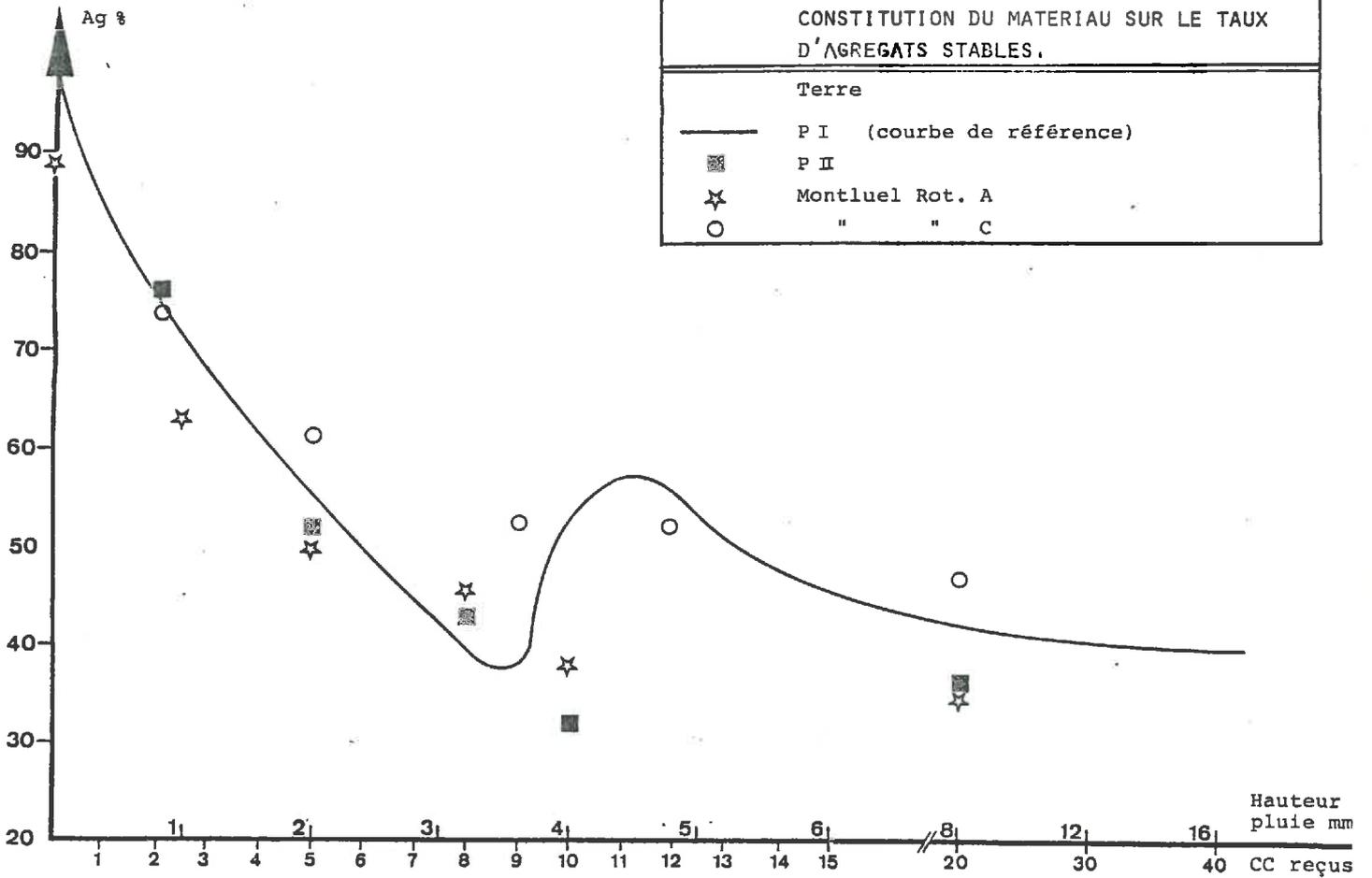


FIG 48 : INFLUENCE DU VOLUME D'EAU RECU ET DE LA CONSTITUTION DU MATERIAU SUR LE TAUX D'AGREGATS STABLES.



- La hauteur de chute des gouttes n'a apparemment aucune influence sur le début de la désagrégation⁽¹⁾. Celle-ci se manifeste pratiquement avec la même intensité si les gouttes sont reçues avec une énergie cinétique nulle. Le classement des taux d'agrégats stables obtenus pour le volume écoulé le plus élevé autorise à penser, sans qu'on puisse l'affirmer⁽¹⁾, que l'énergie cinétique a peut-être une certaine influence sur la désagrégation finale lorsque les teneurs en eau sont très fortes

Enfin, on peut définir pour la terre étudiée une courbe de référence relative aux échantillons calibrés de 1 à 2 mm et secs au départ, mais indépendante de l'énergie cinétique des gouttes dans la gamme de hauteurs de chute testée. Cette courbe est constituée de deux branches dont la première s'ajuste étroitement à une exponentielle d'équation

$$Ag = 93,3 e^{-0,105 v} \quad (r^2 = 0,94 \text{ pour } 34 \text{ résultats, } Ag \text{ en } \% \text{ et } v \text{ en } cm^3)$$

Pour les autres terres les résultats (Fig. 48) sont moins complets mais n'apportent aucune contradiction par rapport à l'allure générale décrite ci-dessus. On note que les résultats obtenus pour les volumes écoulés les plus importants se classent⁽¹⁾ à peu près conformément aux taux d'agrégats stables après prétraitement air, tout en étant nettement plus élevés.

2.2.3. - Influence de la taille des fragments

Pour ce groupe de tests les variantes portent sur le calibre des fragments et à nouveau sur la hauteur de chute des gouttes (0 ou 20 cm). Les fragments sont secs au départ et la terre provient du Bloc I de Palaiseau. Les résultats sont reportés sur la Fig. 47 qui fait apparaître :

- à nouveau une absence d'influence de la hauteur de chute des gouttes,
- une influence nette de la taille des fragments, la désagrégation apparaissant d'autant moins intense que celle-ci est plus importante : sur des fragments de l'ordre de 50 mm, la décroissance du taux d'agrégats supérieurs à 0,2 mm est presque insensible.

(1) Cf. annexe 22 pour les résultats détaillés (analyse de covariance).

2.2.4. - Discussion

Les résultats enregistrés s'expliquent de manière cohérente à la lumière du schéma de HENIN-YODER.

Lorsque les fragments sont de suffisamment petite taille par rapport à celle des gouttes, et tant qu'ils ne sont pas saturés, il y a piégeage et compression d'air ; ceci rend compte à la fois de l'interruption du régime de désagrégation rapide à partir de la saturation du massif et de la différence de comportement entre les échantillons secs et humides. L'absence d'influence de l'énergie cinétique est cohérente avec le fait que ce paramètre n'intervient pas dans le mécanisme physique de l'éclatement. Il n'est pas exclu qu'un apport d'énergie cinétique favorise la division des fragments en sus de l'éclatement mais on peut penser que ce rôle additionnel est très restreint dans nos conditions d'expérience compte tenu des faibles hauteurs de chute : l'existence d'une deuxième étape de désagrégation des échantillons, au cours de laquelle la destruction est beaucoup moins intense, peut précisément être imputée à la division mécanique sans éclatement d'un massif de très faible cohésion. La diminution des taux d'agrégats stables ainsi obtenue est très faible ce qui à nouveau peut être attribué au fait que les énergies appliquées sont d'un ordre de grandeur très inférieur à celles exercées lors d'un test avec prétraitement alcool qui élimine lui aussi les effets d'éclatement. Cette comparaison ne peut être étendue aux pluies naturelles dont les gouttes présentent des énergies individuelles de l'ordre de 20 à 30 fois supérieures à celles obtenues ici pour les plus fortes hauteurs de chute.

L'augmentation du taux d'agrégats de calibre supérieur à 0,2 mm qui se produit après la décroissance rapide, est probablement due à une certaine reprise en masse au sein de l'échantillon. Celle-ci est très nette si on laisse sécher l'échantillon entre le test et le tamisage dans l'alcool. Cependant, le fait que ce phénomène puisse intervenir de manière plus nette à un stade particulier de la dégradation reste non expliqué.

En définitive, ces résultats présentent une similitude remarquable avec les observations faites à partir du comportement d'échantillons exposés aux pluies naturelles. Ils montrent le rôle à la fois variable et très important du processus d'éclatement dans la désagrégation provoquée par les gouttes de pluie, en étroite relation avec l'état hydrique et le calibre des fragments terreux.

2.3. - ETUDE DE CERTAINES CONDITIONS DE SENSIBILITE DES FRAGMENTS A LA DESAGREGATION

2.3.1. - Démarches entreprises

Dans cette deuxième série d'expériences nous avons cherché à mettre en évidence de manière plus précise et plus continue l'influence de conditions qui sont au champ à la fois les plus variables et, en moyenne, les plus contrastées par rapport aux conditions de référence du schéma de HENIN-YODER. Nous appuyant sur la cohérence des résultats obtenus lorsque l'apport d'eau est réalisé sous forme de gouttes ou par submersion de l'échantillon, nous sommes revenu au protocole standard du test d'analyse d'agrégats. Celui-ci est en effet plus commode à mettre en oeuvre que le test basé sur la chute des gouttes et aussi moins contingent vis à vis des différentes conditions expérimentales (disposition des fragments, rapidité de ressuyage de l'échantillon, vitesse d'émission des gouttes).

Les facteurs de variation étudiés ont été :

- a) - l'état hydrique des échantillons lors de la submersion qui constitue la première étape du test. Dans ce cas, les fragments testés sont des agglomérats remaniés (forçage à 2 mm après prélèvement et séchage puis élimination de la fraction inférieure à 0,2 mm).

Les prises d'essais (2 fois 5 g) sont étalées sur un disque de papier filtre et humectées par capillarité par l'intermédiaire d'une mèche. Les teneurs en eau ainsi atteintes sont de l'ordre de 40 à 50% sans qu'aucune désagrégation n'ait lieu. On laisse ensuite les échantillons se dessécher progressivement à l'atmosphère du laboratoire et à intervalles réguliers on interrompt le séchage. Sur une moitié de l'échantillon on dose l'humidité, l'autre étant immédiatement soumise au test d'analyse d'agrégats. On obtient ainsi un ensemble de couples taux d'agrégats stables-teneur en eau sur une gamme de teneurs allant de 0 à 50 %, et pour 4 types de terre (Palaiseau Bloc I et II, Montluel rotations A et C⁽¹⁾).

(1) Ce protocole est très voisin de celui mis en oeuvre dans un but similaire par HENIN (1939, cité dans HENIN, 1976). Il complète l'approche de cet auteur en étudiant toute la gamme de variation des teneurs en eau pour 4 terres.

b) - Le calibre des fragments

Ayant constaté l'influence de ce paramètre lorsque l'apport d'eau est sous forme de gouttes, nous avons voulu la vérifier en conditions de submersion totale des fragments. Pour cela, nous avons soumis au test des fragments non remaniés et correspondant à différentes classes de calibres, prétraités ou non à l'alcool éthylique.

Nous avons ensuite cherché à contrôler si l'effet calibre est ou non lié à des caractéristiques de micro-organisation du matériau au sein des fragments (par exemple à une compacité et une cohésion plus importantes au sein des plus gros fragments qui sont souvent issus de zones tassées au champ). Ceci nous a amené à fragmenter des mottes de calibre variable et à soumettre au test des agrégats de même calibre (1 à 2 mm), en comparant les résultats en fonction de la taille des mottes d'origine.

c) - L'histoire et le degré de remaniement des fragments

Pour étudier cet aspect nous avons soumis au test des fragments de la même classe de calibre (0,2 à 2 mm) et de la même terre, mais remaniés ou non et dans ce dernier cas provenant soit de la surface au sens strict, soit de la couche immédiatement sous-jacente. Le principal facteur de différenciation entre ces deux situations est en première approche l'amplitude et la fréquence des alternances humectation-dessiccation subies par la terre.

2.3.2. - Influence de l'état hydrique des fragments

A/ - Résultats

Ils sont reportés sur les Fig. 49 a à d qui correspondent respectivement aux 4 terres précédemment mentionnées. Celle-ci montrent qu'il existe une relation étroite entre le taux d'agrégats stables et la teneur en eau des fragments, et que cette relation présente une allure commune dans tous les cas. Aux plus faibles humidités, les taux d'agrégats stables sont minimum et très voisins des témoins après prétraitement air ce qui démontre que l'humectation-dessiccation n'a pas été en elle-même destructrice. Lorsque la teneur en eau croît le taux d'agrégats stables augmente plus ou moins rapidement selon les terres jusqu'à un maximum assez nettement supérieur

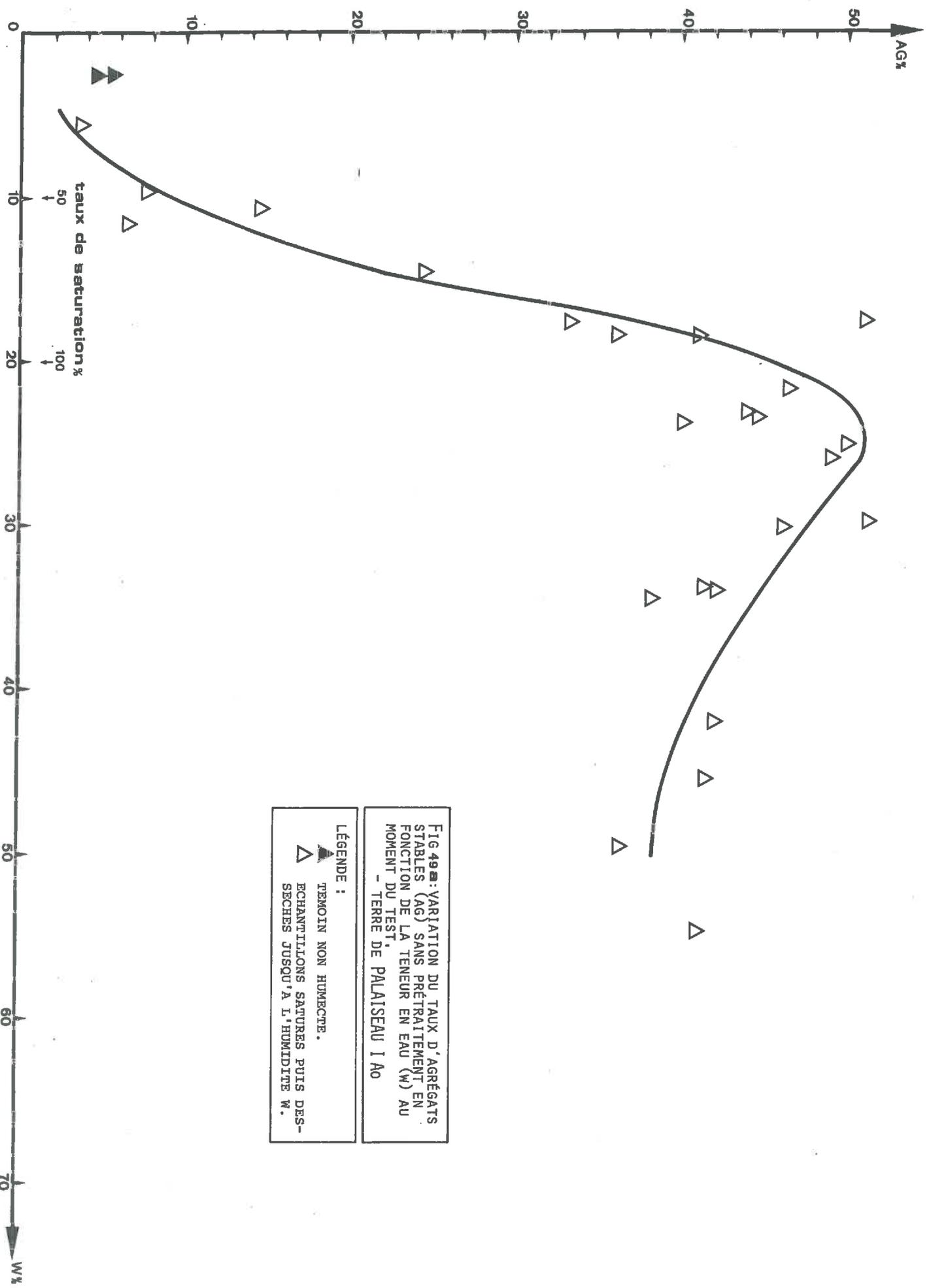


FIG 49a: VARIATION DU TAUX D'AGRÉGATS STABLES (AG) SANS PRÉTRAITEMENT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU (W) AU MOMENT DU TEST.
 - TERRE DE PALAISEAU 1 A0

LÉGENDE :

- ▲ TEMOIN NON HUMECTÉ.
- △ ECHANTILLONS SATURÉS PUIS DES-SECHÉS JUSQU'À L'HUMIDITÉ W.

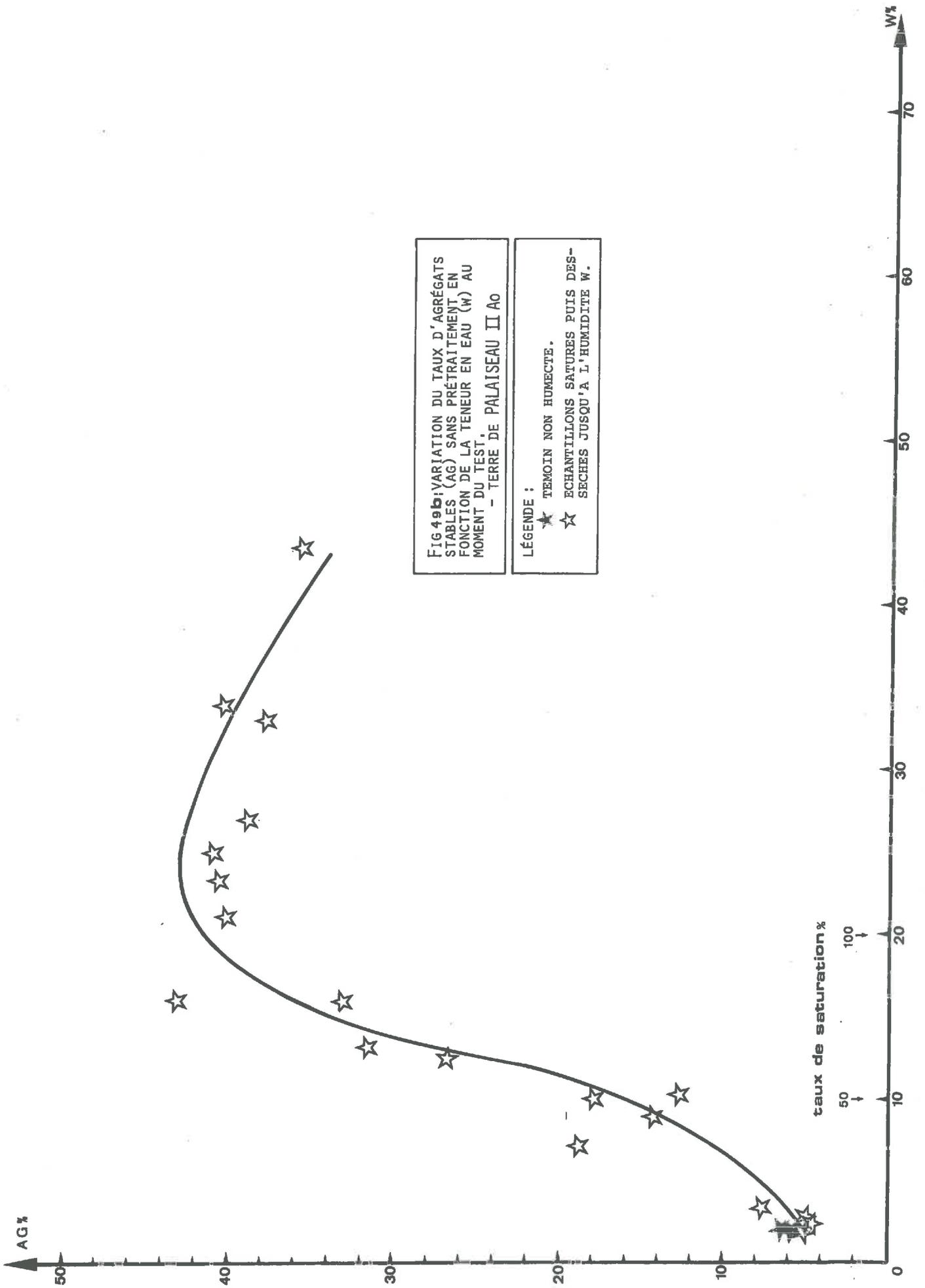


FIG 49b: VARIATION DU TAUX D'AGRÉGATS STABLES (AG) SANS PRÉTRAITEMENT EN FONCTION DE LA TENEUR EN EAU (W) AU MOMENT DU TEST, - TERRE DE PALAISEAU II A0

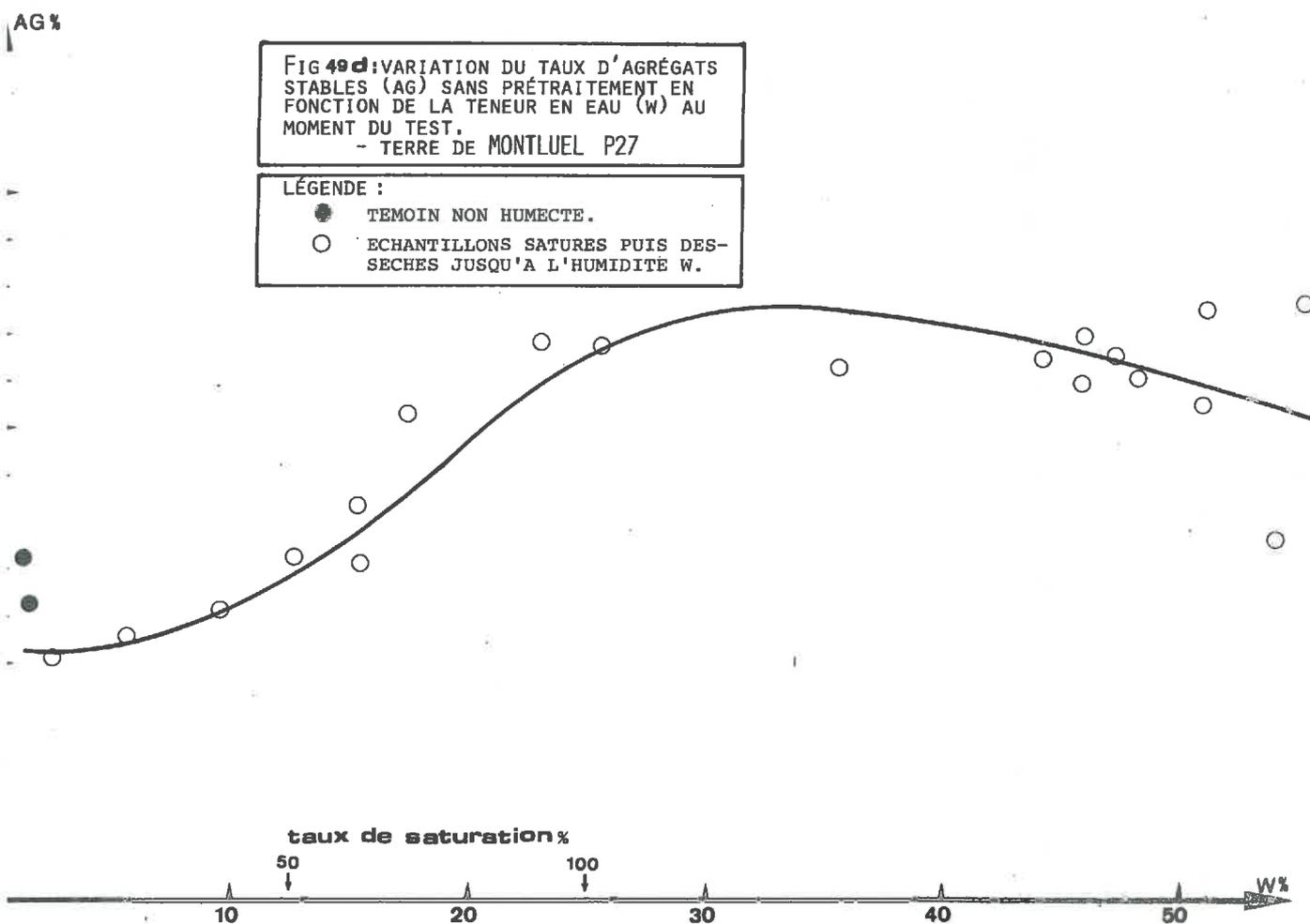
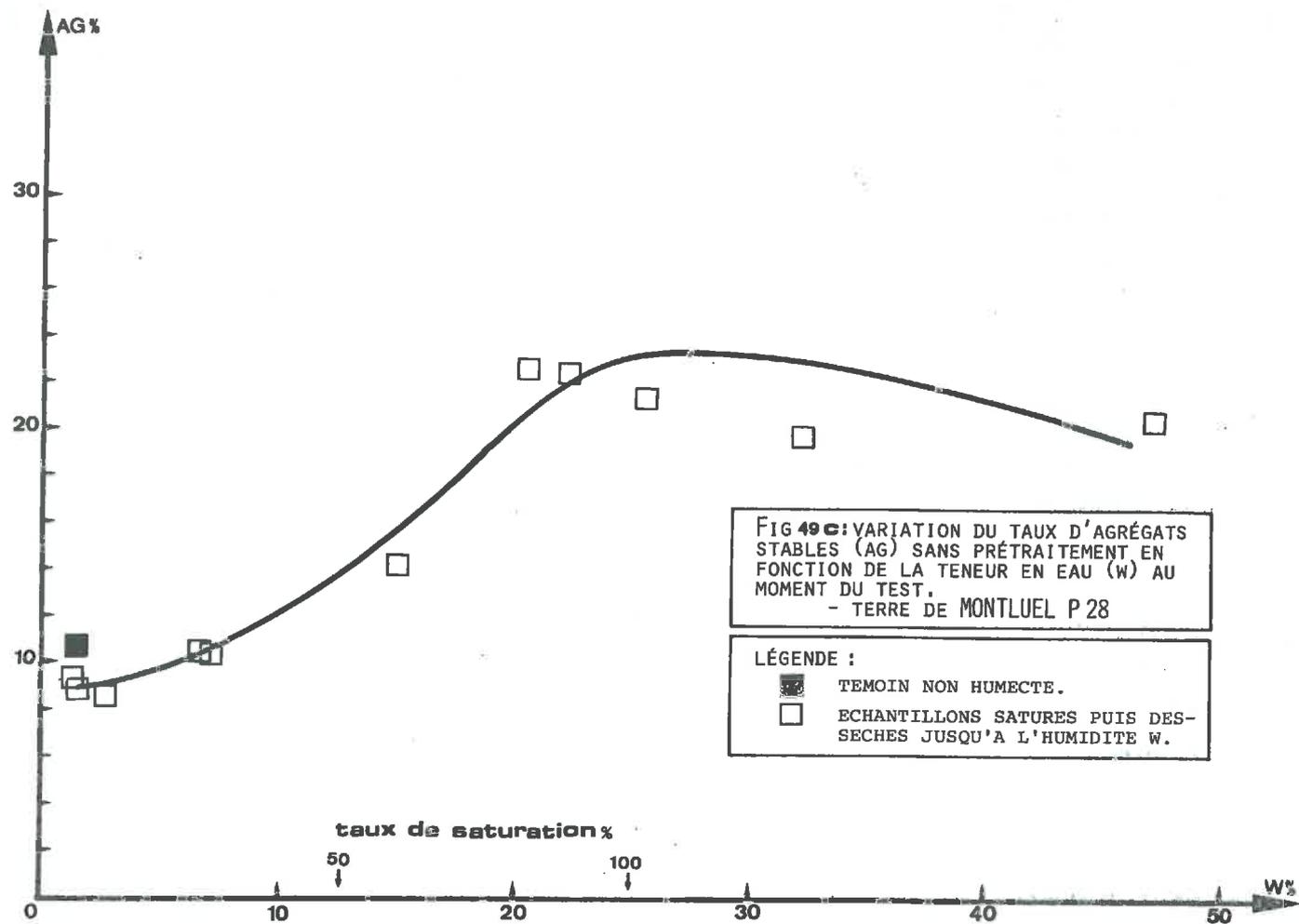
LÉGENDE :

- ★ TEMOIN NON HUMECTÉ.
- ☆ ÉCHANTILLONS SATURÉS PUIS DES-SECHÉS JUSQU'À L'HUMIDITÉ W.

taux de saturation %

100 ↓

50 ↓



dans tous les cas au taux d'agrégats stables après prétraitement alcool. Il est atteint pour des teneurs en eau de l'ordre de 20 % (cas des terres de Palaiseau) à 25 % (cas des terres de Montluel). Aux plus fortes teneurs en eau les taux d'agrégats semblent diminuer à nouveau mais l'amplitude de cette variation est beaucoup plus restreinte, celle-ci n'étant indiscutable que sur la Fig. 49 a .

Entre les différentes terres, les classements des taux d'agrégats stables obtenus diffèrent selon la gamme de teneur en eau considérée :

- pour les teneurs en eau très faibles, les classements sont conformes à ceux des taux d'agrégats conventionnels après prétraitement air. On a le classement suivant (par ordre décroissant): Montluel Rot. C ; Montluel Rot A ; Palaiseau B II, Palaiseau B I.
- pour les teneurs en eau de plus de 10 % (et surtout de la gamme 20-25 %) les classements sont conformes à ceux des taux Ag A (prétraitement alcool), on a alors le classement : Palaiseau BI, Palaiseau B II, Montluel C, Montluel A.

B/ - Discussion

Convergents avec ceux obtenus par HENIN (1939), ces résultats mettent à nouveau clairement en évidence le rôle important du processus d'éclatement et permettent de mieux décrire l'influence de la teneur en eau des fragments. Pour cela il est utile de convertir ce paramètre en taux de saturation des agglomérats, grâce aux déterminations de densité texturale. Cette conversion est réalisée sur l'abscisse des Fig. 49.

Si la porosité interne aux agrégats est remplie d'air lors de l'imbibition, l'effet d'éclatement est maximum. Dans ces conditions la stabilité structurale de la terre peut effectivement être considérée comme une résultante de sa cohésion à l'état humide et de la mouillabilité.

Au contraire, lorsque les agrégats sont saturés, les taux d'agrégats stables sont maximum et on peut admettre que l'effet d'éclatement est annulé. Il y a cependant, même dans ces conditions, une désagrégation importante, qui doit être imputée aux opérations d'agitation mécanique qui ont lieu au cours du test d'analyse d'agrégats. Il est logique que les variations de stabilité structurale des matériaux reflètent alors principalement celles de la cohésion de terre humide. La décroissance plus ou moins nette des taux d'agrégats stables

pour des teneurs en eau plus importantes suggère un effet destructeur mécanique des opérations de transvasement et de submersion des échantillons qui serait favorisé par la très faible cohésion des fragments. On peut remarquer que c'est précisément dans cette gamme de teneur en eau que doit intervenir le gonflement des agglomérats, puisque pour un matériau à retrait simple, la limite de retrait coïncide avec la teneur en eau la plus faible entraînant la saturation.

Dans l'intervalle de teneurs en eau compris entre l'état sec et la saturation des fragments, la masse de terre concernée par le processus d'éclatement semble varier de manière continue.

A partir de ces résultats, on peut dire que la probabilité de réalisation du processus d'éclatement en un site donné dépend bien entendu d'abord du climat, mais aussi de la teneur en argile du sol : sur le site de Palaiseau les fragments sont beaucoup plus souvent saturés ou très proches de la saturation que sur le site de Montluel. Ceci tient au fait qu'un accroissement de teneur en argile entraîne à la fois un décalage de la courbe potentiel-humidité (vers des humidités plus élevées pour un potentiel donné) et une augmentation de la densité texturale, c'est-à-dire une diminution du volume potentiel d'air emprisonné au sein des fragments.

Nous reviendrons en conclusion de ce chapitre sur les conséquences très importantes de ces résultats quant aux relations à établir entre la stabilité structurale et le comportement du sol in situ.

2.3.3. - Influence du calibre des fragments

A/ - Résultats

La mise en évidence proprement dite d'une relation entre taux d'agrégats stables et calibre des fragments a fait l'objet de trois groupes de tests dont les résultats détaillés et l'analyse statistique figurent en Annexe 23. La Fig. 50 présente la tendance générale qui ressort de ces résultats. Pour en obtenir une représentation unique alors que ceux-ci ont été acquis à partir d'échantillons de provenance différente on a indexé pour chaque provenance l'ensemble des taux d'agrégats stables sur ceux des fragments de 1 à 2 mm et indiqué les valeurs moyennes de ces indices (calculées à partir de plusieurs provenances) pour l'abscisse correspondant au centre de la classe de calibre. Les taux d'agrégats stables augmentent très sensiblement avec le calibre moyen D et cette relation est d'allure curvilinéaire⁽¹⁾. Cette

(1) elle s'ajuste à une fonction $y = 98 D^{0,27}$ ($r = 0,89$ pour 16 couples).

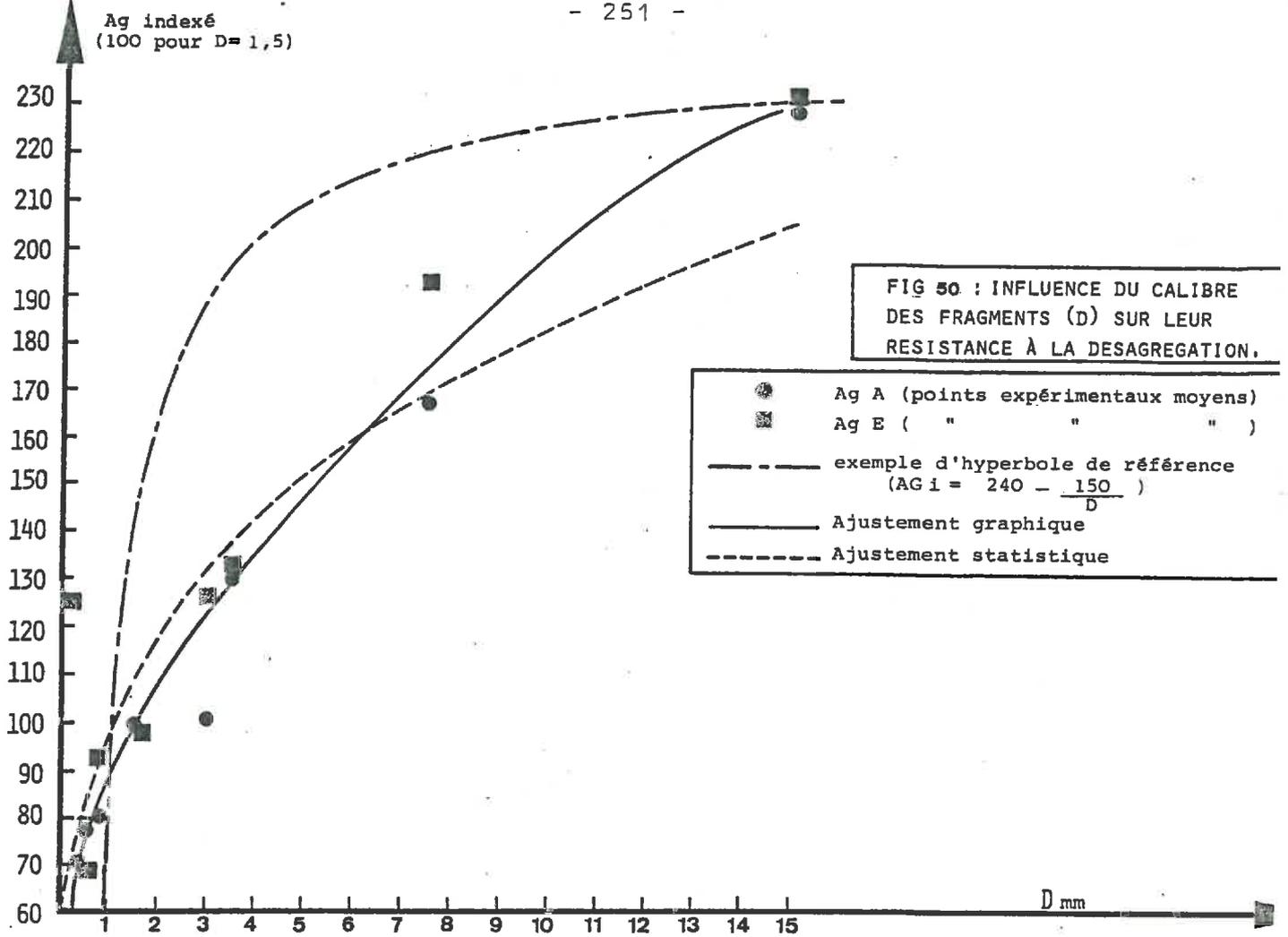


TABLEAU.47.- INFLUENCE DU CALIBRE DES FRAGMENTS PRELEVES SUR LA STABILITE D'AGREGATS REMANIES (calibrés de 1 à 2 mm).

PRETRAITEMENT	CLASSES DE CALIBRE (mm) DES FRAGMENTS D'ORIGINE						
	1-2	2-4	4-6	6-10	10-20	20-50	> 50
ALCOOL (Ag A) (1)	159	132	125	114	100	100	(78)
AIR (Ag E) (1)	138	133	129	118	100	100	(64)

(1) Valeurs des taux d'agrégats indexées sur la classe 20-50 mm.
Moyennes de 6 à 8 résultats sauf valeurs entre parenthèses (1 seul résultat).

tendance se retrouve systématiquement pour chaque provenance d'échantillon mais avec une ampleur variable ; il ne faut donc pas donner une valeur de prédiction aux courbes moyennes de la Fig. 50.

Par contre, lorsqu'on soumet au test des fragments remaniés de même calibre, mais provenant de fragments de calibres différents lors du prélèvement, on observe (Tab. 47), une tendance inverse : les taux d'agrégats stables sont d'autant plus faibles que le calibre des fragments d'origine est plus important.

B/ - Discussion

Il apparaît clairement que l'augmentation de la résistance à la désagrégation lorsque croît la taille des fragments n'est pas liée à l'acquisition de propriétés particulières par le matériau au cours de la formation de ces fragments. Il faut donc considérer plutôt la manière dont s'opère l'imbibition et dont s'exercent les contraintes qui en résultent.

Si ces contraintes s'exerçaient de telle sorte que la désagrégation se réalise de manière homogène au sein du fragment, on aurait à priori (Ag_i étant le taux d'agrégats stables indexé par rapport à un calibre de référence) :

$$Ag_E = Cte ; Ag_A = Cte ; \text{ donc } Ag_i = 100$$

Si ces contraintes s'exerçaient au contraire exclusivement à la périphérie du fragment, on pourrait supposer que la masse de terre désagrégée m_d à partir d'une masse initiale m_i serait proportionnelle à la surface de contact entre la terre et l'eau, d'où :

$$Ag_{(E \text{ ou } A)} = \frac{m_i - m_d}{m_i} = 1 - \frac{\alpha D^2}{\beta D^3} \quad \text{et} \quad Ag_i = a + \frac{b}{D}$$

α, β, a, b , étant des constantes caractéristiques du matériau. On peut déterminer les constantes a et b de telle sorte que cette fonction passe au point de coordonnées (230 ; 15) obtenu expérimentalement. On constate alors (Fig. 50) que la courbe ainsi déterminée présente une allure très différente de la courbe expérimentale et il en va en fait de même de toute fonction hyperbolique, qui implique une augmentation du taux d'agrégats en fonction du calibre beaucoup plus rapide que celle observée.

TABLEAU. 48.- INFLUENCE DU REMANIEMENT ET DE LA LOCALISATION DES FRAGMENTS DANS LE PROFIL SUR LE TAUX D'AGREGATS STABLES.

		PRETRAITEMENT	ALCOOL (Ag A)			AIR (Ag E)		
			R	NR		R	NR	
		LOCALISATION DANS LE PROFIL (2)	S	S	CSJ	S	S	CSJ
SITE de PRELEVEMENT	PALAISEAU	Moyenne %	24,8	25,3	19,7	5,5	9,2	6,0
		Ecart-type %	4,24	3,40	2,81	0,44	1,23	0,54
		Nombre de résultats	9	12	13	10	13	13
	MONTLUEL	Moyenne %	16,4	18,0	16,7	10,6	12,9	11,0
		Ecart-type %	3,41	5,76	4,96	2,55	5,79	1,82
		Nombre de résultats	18	52	12	18	52	12

- (1) R = Fragments de tous calibres broyés à sec à 2 mm puis calibrage 0,2 à 2 mm
 NR = Sélection des fragments calibrés entre 0,2 et 2 mm
- (2) S = Fragments prélevés immédiatement en surface ; CSJ = fragments prélevés dans les couches sous-jacentes (profondeur 9 à 10 cm)

TABLEAU 49.- INTERACTION ENTRE REMANIEMENT, LOCALISATION DES FRAGMENTS ET HISTOIRE STRUCTURALE VIS A VIS DE LA STABILITE STRUCTURALE (AgE) Site de Montluel.

		REMANIEMENT DES FRAGMENTS(1)	R	NR	
			S	S	CSJ
		LOCALISATION DANS LE PROFIL(2)	S	S	CSJ
PARCELLES de ROTATION	A (Pailles enlevées sans prairie)	Moyenne %	9,78	9,48	9,18
		Ecart-type %	1,32	1,41	2,28
		Nombre de résultats	8	24	4
	C (Pailles enlevées avec prairie dans la rotation)	Moyenne %	11,59	16,38	10,48
		Ecart-type %	3,45	6,87	0,86
		Nombre de résultats	8	24	4

(1) et (2) Cf. notes du Tableau 48

Les points expérimentaux se situent de façon intermédiaire entre ces deux références extrêmes ce qui suggère que la désagrégation est effectivement plus poussée, mais non strictement limitée, à la périphérie des fragments.

Il paraît logique que les contraintes subies par le matériau soient plus fortes à la périphérie des fragments : d'une part la pénétration des ménisques s'y réalise probablement à une vitesse plus importante ; d'autre part, c'est bien à la périphérie des fragments que s'exercent les chocs et les frottements occasionnés par l'agitation dans la phase liquide que comporte le test. Cependant la surface d'imbibition initiale des fragments peut comprendre non seulement la périphérie, mais aussi certaines surfaces internes rapidement en contact avec l'eau par l'intermédiaire d'une porosité structurale (trous, fissures) qui est à première vue d'autant plus importante que le calibre est plus gros.

Sous la pluie, la surface de contact entre la terre et l'eau n'est strictement déterminée par la taille des fragments que si celle-ci est plus petite ou de même ordre de grandeur que celle des gouttes. Cette condition ne s'applique évidemment qu'à la terre fine. Pour les fragments les plus grossiers c'est la taille des gouttes qui détermine la surface de contact et on peut alors penser que l'effet du calibre sur la variabilité des masses de terre mobilisée, disparaît ou est très atténué.

Il faut rappeler à cet égard que d'après nos observations au champ, l'effet du calibre des fragments se traduit non pas par une différence de vitesse de croissance de l'indicateur D_{lim} (qui permettrait d'invoquer une différence de quantité de terre mobilisée) mais par une différence de vitesse d'extension des plaques continues, suite à une même variation de D_{lim} : c'est donc avant tout l'aspect morphologique (géométrie des interstices) qui est ici en cause. Il n'en demeure pas moins qu'une quantité initiale importante de terre très fine, situation que nous n'avons pas vraiment obtenue dans les expériences réalisées mais qui se rencontre souvent dans la pratique, constitue d'après nos résultats un facteur indéniable de sensibilité à la désagrégation.

2.3.4. - Influence de la localisation des fragments dans le profil et de leur remaniement

A/ - Résultats

Ils sont présentés de manière synthétique dans le Tableau 48. En considérant les taux d'agrégats stables après prétraitement air (Ag E), on constate que les échantillons remaniés

présentent des valeurs moyennes et des dispersions :

- voisines de celles calculées pour les échantillons non remaniés provenant des couches situées sous la surface
- mais inférieures à celles relatives aux échantillons non remaniés prélevés en surface. On retrouve la tendance indiquée précédemment (Tab. 47).

Après prétraitement alcool (Ag A) les tendances sont moins convergentes d'un site à l'autre et moins marquées, les différences n'étant pas significatives sur le plan statistique.

A partir d'un examen plus détaillé des données relatives au site de Montluel (Tab. 49), on constate que le contraste entre échantillons remaniés et non remaniés et provenant de surface, dépend du régime d'entretien organique subi par le sol : la différence des taux d'agrégats stables (Ag E) entre ces deux types d'échantillons est très accusée dans le cas des parcelles ayant porté une prairie (Rotation C), mais ne se manifeste pas dans celui des parcelles de rotation céréalière à paille exportée (Rotation A). En conséquence, les différences entre parcelles des deux rotations sont beaucoup plus marquées si on considère les taux déterminés à partir d'agrégats non remaniés.

B/ - Discussion

Pour interpréter l'effet du calibre des fragments sur leur sensibilité à la désagrégation, nous avons été amenés à invoquer une destruction plus poussée de leur périphérie ce qui confère un rôle privilégié aux propriétés du matériau situé à ce niveau. Or, il semble bien que celui-ci puisse, justement du fait de cette situation, acquérir des propriétés différentes de celles de la terre située au coeur des fragments. En effet, selon que l'imbibition se réalise à partir de faces récemment fabriquées (agrégats issus d'un remaniement) ou plus anciennes (agrégats non remaniés) et ayant de ce fait enregistré certains effets du climat et du système de culture, le comportement des agrégats s'avère différent.

Il a été montré, à plusieurs reprises (notamment par SEBILLO 1968, à Montluel) que l'histoire hydrique du sol avait une influence importante sur la stabilité structurale. Ceci est sans doute dû au moins en partie à l'influence de la dessiccation sur le caractère hydrophobe des matières organiques (CHASSIN, 1979) et donc sur la mouillabilité de la terre. L'augmentation de stabilité consécutive à une dessiccation est particulièrement importante si elle s'effectue à température élevée (MONNIER et KONAN, 1968 ; BOIFFIN, 1976).

Or, la dessiccation et l'élévation de température sont a priori beaucoup plus fréquentes et plus marquées au niveau des fragments de surface qu'au niveau des couches sous jacentes même peu profondes. L'intervention d'un tel processus est donc tout à fait plausible tant du point de vue des résultats obtenus que des conditions d'apparition des augmentations de stabilité: en effet dans tous les cas étudiés, les fragments de surface ont effectivement subi des périodes plus ou moins longues de dessiccation(1).

Les résultats que nous avons obtenus antérieurement (BOIFFIN, 1976) permettent de penser que ce processus peut aussi se manifester pour des terres relativement pauvres en matière organique comme celle de Palaiseau. Cependant, une interaction avec l'abondance, la nature et la localisation des substances organiques est plausible et pourrait expliquer les différences très accentuées observées en cas de passé prairial.

En définitive, on doit retenir que du point de vue de la stabilité structurale, la comparaison de différentes terres est influencée de manière assez sensible par l'histoire et la provenance microlocale des échantillons. Par suite, les modalités de prélèvement et de remaniement des fragments terreux doivent être différenciées selon que l'objectif principal est de comparer des matériaux de manière aussi peu contingente que possible de leur histoire récente, ou de prévoir à court terme le comportement in situ, auquel cas le non remaniement des fragments apparaît souhaitable.

(1) On trouvera sur ce point en annexe 9.3. quelques résultats plus détaillés obtenus sur le site de Montluel.

CONCLUSION

a) - Existence de différents régimes de division des fragments

Les observations au champ suggéraient l'existence de ces différents régimes. Pour en obtenir confirmation, nous avons artificialisé par étapes successives, les conditions de la dégradation structurale : de l'observation du sol en place sous pluies naturelles, nous sommes passés à l'étude de massifs calibrés et exposés aux pluies dans des boîtes de faible surface, puis à celle de petits échantillons soumis à des gouttes artificielles, et enfin aux tests d'analyse d'agrégats.

Ce faisant, nous avons progressivement mieux contrôlé et plus strictement défini les conditions d'imbibition du matériau, et introduit des dispositifs de capture des particules qui nous ont permis de caractériser de plus en plus précisément la division des fragments initiaux. En définitive, on peut distinguer trois principaux régimes, qui dans la réalité se combinent avec une importance relative variable selon les conditions :

- 1°/- Un régime de microfissuration, lié aux alternances d'humectation-dessiccation. Son intensité dépend de la constitution minérale et organique du matériau mais ce régime existe aussi pour des terres très limoneuses. Le rôle de la pluie est d'humecter le sol ; la masse de terre mobilisée dépend pour un sol donné du nombre et de l'amplitude des alternances hydriques. L'énergie cinétique des gouttes n'intervient que sur l'expression de cette mobilisation par la projection de petits agrégats.

- 2°/- Un régime de désagrégation par éclatement, que nous avons étudié plus en détail, compte tenu de l'importance et surtout de la variabilité des masses de terre qu'il peut mobiliser in situ. Ce régime fait intervenir la baisse de cohésion lors de l'imbibition et la compression de l'atmosphère interne des agglomérats. Il requiert deux conditions : une saturation incomplète des fragments et une imbibition rapide permettant le piégeage de l'air. La sensibilité du sol à ce régime dépend donc de la teneur en eau initiale, du calibre des fragments, de la mouillabilité (et surtout de celle des surfaces par où débute l'imbibition) et de la cohésion de terre humide. L'agressivité des pluies est liée à la rapidité avec laquelle peut apparaître l'eau libre au contact des fragments encore non saturés. Les variables à considérer

sont donc la taille des gouttes (à comparer à celle des agrégats les plus fins) et de manière plus générale la différence entre intensité et infiltrabilité de la surface du sol. Les masses de terre ainsi mobilisées ne dépendent pas de l'énergie cinétique des gouttes.

- 3°/- Un régime de désagrégation mécanique sans éclatement ; les impacts des gouttes ayant pour effet d'écraser les plus petits fragments et d'arracher des particules ou groupes de particules non préindividualisés aux fragments les plus grossiers.

Ce régime, totalement prédominant à partir du moment où les agglomérats sont saturés, fait intervenir :

- la cohésion de terre humide. C'est à cette influence qu'on peut rattacher le caractère prédictif de l'"indice de consistance" proposé par DE PLOEY (1977, 1978, 1981) pour caractériser la prédisposition des matériaux à la battance ;
- l'énergie cinétique des gouttes de pluie, qui dans ce cas doit être un bon prédicteur des masses de terre mobilisées.

b) - Conséquences pour le déplacement consécutif et l'appréciation de la redistribution spatiale

Là encore nous avons vérifié et précisé les hypothèses émises à partir de l'observation globale in situ et formulées en conclusion de la 2ème partie : il n'y a pas indépendance entre les modalités de division des fragments et celles du déplacement consécutif. Schématiquement, on peut opposer deux cas extrêmes :

- 1°/- Si les liaisons entre particules ou groupes de particules sont préalablement rompues (préindividualisation de micro agrégats ou particules), les impacts de gouttes peuvent provoquer un déplacement à longue distance. Le recueil des projections serait alors un bon indicateur de l'intensité de la redistribution spatiale.
- 2°/- Si au contraire, la rupture des liaisons s'effectue consécutivement à l'impact (désagrégation par éclatement) le déplacement primaire s'effectue alors sur une très faible distance, une fraction variable des particules ainsi libérées étant secondairement projetées. Le recueil des projections devient un mauvais indicateur de la redistribution spatiale surtout si les conditions de mobilisation sont fluctuantes.

Ces deux cas correspondent typiquement aux deux premiers régimes de division des fragments. La place du troisième régime est à première vue intermédiaire et probablement assez variable. On peut imaginer qu'une situation où la consistance de terre est proche de la liquidité, correspondant à une quasi rupture des liaisons interparticulaires, s'apparente au premier cas, mais ceci reste conjectural et appelle des investigations complémentaires.

c) - Rôle complexe et ambivalent de l'histoire hydrique du sol

Celle-ci agit à la fois sur l'état hydrique des fragments au moment de la pluie, sur leur état structural et sur leur stabilité structurale. Une histoire hydrique à prédominance de phases sèches tend à accroître la stabilité structurale, à augmenter l'infiltrabilité initiale du sol, à prolonger le délai d'atteinte d'une très faible cohésion en surface mais aussi à accroître les risques d'éclatement.

Cette complexité impose de bien distinguer l'histoire hydrique globale du sol, c'est-à-dire le bilan des pertes et des apports sur une période plus ou moins longue ; et l'évolution de l'état hydrique des fragments de surface qui demanderait à être caractérisée avec une grande précision spatiale et chronologique.

Il apparaît donc à la fois important et difficile d'interpréter et de prévoir les conséquences globales d'une histoire hydrique déterminée sur la dégradation structurale du sol. A défaut d'une prévision systématique, nous pouvons cependant proposer quelques cas-types correspondant à un risque plus ou moins important de désagrégation sous une pluie donnée.

Le risque maximum pourrait correspondre au début de dessiccation d'une terre ayant longtemps séjourné en conditions humides et dont la couche superficielle surmonte un horizon compact et humide situé à très faible profondeur.

Le risque minimum pourrait correspondre à une terre lentement réhumectée (lors de pluies très peu intenses ou par capillarité à partir des horizons sous-jacents), ayant préalablement longtemps séjourné en conditions sèches et dont l'ensemble des couches superficielles présentent une forte conductivité hydraulique et/ou une forte sorptivité.

d) - L'appréciation de la stabilité structurale

En accord avec le schéma de HENIN-YODER, les résultats obtenus suggèrent cependant un réexamen des procédures d'évaluation actuellement en vigueur.

Il faut tout d'abord bien distinguer deux objectifs : celui de la caractérisation et de la comparaison des matériaux ; celui de la compréhension du comportement in situ. Tels qu'ils sont conçus actuellement, les tests d'analyses d'agrégats et les indices synthétiques qui en sont dérivés semblent bien adaptés au premier objectif, à quelques réserves près⁽¹⁾ concernant l'expression du terme (A + L) maximum et le calibre initial de la prise d'essai qui devrait être plus étroit.

Vis-à-vis du deuxième objectif on peut reprocher à ces procédures de donner un poids excessif aux phénomènes d'éclatement et d'éliminer certains effets de l'histoire hydrique du prélèvement. Il serait sans doute plus réaliste de prendre en considération les seuls taux d'agrégats stables après prétraitement alcool et air et de pondérer leur importance en fonction de la probabilité de saturation des fragments lors des pluies, qui dépend elle-même de la teneur en argile. Nous avons également émis quelques suggestions à propos du remaniement des fragments. Pour obtenir confirmation de l'intérêt de ces propositions et pour les préciser il serait nécessaire d'étudier le comportement in situ d'une gamme de matériaux beaucoup plus large que celle que nous avons utilisée. Ceci peut constituer un développement ultérieur du travail que nous présentons ici.

(1) Cf. première partie, 212

QUATRIÈME PARTIE :

SYNTHÈSE ET ÉLÉMENTS DE MODÉLISATION

P L A N

	<u>DATE</u>
1 - <u>DEROULEMENT ET PROCESSUS DE LA DEGRADATION STRUCTURALE</u> ...	263
1.1. - <u>La phase 1</u>	263
1.1.1. - Evolution structurale	263
1.1.2. - Modalités et processus de la redistribution spatiale	264
1.1.3. - Indicateurs d'évolution morphologique et de redistri- bution spatiale	265
1.1.4. - Facteurs et conditions de la redistribution spatiale	266
1.2. - <u>La phase 2</u>	267
1.2.1. - Evolution structurale	267
1.2.2. - Modalités et processus de la redistribution spatiale	268
1.2.3. - Indicateurs d'évolution morphologique et de redis- tribution spatiale	269
1.2.4. - Facteurs et conditions de la redistribution spatiale	270
1.2.5. - Déclenchement et interruption de la phase 2	270
1.3. - <u>Conclusion ; les conséquences agronomiques</u>	271
2 - <u>ELEMENTS DE MODELISATION</u>	275
2.1. - <u>Modelisation de la dégradation structurale en cours de phase 1</u>	275
2.1.1. - Choix des variables et mode d'expression des prévi- sions	275
2.1.2. - Principe de réalisation des prédictions	277
2.2. - <u>Modélisation du déclenchement de la phase 2</u>	279
2.2.1. - Choix des variables, conditions de validité	279
2.2.2. - Principes de réalisation des prédictions	279
2.3. - <u>Modélisation de l'épaississement des croûtes en cours de phase 2</u>	281
2.3.1. - Choix des variables et hypothèses de travail	281
2.3.2. - Principes de réalisation des prédictions	281
2.4. - <u>Exemple d'application</u>	283
2.4.1. - Principe de la démarche et choix des données de départ	283
2.4.2. - Résultats et discussion	285

Dans un premier temps nous résumerons l'ensemble des acquis du travail en rappelant le déroulement général du phénomène et en y resituant le rôle des principaux processus analysés.

Dans un deuxième temps, nous proposerons des éléments de prévision quantitative de certains aspects du comportement, jugés importants vis-à-vis des répercussions agronomiques.

1 - DEROULEMENT ET PROCESSUS DE LA DEGRADATION STRUCTURALE

Le principal trait invariant de ce déroulement est la succession de deux grandes phases : une première de fermeture de la surface, une deuxième de développement des croûtes stratifiées. L'observation systématique de cette succession dans une large gamme de situation .. (états structuraux initiaux, histoires climatique et caractères de constitution du sol fortement différenciés) démontre le caractère préalable et obligatoire de la phase 1 pour que puisse se développer ensuite le faciès morphologique classique de la battance. Or cette phase 1, le plus souvent négligée parce que très fugace en conditions expérimentales artificialisées, se réalise au champ à un rythme très variable. C'est de cette variabilité que résultent, pour une large part, les variations d'ampleur et de vitesse de la dégradation globale.

1.1. - LA PHASE 1

1.1.1. - Evolution structurale

A partir d'un profil initial constitué d'une superposition de couches plus ou moins meubles, parmi lesquelles au moins la plus superficielle présente une structure fragmentaire, l'action des pluies se traduit :

- . au niveau de l'interface sol-atmosphère, par l'altération du caractère fragmentaire avec incorporation progressive de fragments de plus en plus gros dans des plaques continues, constituées en coupe par une croûte de composition granulométrique homogène et identique à celle de l'ensemble du matériau ;
- . pour l'ensemble des couches initialement fragmentaires du profil, par une diminution progressive de l'indice des vides structural.

Il en résulte :

- . une diminution de la conductivité hydraulique de l'interface sol-atmosphère, qui cependant tout au long de cette phase reste supérieure

à l'intensité pluviométrique de la majorité des épisodes pluvieux.

. une diminution sensible de la rugosité de cette surface

1.1.2. - Modalités et processus de la redistribution spatiale

a) - L'évolution morphologique résulte de la redistribution spatiale d'une certaine quantité de matériau. Au cours de la phase 1, cette redistribution prend à la surface du sol, la forme d'un colmatage interstitiel : les transferts s'opèrent des fragments vers les interstices et dans toutes les directions latérales. La spécification des zones (de départ ou d'accumulation) reste peu perceptible car elle se réalise à un niveau microporeux puis centimétrique.

b) - la redistribution spatiale est induite, au cours de la phase 1, exclusivement par l'impact des gouttes de pluie. Les déplacements de matière solide s'opèrent avec ou sans détachement préalable.

Le détachement se réalise soit par micro-fissuration soit par désagrégation (avec ou sans éclatement), auquel cas la projection consécutive se réalise en moyenne à des distances plus faibles. Le déplacement sans détachement préalable correspond à la déformation d'un massif de très faible cohésion et de consistance presque liquide ; il est probable que les distances de déplacement sont alors systématiquement très faibles. Les conditions dans lesquelles se réalisent ces transferts ne permettent pas un tri des constituants granulométriques élémentaires.

c) - Le matériau déplacé en position interstitielle et les fragments qui subsistent dans leur position initiale sont soumis à un compactage très énergique en surface. Les densités conférées à la croûte ainsi formée (que certains auteurs désignent sous le terme de "croûte structurale") sont les plus élevées qui puissent être obtenues pour le matériau considéré compte tenu des états hydriques réalisés sous pluie.

Sous la "croûte structurale", le remaniement est plus modéré et s'opère principalement par rapprochement, sans destruction, des fragments. Il en résulte une diminution sensible mais seulement partielle de la porosité inter-mottière.

1.1.3. - Indicateurs d'évolution morphologique et de redistribution

- a) - L'indicateur principal sur lequel nous avons basé notre analyse est le calibre D_{lim} , équivalent à celui du plus petit fragment non encore incorporé dans les plaques. Cet indicateur permet de faire le lien entre :
- . d'une part, les données relatives aux masses de terres subissant une redistribution spatiale (par unité de surface m^2). En effet, si un certain nombre de conditions sont satisfaites (et en particulier si les critères d'incorporation des fragments aux plaques sont bien définis et constants) l'indicateur D_{lim} est proportionnel au volume cumulé de matériau interstitiel;
 - . d'autre part, les données relatives à l'évolution morphologique et structurale de la surface du sol, c'est-à-dire principalement :
 - la surface des plaques continues : la relation entre D_{lim} et la surface des plaques continues est déduite de la détermination initiale du taux de recouvrement par classe de calibre des fragments;
 - la conductivité hydraulique de l'interface atmosphère-sol humide. En effet, nous avons constaté une relation statistique étroite entre D_{lim} et l'infiltrabilité, dont les coefficients semblent caractéristiques d'un sol déterminé.
- b) - Un indicateur partiel des masses de terre déplacées est l'indice p_{80} , dérivé du recueil des projections solides.
- Rappelons qu'il s'agit de la masse de terre par unité de surface recueillie dans un récepteur de 80 cm^2 de surface. Cet indice est en principe un bon reflet de la variation des masses de terre projetée à relativement grande distance (plus de 5 cm), c'est-à-dire vraisemblablement des particules ou agrégats individualisés préalablement à l'impact des gouttes.
- c) - Les corrélations et les rapports numériques observés entre les indices D_{lim} et p_{80} suggèrent que :
- dans certaines conditions les projections solides représentent une part importante de la masse de terre déplacée (et en tout cas prépondérante vis-à-vis de sa variabilité) qui permet le colmatage interstitiel. De telles conditions semblent avoir été le plus souvent réunies dans le cas du sol étudié le plus argileux (20 % d'argile).

- Par contre, dans d'autres conditions, plutôt réunies sur le site à sol moins argileux (10 %), une masse de terre additionnelle d'importance variable mais souvent prédominante est mise en jeu. Cette masse serait déplacée sans être à proprement parler projetée, que ce soit à la suite de déformations plastiques ou de désagrégations par éclatement. Les rapports D_{lim}/p_{80} sont alors plus élevés et surtout plus variables que dans le cas précédent.

1.1.4. - Facteurs et conditions de la redistribution spatiale

Pour caractériser l'agressivité des séquences de pluie, nous avons recouru aux calculs d'énergies cinétiques cumulées par tranche d'intensité pluviométrique (indices KE).

La valeur de prédiction de ces indices tient tout d'abord au rôle physique primordial de l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Transmise aux particules solides lors de l'impact celle-ci peut induire leur détachement et leur déplacement. Mais cette transmission ne représente une condition nécessaire vis-à-vis du déplacement. En effet, le détachement peut lui, s'opérer selon des modalités (microfissuration et désagrégation par éclatement) sur lesquelles l'énergie cinétique n'a pas une influence majeure.

En définitive, l'efficacité dégradante d'une pluie ou d'une séquence de pluies ne résulte pas uniquement de ses caractéristiques propres (à cet égard, l'intensité est toujours, toutes choses égales par ailleurs, un facteur d'agressivité), mais aussi des conditions d'imbibition et de l'état de fissuration des fragments exposés en surface.

L'histoire hydrique du sol a donc une influence importante, d'ailleurs ambivalente, sur le type de réaction et la sensibilité de la surface à une pluie donnée. Globalement, ce sont les histoires hydriques humides qui s'avèrent les plus sensibilisatrices mais l'état de sensibilité maximum des fragments superficiels est atteint en tout début de dessiccation lorsque la périphérie des fragments n'est plus saturée. C'est en effet dans ces conditions que l'éclatement s'adjoit aux autres processus de détachement, et il en résulte alors une importante accélération de l'extension des plaques.

Pour une masse de terre déplacée donnée, l'extension des plaques est fonction de la dimension des interstices et donc du calibre des fragments. Ceci rend presque intégralement composites des différences de vitesse de déroulement de la phase 1 entre des parcelles d'état structural plus ou moins grossier ; il est cependant à noter que dans la gamme des calibres les plus fins, les différences de taille correspondent aussi à des différences de sensibilité à l'éclatement.

Par ailleurs, la vitesse d'extension des plaques est fortement influencée par les variations de constitution minérale des matériaux. Lorsque la teneur en argile passe de 10 à 20%, toutes choses égales par ailleurs cette vitesse diminue pratiquement de moitié ; une différence de sensibilité est perceptible visuellement sinon quantitativement entre des sols dont la teneur en argile diffère de seulement 2 %⁽¹⁾.

Une analyse des modalités de la désagrégation nous a permis de compléter l'interprétation habituelle de l'effet de la texture : l'augmentation de la teneur en argile entraîne, non seulement un accroissement de la cohésion de terre humide, mais aussi une diminution sensible des risques d'éclatement. Cette conclusion repose sur les relations que nous avons mises en évidence entre taux de saturation des agglomérats et intensité de la désagrégation par éclatement.

En revanche, dans la gamme des matériaux testés, les différences liées à la constitution organique ont eu au champ des répercussions modestes sur la vitesse d'extension des plaques. L'étude des modalités de la désagrégation, en conditions mieux contrôlées, confirme que les différences de stabilité structurale induites de cette façon ont des répercussions moins importantes que les variations de calibre et d'état hydrique de fragments. Il apparaît aussi que les différences de mouillabilité ne peuvent s'extérioriser pleinement que dans certaines conditions d'imbibition et d'histoire hydrique des fragments. Nous en avons déduit différentes pistes d'amélioration des procédures d'évaluation de la stabilité structurale.

2. - LA PHASE 2

1.2.1. - Evolution structurale

Les traits les plus caractéristiques de cette phase sont :

- la disparition complète et définitive, sauf remaniement accidentel, du caractère fragmentaire de la surface qui présente dès le début de cette phase, une structure continue ;
- une destruction très poussée des assemblages terreux ;

(1) C'est ce qu'a montré l'observation des 2 Blocs à Palaiseau.

- le développement dans les dépressions, de croûtes différentes de celles observées précédemment : elles sont, effet, formées d'un empilement de strates constituées de particules de taille différentes, plus ou moins étroitement calibrées selon les conditions de leur mise en place. Ces croûtes stratifiées sont systématiquement disposées au-dessus et de manière discordante par rapport à la croûte structurale formée précédemment.

Par ailleurs, les diminutions de la rugosité et de l'indice des vides structural des couches fragmentaires adjacentes à la surface, se poursuivent sans discontinuité apparente vis-à-vis de la phase précédente, jusqu'à un état d'équilibre ou de pseudo-équilibre correspondant respectivement à une rugosité quasi nulle et à un indice des vides structural de 25 à 30 %.

1.2.2. - Modalités et processus de la redistribution spatiale

Deux différences fondamentales interviennent par rapport au régime de redistribution spatiale prévalant antérieurement

- la plupart des pluies, même si elles sont de faible intensité, font apparaître des excès d'eau à la surface du sol. Ceux-ci sont susceptibles de ruisseler et de constituer des flaques ;
- les interstices entre les fragments sont en grande partie comblés et ne peuvent plus jouer aussi efficacement leur rôle de piège pour le matériau déplacé.

Il en résulte deux conséquences importantes :

- les particules terreuses peuvent être transportées et déposées en phase liquide, ce qui assure une désagrégation très poussée et un tri granulométrique plus ou moins étroit selon la turbulence de l'écoulement. En condition de terrain plat, le ruissellement n'atteint jamais des vitesses suffisantes pour assurer lui-même le détachement. Cette fonction est accomplie par les mêmes agents et est soumise aux mêmes conditions que lors de la phase 1.
- Le dépôt peut s'opérer à des distances relativement importantes (d'ordre décimétrique ou métrique) du lieu de détachement initial.

Ceci est vrai non seulement latéralement, mais aussi verticalement. Cependant, la surface du sol ayant été obturée en cours de phase 1, les entraînements de particules dans la masse du profil ne peuvent se réaliser que dans certains canaux d'écoulement préférentiels dont la maille de répartition est d'ordre métrique. Ils affectent donc des quantités très

faibles⁽¹⁾ par rapport aux dépôts qui participent à l'évolution morphologique de surface.

Il apparaît alors, à la surface du sol, une spécialisation des zones qui correspondent à des différences morphologiques très nettes. Les zones basses sont les sites de formation des flaques et reçoivent la terre que perdent les zones hautes.

Bien que les processus de détachement aient lieu en tout point du sol, le transfert de matière solide ne s'opère de façon massive que des zones de départ vers les zones de dépôt. Au fur et à mesure que le microrelief s'aplanit, les quantités de terre transférables s'amenuisent et la surface atteindrait un état d'équilibre si la pente générale du terrain était rigoureusement nulle.

1.2.3. - Indicateurs d'évolution morphologique et de redistribution spatiale

En raison de la disparition totale du caractère fragmentaire, l'indicateur D_{lim} ne peut plus être utilisé. En revanche, il devient possible d'appréhender directement les transferts de terre des zones de départ vers les zones d'arrivée :

L'indicateur privilégié est donc, cette fois, l'indice m_T , solde des échanges de terre entre ces deux types de zones exprimé par unité de surface totale. Mesuré à partir des relevés de jalons cotés, cet indicateur peut être relié :

- aux données morphologiques (surfaces, indices de rugosité) ;
- aux masses de terre mobilisées.

A cet égard, l'assez bonne valeur prédictive de l'indice p_{80} vis-à-vis des masses de terre transférées, est cohérente avec le fait que le ruissellement ne peut entraîner que des particules ou groupes de particules nettement détachées et préalablement mis en mouvement. Toutefois, là encore, certains résultats suggèrent fortement que dans certains cas la masse de terre mobilisée inclut non seulement les

(1) Mais qui à l'échelle de temps de la pédogenèse deviennent considérables.

projections, mais aussi une certaine quantité détachée par désagrégation sans projection ultérieure.

1.2.4. - Facteurs et conditions de la redistribution spatiale

Nous avons considéré qu'il n'était pas nécessaire de chercher à caractériser le ruissellement lui-même : puisque celui-ci se produit pratiquement à chaque pluie et ne joue aucun rôle vis-à-vis de l'entraînement initial, c'est d'abord la masse de terre mobilisée qui contrôle principalement la masse de terre transférée.

Par conséquent, les facteurs et conditions de la redistribution spatiale et les moyens de leur caractérisation sont pratiquement les mêmes que ceux présentés dans le cas de phase 1 :

- énergie cinétique des pluies par classes d'intensité
- sensibilité de la terre aux différents processus de détachement,
- histoire hydrique du sol avant la pluie considérée.

1.2.5. - Déclenchement et interruption de la phase 2

Ce déclenchement est provoqué par le premier épisode pluvieux permettant à un excès d'eau important de se former ; autrement dit à la première pluie d'intensité supérieure à l'infiltrabilité du sol pendant un certain laps de temps. En fait, c'est à la suite du premier épisode de ce type qu'on voit apparaître en coupe sur les lames minces les premiers traits laminaires caractéristiques de la phase 2. Les valeurs d'infiltrabilité subissent alors une nouvelle diminution qui rend de plus en plus probable la formation d'excès d'eau lors des pluies ultérieures. L'établissement de la phase 2 n'est donc remis en cause que si se produisent :

- soit un remaniement accidentel (gel, fissuration par retrait ; action de la faune du sol) ;
- soit une dessiccation poussée qui entraîne une réaugmentation de l'infiltrabilité du sol.

En dehors de ces circonstances, on peut considérer que la dégradation de la surface du sol est un phénomène pratiquement irréversible et qui s'aggrave de lui-même par l'intermédiaire de la diminution de l'infiltrabilité. Il faut noter

que celle-ci dépend de l'état hydrique et structural du sol, mais aussi de sa constitution granulométrique. D'où la nécessité de prendre en considération un paramètre supplémentaire de sensibilité des matériaux à la dégradation structurale : la part de conductivité hydraulique à l'état saturé qui est déterminée par la texture. Cette fois, ce sont les sols les plus argileux qui sont défavorisés : à stade comparable de dégradation, la conductivité hydraulique est beaucoup moins élevée pour le sol de Palaiseau que pour le sol de Montluel; par conséquent, la phase 2 serait susceptible de s'y déclencher plus rapidement si toutes choses étaient égales par ailleurs : si le sol de Palaiseau était transporté sous climat Lyonnais, les risques de battance y seraient au moins aussi élevés que pour le sol de Montluel.

En fait le rythme de la dégradation structurale et en particulier le délai de déclenchement de la phase 2 sont avant tout contrôlés par l'agent externe climatique, la pluie. Celle-ci est bien le principal facteur de variabilité (y compris géographique), compte tenu de l'extrême diversité de la répartition chronologique et spatiale des caractéristiques physiques qui déterminent son agressivité. Vis-à-vis des risques de battance dans une région donnée, on devrait évoquer la fréquence des épisodes intenses avant même de parler des sols et de leur aptitude à la battance.

1.3. - CONCLUSIONS : LES CONSEQUENCES AGRONOMIQUES

L'état initial dont nous avons étudié la modification est typiquement celui d'une parcelle agricole où vient de s'effectuer un semis, si l'on s'en tient aux techniques de très loin les plus répandues en France (semis après travail du sol plus ou moins profond).

Les conséquences de la dégradation structurale peuvent être appréciées d'un double point de vue :

a) - Préparation de l'érosion

Ce point a été souligné par ROOSE (1980). Nos propres résultats le confirment en montrant que la battance prépare doublement le terrain pour l'érosion : d'une part, elle provoque une diminution de l'infiltrabilité qui permet le ruissellement ; d'autre part, la diminution de rugosité engendre un accroissement des distances de déplacement de l'eau et des particules solides : des zones d'altitude différente, donc susceptibles d'échanger de la terre, sont ainsi mises en communication à une échelle sans cesse élargie ; la pente peut alors jouer son rôle.

Ce n'est pas nécessairement la parcelle elle-même qui subit la perte en terre ; celle-ci peut être provoquée en aval une fois que le ruissellement est concentré. Ce type de problème se rencontre fréquemment en bordure de plateau limoneux occupé par des cultures annuelles et peut engendrer des nuisances importantes dans les vallées. Un exemple récent concerne précisément la costière du plateau des Dombes à proximité de Montluel (CEMAGREF, 1983)

b) - Risque d'échec des semis

A cet égard, dès la phase 1 l'évolution structurale peut être considérée en elle-même comme une dégradation. En effet :

- La diminution déjà sensible de la rugosité s'accompagne déjà très probablement d'une augmentation de l'albedo et donc d'une diminution de la quantité de chaleur reçue par le lit de semence, par rapport au sol non dégradé ;
- la formation d'une croûte structurale dense, aisément saturée, peut ralentir sensiblement les flux de diffusion de l'oxygène ;
- en cas de dessiccation postérieure aux pluies, entraînant un durcissement de la croûte structurale, celle-ci peut constituer un obstacle à la levée pour certains types de plantules particulièrement sensibles⁽¹⁾.

Toutefois, différentes observations, à confirmer expérimentalement, nous suggèrent que, si la croûte formée en cours de phase 1 reste peu cohérente, c'est à dire humide et/ou peu épaisse, elle affecte peu le comportement des plantes⁽²⁾.

Réciproquement la plupart des cas où la battance engendre une diminution du taux de levée correspondraient à un déclenchement de la phase 2 survenant avant que la totalité des plantes aient germé ou levé.

(1) Nous avons pu observer une telle situation au printemps 1984 sur des semis de betterave en terre limoneuse (15 à 18 % d'argile).

(2) C'est ce qui s'est produit dans tous les cas sur les parcelles au sein desquelles ont été délimitées les unités expérimentales ; la levée du maïs, du colza et du blé se produisant, autour de ces unités, avant le déclenchement de la phase 2 et sans déficit imputable directement à la battance.

Cette supposition n'est pas contredite par les résultats obtenus sur le dispositif de Montluel (BOIFFIN, SEBILLOTTE, DUBY, 1975 ; BOIFFIN et al., 1981) : d'après ces travaux, une réduction sensible du taux de levée ne se manifeste que si plus de 20 mm de pluie tombent dans la décade qui succède au semis, ce qui correspond bien à l'ordre de grandeur nécessaire pour enclencher la phase 2 compte tenu des caractéristiques pédologiques et climatiques de ce site.

Un développement ultérieur de ce travail consisterait à tester ces hypothèses. Mais, d'ores et déjà, nos observations permettent de dire que le début de la phase 2 correspond probablement à un point singulier de l'évolution :

- de l'albedo (apparition massive des limons clairs à la surface du sol),
- de la conductivité d'interface sol-atmosphère (nous l'avons vérifié),
- des propriétés mécaniques de cet interface (l'apparition des croûtes stratifiées correspondrait à une augmentation des contraintes à exercer pour franchir l'horizon surmontant les semences).

Au total, il est donc très plausible que le déclenchement de la phase 2 s'accompagne d'une forte augmentation des risques de mortalité des plantes encore non levées ou a fortiori non germées.

2 - ELEMENTS DE MODELISATION

Ces éléments sont de deux types :

- diagrammes de prévision établis à partir des règles d'analyses du phénomène que nous avons appliquées et précisées ;
- relations numériques permettant de mettre en oeuvre concrètement ces diagrammes. Il s'agit en l'occurrence des relations statistiques les plus étroites obtenues à partir du jeu de données que nous avons traité, elles ont donc une forme provisoire.

Nous ne testerons pas leur valeur de prédiction; pour cela, il aurait fallu disposer d'un deuxième jeu de données indépendant du précédent. Notre propos se limitera à formaliser certains modèles prévisionnels de manière aussi opérationnelle que possible pour permettre un test ultérieur.

Nous nous intéresserons tout spécialement à la prévision du déclenchement de la phase 2, ainsi qu'à :

- la vitesse d'extension des plaques pendant la phase 1.
- l'épaississement des croûtes pendant la phase 2.

2.1. - MODELISATION DE LA DEGRADATION STRUCTURALE EN COURS DE PHASE 1

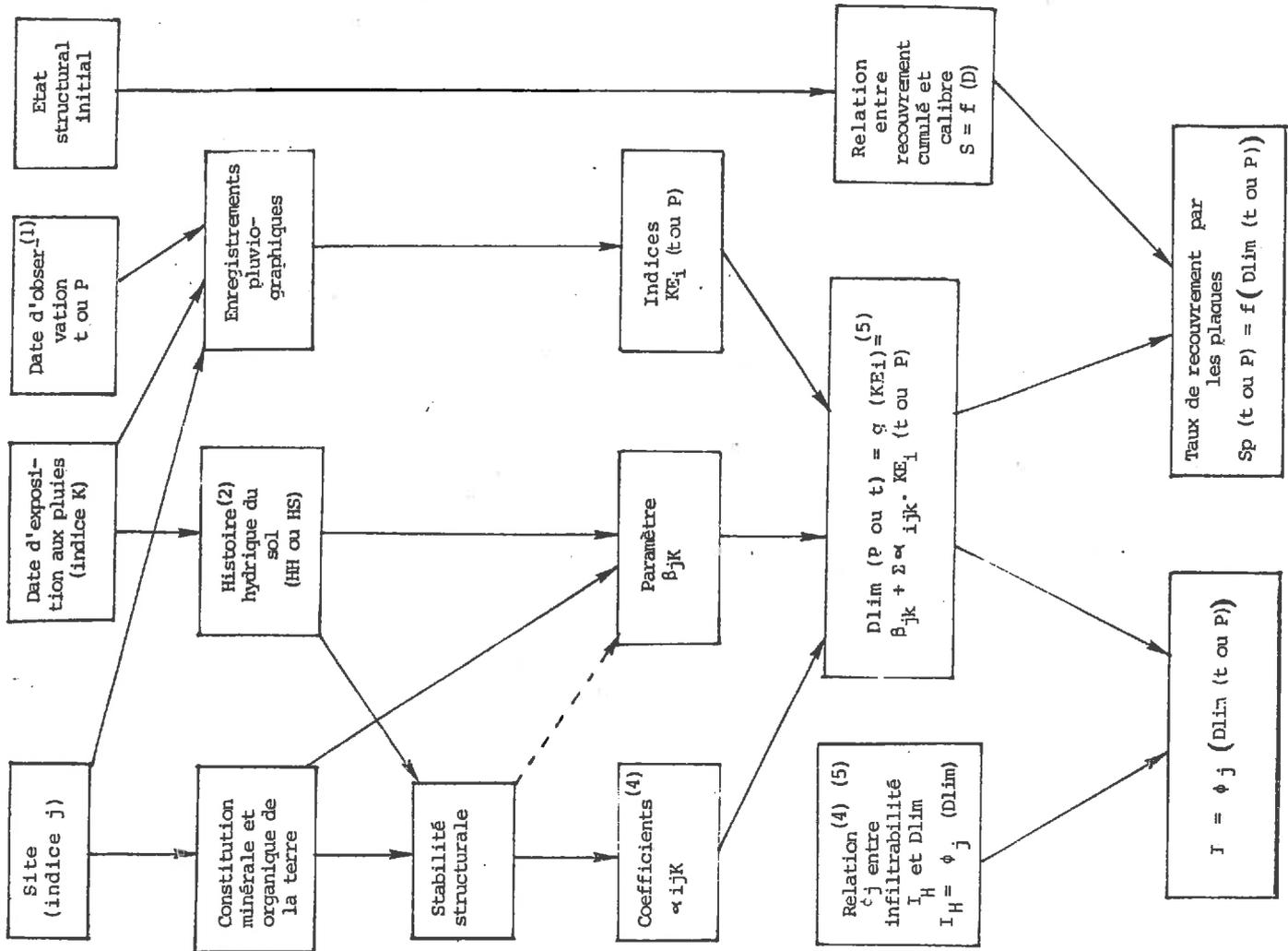
2.1.1. - Choix des variables et mode d'expression des prévisions

On considère ici deux variables de sortie : la surface des plaques continues S_p , qui nous paraît pouvoir être reliée dans une étape ultérieure à l'évolution de l'albédo ; et l'infiltrabilité du sol humide I_H (approche de la conductivité hydraulique K_{sat} de l'interface) qui doit nous permettre d'envisager ensuite le déclenchement de la phase 2. Soulignons qu'il s'agit de variables cumulatives qui traduisent l'état de dégradation atteint par le sol à partir d'une certaine durée d'exposition aux pluies.

Les principales variables d'entrée seront les indices KE : énergies cinétiques cumulées par classes d'intensité à partir de l'exposition du sol aux pluies.

Les prévisions seront exprimées en fonction des pluies cumulées à partir de la date d'exposition, mode d'expression qui favorise la comparaison des vitesses de dégradation pour différents sites en permettant de faire ressortir les différences de sensibilité du sol ou d'agressivité des pluies.

FIG 51 : DIAGRAMME DE MODELISATION DE LA DEGRADATION STRUCTURALE AU COURS DE LA PHASE I



- (1) t = date d'observation, P pluie cumulée depuis la date d'exposition.
- (2) Histoire hydrique du sol de type humide (HH) ou sec (HS). Pour les critères de détermination du type d'histoire hydrique, cf. Annexes 16-5 et 17-1.
- (3) Indices KE ; (t ou P) = Energies cinétiques des pluies cumulées par classes d'intensité (indice i) à partir de la date d'exposition aux pluies. Pour le calcul des indices KE on utilise la relation 1 (WISCHMEIER et SMITH, 1958) indiquée dans la 1ère partie.
- (4) Bien noter que l'indice i désigne la classe d'intensité des pluies.
- (5) I_H = Infiltrabilité du sol humide (mesurée par la méthode des taches saturées).
 $Dlim$ = Calibre équivalent à celui du plus petit fragment non encore incorporé dans les plaques continues.
- (6) S = Taux de recouvrement cumulé, D calibre des fragments, le recouvrement s'entend interstices compris.
- (7) Sp = Taux de recouvrement par les plaques continues.

Une prédiction en temps réel peut s'avérer nécessaire, par exemple s'il s'agit de confronter la vitesse d'extension des plaques continues avec celle de réalisation de la germination-levée. Cette prédiction peut être en fait rétroactive (si on veut tester le modèle, ou encore si l'on veut comprendre les raisons des variations du taux de levée...). Il faut alors disposer d'enregistrements pluviographiques. Pour une prévision au sens strict, il faudrait disposer d'une prévision de répartition chronologique des volumes et intensités pluviométriques. En l'état actuel des connaissances météorologiques ceci n'est évidemment envisageable que de manière probabiliste, à partir d'une analyse des répartitions de hauteur de pluie en fonction de l'intensité (comme celles données en annexe 6.3.) et d'une analyse fréquentielle des hauteurs de précipitations pour des périodes inférieures ou égales à la décade.

En tout état de cause, il convient d'insister sur le fait que pendant la phase 1 le pas de temps considéré doit correspondre à un incrément de pluie cumulée assez faible (de l'ordre de 5 mm maximum), faute de quoi la description aurait peu d'intérêt puisque la phase 1 s'étale sur une à quelques dizaines de mm de pluie cumulée.

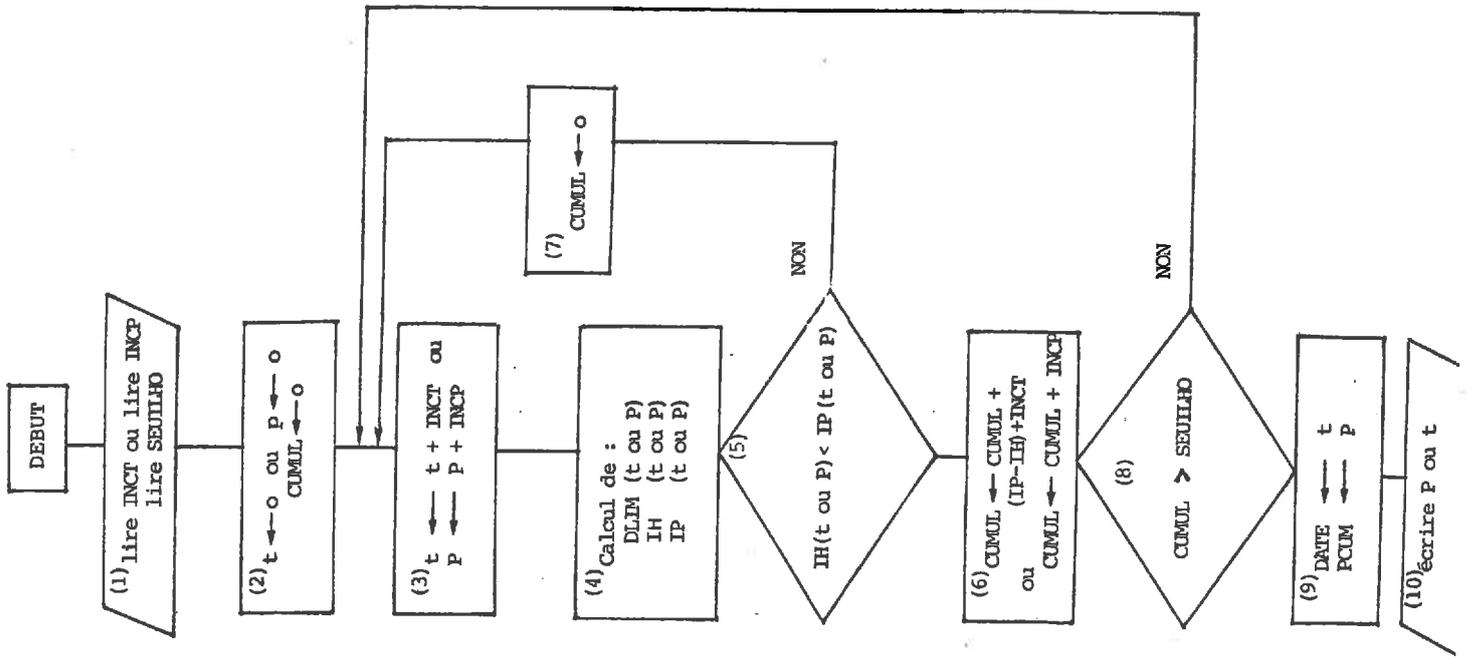
2.1.2. - Principes de réalisation des prédictions

Le diagramme est représenté sur la Fig. 51. La prédiction repose sur le calcul de la variable intermédiaire D_{lim} . Trois catégories de relations sont mises en jeu et le Tab. 50 rappelle les formes numériques que prennent ces relations dans le cas des sites de Palaiseau et Montluel.

C'est vraisemblablement surtout au niveau du rôle de la stabilité structurale que ce système prédictif demanderait à être perfectionné et précisé : nous n'avons pas prospecté une gamme suffisamment large de matériaux pour être en mesure de proposer une relation systématique entre les coefficients de la relation $D_{lim} = g (KE_i)$ et les taux d'agrégats stables. D'après les conclusions de la 3ème partie de ce mémoire, nous pouvons cependant suggérer que les critères de stabilité à considérer seraient les taux d'agrégats stables obtenus après prétraitement air et alcool, la pondération de chacun d'entre eux étant fonction de la teneur en argile.

Par ailleurs, l'histoire hydrique du sol n'est en l'état actuel prise en compte que de manière assez sommaire sous forme du terme additif β_{jk} . Il serait plus satisfaisant de traduire cette intervention au niveau des paramètres α_{ijk} de façon à respecter la condition initiale évidente $D_{lim} = 0$ pour $P = 0$.

FIG 52 : ORGANIGRAMME DE MODELISATION DU DECLENCHEMENT DE LA PHASE 2



- (1) INCT et INCP sont les incréments respectivement de temps (valeur souhaitable environ 1/6 heure) et de pluie cumulée (valeur souhaitable environ 1 mm), SEUILHO est la hauteur de la lame d'eau en excès à partir de laquelle se déclenchent des transferts significatifs de matière solide (HO = 5 mm).
- (2) Initialisation t est mesuré à partir de l'exposition aux pluies, P est la pluie cumulée à partir de ce moment ; CUMUL est la hauteur de la lame d'eau non infiltrée.
- (3) On boucle sur t (resp. P) par pas de INCT (resp. INCP).
- (4) Calcul des valeurs de Dlim et IH en fonction de t ou P et saisie de IP en fonction de t ou P dans le fichier ad.hcr. (enregistrements pluviographiques).
- (5) Premier test sur les valeurs de IH et IP.
- (6) Si IH est inférieur à IP l'eau s'accumule à la surface.
- (7) Sinon on annule CUMUL (l'eau en excès s'infiltré) et on incrémente.
- (8) 2ème test sur la valeur de CUMUL (test de sortie de boucle). Si le test est négatif on incrémente à nouveau.
- (9) Si le test est positif on a en sortie de boucle les valeurs de t ou P cherchées (déclenchement de la phase 2).

Il faut donc souligner à nouveau que la forme actuellement proposée pour la relation $D_{lim} = g (KE_i)$ est certainement très améliorable.

2.2. - MODELISATION DU DECLENCHEMENT DE LA PHASE 2

2.2.1. - Choix des variables, conditions de validité

La variable prédite est la date de déclenchement de la phase 2, exprimée soit en hauteur de pluie cumulée depuis l'exposition, soit en date réelle.

Les variables d'entrée sont :

- d'une part les valeurs de D_{lim} , déterminées soit directement à partir des mesures de S_p soit à partir des pluies déjà reçues par le sol, selon la procédure précédente ;
- d'autre part, les intensités et les hauteurs de pluie.

Le modèle proposé suppose :

- que la surface se colmate de façon progressive, aucun facteur de remaniement mécanique n'intervenant en cours de phase 1,
- que le sol ne se dessèche pas de manière importante, ceci ayant pour conséquence que dès réception de 1 à 2 mm de pluie au début d'une pluie les valeurs d'infiltrabilité sont celles du sol humide⁽¹⁾.

2.2.2. - Principes de réalisation des prédictions

La prédiction repose sur la règle précédemment énoncée : on considère que la phase 2 se déclenche à partir du moment où un certain volume de pluie a stagné ou ruisselé en surface.

L'organigramme proposé est indiqué sur la Fig. 52. Il s'agit d'une prédiction séquentielle puisque la variable d'entrée

(1) Si cette condition n'était pas respectée, il faudrait prendre en considération non plus I_H seul, mais lui adjoindre un flux de sorptivité, décroissant en fonction de la hauteur reçue.

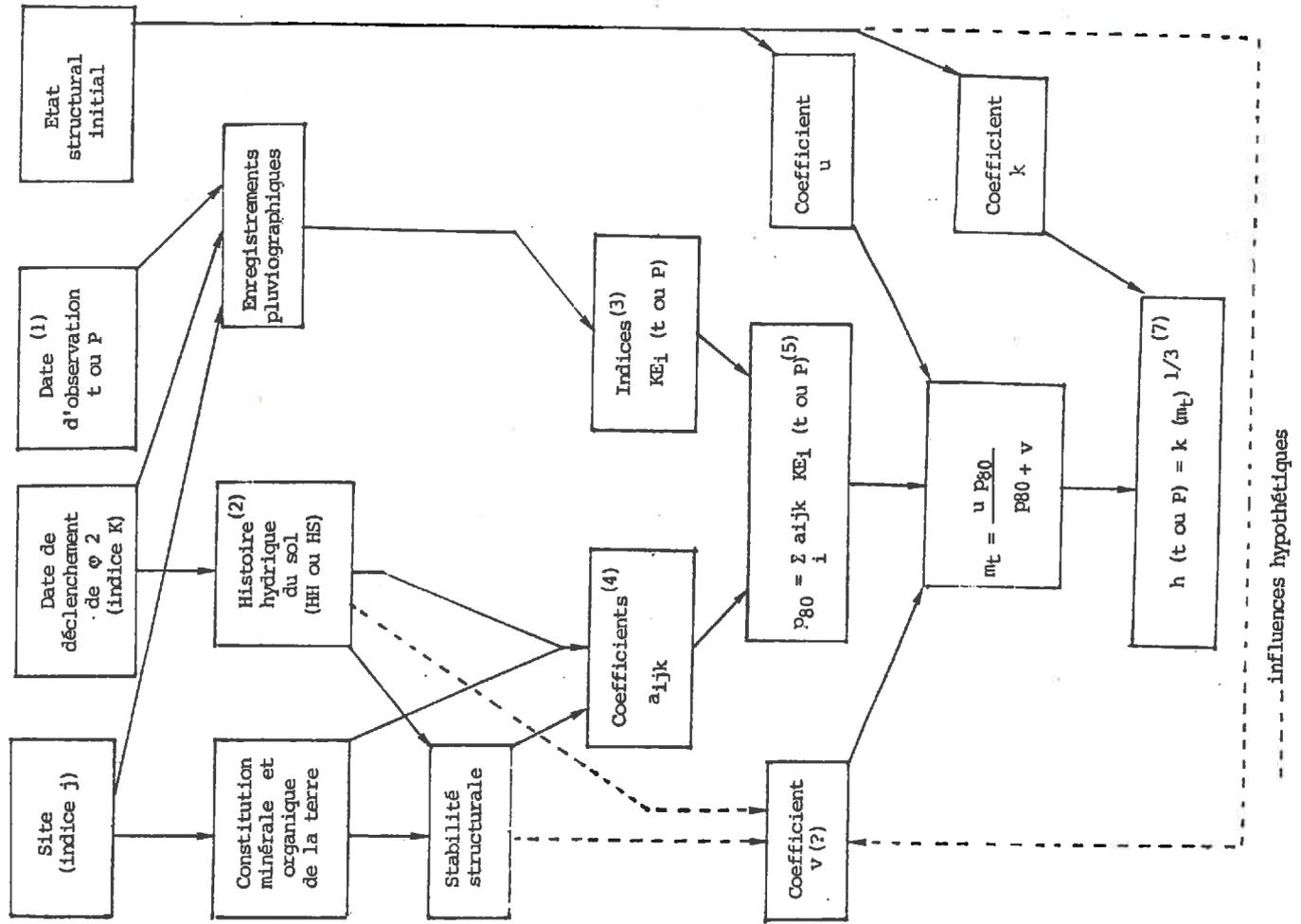


Fig 53 : DIAGRAMME DE MODELISATION DE L'ÉPAISSISSEMENT DES CROÛTES STRATIFIÉES AU COURS DE LA PHASE 2

(1), (2), (3) : Mêmes notations que fig. 51 mais les cumuls des indices KE se font à partir du déclenchement de la phase 2.

(4) Coefficients affectant chaque indice KE selon l'indice i (classe d'intensité des pluies) adéquat.

(5) P80 : Indice p80 cumulé depuis le début de la phase 2.

(6) m_t : Masse de terre transférée par unité de surface totale, cumulée depuis le début de la phase 2.

(7) h : Epaisseur maximum d'une croûte de dépôt.

Dlim augmente progressivement en fonction de l'énergie cinétique apportée.

Pour automatiser la prédiction, il serait donc nécessaire de concevoir un programme de découpage et de traitement des enregistrements pluviographiques permettant d'introduire pour chaque incrément successif les intensités et les indices KE adéquats.

L'ordre de grandeur souhaitable des incréments est le millimètre de hauteur de pluie. Pour un incrément de 5 mm la précision sur la date du déclenchement serait encore acceptable; le découpage des enregistrements pluviographiques et l'introduction des données par séquence seraient alors plus compliqués.

2.3. - MODELISATION DE L'EPAISSISSEMENT DES CROUTES EN COURS DE PHASE 2

2.3.1. - Choix des variables et hypothèses de travail

La variable de sortie est l'épaisseur maximum h d'une croûte stratifiée, mesurée à partir du point le plus bas d'une dépression qui commence à se combler à partir du début de la phase 2. Les variables d'entrée sont les indices KE cumulés à partir de cette même date.

Différentes hypothèses géométriques peuvent être envisagées. Les plus simples d'entre elles consistent à admettre comme nous l'avons fait dans le § 2.2.2. de la 2ème partie, que la géométrie des zones d'accumulation est fixée au départ et ne subit ensuite aucune modification, et que la densité des dépôts est sensiblement constante. On aurait alors (avec m_T masse de terre transférée cumulée):

$$h = k (m_T)^{1/3}$$

k étant une constante qui dépend de la densité des dépôts et de la géométrie de la surface au début de la phase 2.

De la même façon que précédemment on suppose un déroulement continu de la phase 2.

Enfin, on admet que les transferts s'opèrent selon les règles exposées au paragraphe 1.3.1. de la 2ème partie.

2.3.2. - Principe de réalisation des prédictions

Dans son principe, cette modélisation (Fig. 53) comporte trois étapes :

- une première étape relative aux masses de terre mobilisée. En l'absence d'un système d'évaluation directe, on passe par l'intermédiaire de l'indice p_{80} cumulé depuis la date de déclenchement de la phase. Celui-ci peut être prédit grâce à une combinaison linéaire des indices KE. Il minore la masse de terre mobilisée d'un facteur inconnu.
- d'autre part, le passage de l'indice p_{80} aux masses de terre transférée m_T . Ce passage doit intégrer :
 - . la minoration mentionnée ci-dessus,
 - . la configuration géométrique et la surface relative des zones de départ et d'accumulation.

En l'état actuel, sur la base des résultats exposés dans le § 1.3.2. de la 2ème partie, nous proposons de réaliser ce passage sous forme empirique en utilisant une relation de forme :

$$m_T = \frac{u \cdot p_{80}}{p_{80} + v}$$
 dont les coefficients u et v devraient être calés pour chaque site et vraisemblablement pour différentes classes de rugosité initiale u représentant sans ambiguïté le potentiel de terre transférable par unité de surface au sein d'une parcelle de pente générale nulle. La signification de v est, à première vue, plus complexe et dépend vraisemblablement à la fois de l'état initial et des relations entre p_{80} et les masses de terre mobilisées.

Rappelons que sur le site de Montluel avec différents états initiaux, nous avons obtenu en moyenne $u \approx 30$ et $v \approx 8$ T/ha.

- Enfin, le passage de m_T aux épaisseurs de croûtes, c'est-à-dire, comme nous venons de l'indiquer au paragraphe précédent, la configuration des surfaces réceptrices, la position du point de mesure de l'épaisseur des croûtes au sein d'une dépression et la densité des dépôts. Là encore, en l'état actuel, c'est la procédure empirique qui nous paraît la plus réaliste. Dans les conditions de Montluel si on retient comme variable de sortie l'épaisseur maximum des croûtes (celle correspondant approximativement au premier décile des variations de cote positives des microjalons), l'ordre de grandeur numérique de k (h étant exprimé en mm et m_T en T/ha) se situe entre 1,5 et 3.

2.4. - EXEMPLE D'APPLICATION

2.4.1. - Principe de la démarche et choix des données de départ

Nous considérerons les deux sites de Palaiseau et Montluel et nous chercherons à déterminer à quel stade de dégradation, c'est-à-dire au bout de combien de temps depuis l'exposition aux pluies un épisode pluvieux déterminé est susceptible d'engendrer la phase 2. Nous utiliserons donc à rebours les procédures de modélisation qui viennent d'être présentées.

Nous admettrons que l'épisode en question est une pluie de hauteur totale 5 mm, et d'intensité égale à 2, 5, 10 ou 40 mm/h, événements qui n'ont évidemment pas les mêmes probabilités à Palaiseau et Montluel (au cours des périodes d'enregistrement dont nous disposons, l'évènement 2 mm/h à Palaiseau a eu approximativement la même probabilité que l'évènement 5 mm/h à Montluel). Les résultats obtenus n'intégreront donc pas les caractéristiques climatiques du site étudié et leurs variations sont essentiellement liées aux caractéristiques du sol.

Pour que les quatre épisodes envisagés déclenchent la phase 2 il faut selon les règles exposées précédemment, et en utilisant les mêmes notations :

$$(I_p - I_H) \cdot 5 > SEUTL \cdot H_0$$

C'est-à-dire si $H_0 \approx 5$ mm

$$I_H \leq I_p - 1 \quad (\text{en mm/h})$$

Le principe de calcul va consister à déterminer les valeurs D_{lim} correspondant aux valeurs de I_H ainsi déterminées (soit 1, 4, 9 ou 39 mm/h), puis à calculer les indices KE cumulés qui permettent d'atteindre ces valeurs de D_{lim} . Enfin une valeur donnée de l'indice KE peut être obtenue selon un nombre illimité de combinaisons de pluies, mais pour concrétiser le résultat, nous calculerons la hauteur cumulée de pluies d'intensité égale à 5 ou 10 mm/h permettant d'atteindre ces valeurs. C'est à partir de ces données et des enregistrements météorologiques adéquats qu'on pourrait évaluer un laps de temps réel pour atteindre le début de la phase 2 ou réciproquement la probabilité que cet événement se réalise au sein d'une période déterminée (par exemple la décade ou la quinzaine faisant suite à un semis).

Il est important de noter que dans chaque cas on peut avoir recours à au moins deux variantes dans la prédiction des indices KE nécessaires :

TABLEAU 51.- CONDITIONS REQUISES POUR QU'UN EPISODE PLUVIEUX DETERMINE DECLENCHE LA PHASE 2.

SITE	INTENSITE de l'EPISODE DECLANCHANT LA PHASE 2 (mm/h)	ETAT de la SURFACE		HISTOIRE CLIMATIQUE DEPUIS L'EXPOSITION DE LA SURFACE (CLIMAT EN COURS DE PHASE 1)				
		I _H (mm/h)	D _{lim} (cm)	SEUIL x D'INTENSITE CONSIDERE (mm/h)	TYPE D'HISTOIRE HYDRIQUE DU SOL (1)	VALEUR KE x REQUISE (J/m ²)	HAUTEUR DE PLUIE CUMULI CORRESPONDANT mm à 10 mm/h mm à 5mm,	
PALAISEAU	2	1	1,9	10	H.H	187	9	-
				5		732	-	41
	5	4	0,8	10	H.H.	83	4	-
				5		339	-	19
	10	9	0,1	10	H.H	21	1	-
				5		89	-	5
	40	39	0	10	H.H	0 ⁺	0 ⁺	-
				5		0	-	0
MONTLUEL	2	1	5,8	5	H.H	1070	-	59
				5	H.S	1314	-	73
	5	4	3,7	5	H.H	611	-	34
				5	H.S	857	-	48
	10	9	2,4	5	H.H	345	-	19
				5	H.S	580	-	33
	40	39	0,1	5	H.H	ε	-	ε
				5	H.S	109	-	6

(1) H.H. : *histoire hydrique humide (moins de 10 % des pluies sur sol sec en surface)*

H.S. : *histoire hydrique sèche (plus de 20 % des pluies sur sol sec en surface)*

+ 0 : *passage immédiat à la phase 2.*

- Dans le cas du site de Palaiseau, on peut hésiter entre deux seuils d'intensité des pluies pour le calcul des indices KE (5 et 10 mm/h), les deux relations correspondantes (entre Dlim et KE, cf. Tableau 50) étant presque aussi étroites l'une que l'autre.
- Pour le site de Montluel, nous avons vu précédemment (Cf. Tableau 31) que l'indice KE₅ était un meilleur prédicteur de Dlim que l'indice KE₁₀. Par contre, il y a lieu de distinguer les cas où l'histoire hydrique du sol est respectivement humide ou sèche, cette distinction intégrant à la fois l'influence de conditions d'imbibition sur les possibilités de mouillabilité de la terre en fonction de son histoire hydrique.

2.4.2. - Résultats et discussion

D'après le Tableau 51, où sont récapitulés les diverses conditions envisagées et les résultats intermédiaires et finaux des calculs que nous venons d'indiquer, on constate que :

- bien évidemment, plus l'intensité de l'épisode susceptible de déclencher la phase 2 est élevée, moins le stade de dégradation nécessaire est avancé. A la limite des épisodes de très fortes intensités peuvent déclencher immédiatement la phase 2 ;
- si l'on se réfère aux hauteurs de pluies à une intensité de 5 mm/h, les "durées" de phase 1 requises sont, pour le même épisode pluvieux de déclenchement, moins importantes à Palaiseau qu'à Montluel. Ceci est lié à l'infiltrabilité de sol humide beaucoup plus faible, toutes choses égales par ailleurs, à Palaiseau qu'à Montluel ;
- par contre si on tient compte d'épisodes pluvieux ayant sensiblement les mêmes probabilités d'apparition dans l'un et l'autre site, les résultats obtenus sont comparables ;
- pour le site de Montluel, le rôle de l'histoire hydrique du sol est très sensible. Ceci est tout à fait cohérent avec les observations réalisées sur ce site, concernant la réduction du taux de levée en cas d'orage après semis (BOIFFIN et al., 1975, 1981). Cette réduction s'avère en effet nettement moins importante lorsque l'histoire hydrique du sol avant l'orage a été sèche que si elle a été humide ;

- pour le site de Palaiseau la question de savoir que seuil d'intensité il faut considérer vis-à-vis de la dégradation en cours de phase 1 est en l'état actuelle insuffisamment tranchée. En effet, les deux règles de prédiction utilisées (basées respectivement sur des seuils de 10 et 5 mm/h) aboutissent à des résultats assez sensiblement différents.

On retiendra en définitive que les ordres de grandeur des résultats obtenus et leur variabilité s'avèrent tout à fait compatibles avec les quelques références empiriques disponibles. Pour obtenir des prédictions plus sûres et plus précises, il est clair que des résultats supplémentaires devraient être acquis, permettant d'établir les relations intermédiaires à partir d'une gamme plus importante de combinaisons entre type de sol et histoire climatique en cours de phase 1.

†

L'un des apports essentiels de notre travail est de proposer des démarches relativement simples pour obtenir ces références, les principes d'établissement et les techniques de mesure pouvant être considérés comme acquis : il s'agit de déterminer différents stades de dégradation, les taux de recouvrement par les plaques continues (pour en déduire D_{lim}), et les valeurs d'infiltrabilité du sol humide, tout en réalisant parallèlement des enregistrements pluviographiques suffisamment fins.

Le test des procédures de modélisation présentées ci-dessus devrait consister à vérifier qu'en un site donné et pour un type d'histoire climatique donné, on peut définir un ensemble de valeurs stables des coefficients des relations numériques permettant de prédire les variables choisies.

Outre la validité des organigrammes proposés, cette stabilité démontrerait qu'en un site donné et pour un type d'histoire climatique déterminé, on peut admettre qu'il existe une combinaison déterminée de régimes de détachement et de déplacement des particules solides.

.....

CONCLUSION GÉNÉRALE

.....

CONCLUSION GENERALE

Notre démarche a eu pour origine une préoccupation d'agronome : mieux évaluer et maîtriser les risques culturels liés à l'obtention d'états physiques défavorables au sein du profil cultural, afin d'intégrer ces risques dans le jugement et la conception des systèmes de culture. Pour atteindre cet objectif, il nous est apparu utile de chercher à établir un lien explicatif aussi continu que possible entre les causes et les manifestations de la dégradation structurale du sol. Or, la partie la plus faible de cette chaîne explicative concerne l'évolution des états du sol in situ : alors que la constitution des matériaux et les propriétés liées à cette constitution ont été l'objet d'investigations nombreuses et approfondies, le domaine des comportements du sol au champ est resté peu prospecté et même dans les travaux concernant l'érosion, l'évolution des états du sol est généralement considérée comme une "boîte noire".

Pour notre part, nous avons entrepris d'analyser le comportement structural de la surface du sol sous l'action des pluies. Ce choix tient non seulement à la gravité des conséquences impliquées, mais aussi au fait que, pour aborder ce sujet, nous pouvions nous appuyer sur les acquis des travaux menés en France, sous l'impulsion de S. HENIN, sur les processus de désagrégation. Nous espérons ainsi être mieux à même d'illustrer dans ce cas la nécessité plus générale de considérer le comportement du sol en place comme un objet d'étude à part entière. Au terme de ce travail, nous pensons que ce point de vue est renforcé et précisé : ce n'est pas en soi la complexité ni le caractère aléatoire du milieu naturel qui particularisent le comportement du sol en place, mais bien la spécificité des objets d'étude qu'il faut appréhender pour en rendre compte dans une perspective finalisée. Ainsi il s'est avéré nécessaire :

- de caractériser l'évolution structurale à des niveaux décimétrique et métrique. Ce sont bien les niveaux de perception que retient l'agronome (il parle alors de "placette" et de "station") pour caractériser le peuplement végétal et mettre en relation son fonctionnement avec les états du milieu. Mais c'est aussi et seulement en se situant à ce niveau qu'une portion de terrain peut apparaître comme uniforme vis-à-vis des conditions de la dégradation structurale, et en particulier d'une des plus déterminantes, l'état structural initial.
- d'appréhender la succession des états du sol comme une histoire, qui puisse être exprimée en temps réel. En effet, la dégradation structurale du sol par les pluies n'est pas la répétition d'une multitude de micro-dégradations identiques et indépendantes. Elle est le résultat d'interactions entre des processus cumulatifs et accidentels, qui précisément interfèrent dans le temps. De plus, le temps est bien

souvent la seule dimension commune des phénomènes que l'agronome cherche à mettre en relation ; on ne peut comprendre la levée d'une culture que si les états du sol et ceux de la plante sont replacés sur une même échelle chronologique (avec un pas de temps de l'ordre de la journée), chacune de ces variables répondant à un déterminisme particulier.

- de prendre en considération toutes les causes de variabilité du phénomène susceptibles de jouer un rôle important au champ, c'est-à-dire non seulement l'influence des caractéristiques permanentes du terrain mais aussi celle de facteurs techniques très variables d'une parcelle à l'autre : calendrier d'occupation du sol par les couvert végétaux, nature et conditions de réalisation des opérations de travail du sol, régime d'entretien organique.
- enfin, et surtout, de rendre compatibles des catégories de variables et de données fondamentalement hétérogènes notre démarche a consisté pour l'essentiel à essayer d'exprimer les facteurs, les conditions et les résultats de dégradation structurale à l'aide de grandeurs de même dimension ou en tout cas de dimensions telles que leur mise en relation ait un sens. Ayant admis que l'approche morphologique était un point de passage obligatoire pour comprendre l'influence du sol sur le comportement du végétal, nous avons alors tenté :
 - . d'exprimer cette approche en termes géométriques, l'évolution morphologique devenant une modification de répartition et d'agencement des volumes solides
 - . de relier ces modifications géométriques à des quantités (volumes, puis masses) de terre déplacée ;
 - . de mettre en relation ces masses de terre déplacée, résultat d'un certain travail, d'une part avec les caractéristiques énergétiques des pluies, d'autre part, avec les résultats des tests de caractérisation des matériaux qui sont précisément exprimés en masse relative de terre désagrégée.

0

0 0

Objet d'étude spécifique le comportement du sol en place doit être abordé à l'aide de méthodes adaptées aux règles d'appréhension spatiale et chronologique qui viennent d'être rappelées. Les travaux concernant cet objet en tant que tel ayant été jusqu'à présent très rares, nous avons dû mettre au point voire élaborer différentes méthodes et techniques d'investigation.

Pour nous limiter aux aspects les plus généralisables et les plus utiles pour aborder d'autres aspects du comportement du sol en place, nous soulignerons deux principes :

- la nécessité et l'efficacité d'une association étroite entre les approches morphologiques et les méthodes de mesure physique généralement plus ponctuelles. Déjà bien mis en exergue par MANICHON (1982) à propos de la description de l'état structural du profil, ce principe trouve dans nos résultats une nouvelle confirmation. On peut penser qu'il constitue une des clés des "transferts d'échelle", c'est-à-dire de l'utilisation des connaissances acquises à un niveau restreint de complexité, pour comprendre le fonctionnement de systèmes de dimension supérieure. A elle seule l'approche morphologique est insuffisante car elle ne donne pas aisément accès à des variables physiques quantitatives, et à fortiori intensives. Inversement, toute mesure physique prétendant caractériser directement l'interface sol atmosphère (résistance à la pénétration, albédo, conductivité) n'est en elle-même que purement contingente du moment et du micro site où elle s'opère : elle ne reprend une signification précise vis-à-vis de l'ensemble de la surface du sol et de son histoire que référée à un état morphologique défini qui, lui, peut être resitué dans une typologie, une cartographie et un déroulement.

Ainsi la mise en évidence d'une structure générale du déroulement de l'évolution morphologique de la surface du sol, qui constitue l'un des résultats principaux de notre travail, devrait permettre d'aborder de manière efficace l'évaluation quantitative des conséquences physiques et agronomiques de la dégradation structurale.

- La nécessité de concevoir et de mettre en oeuvre des méthodes d'investigation aussi peu destructrices que possible et permettant d'intégrer à un niveau décimétrique ou métrique les hétérogénéités de maille inférieure (milli ou centimétrique). A cet égard, un exemple apparemment satisfaisant est la méthode de l'évaluation de la conductivité hydraulique saturée de l'interface sol-atmosphère que nous avons mise au point.

Pour caractériser le sol au niveau de perception métrique nous n'avons pratiquement eu comme seule possibilité que de répéter, au sein d'une même unité expérimentale, les mesures saisies au niveau décimétrique. Cette option ne présente pas, à nos yeux, d'inconvénient grave tant que les microsites fonctionnels sont répartis à la surface du sol précisément avec une maille décimétrique. A partir du moment où les transferts d'eau et de matière solide

s'opèrent sur des distances supérieures, et en particulier si l'on veut étudier l'érosion, le manque de méthodes de préhension du terrain au niveau de perception métrique devient une lacune sérieuse qu'il sera important de combler sans doute avec l'aide privilégiée des techniques de télédétection, mais aussi comme nous venons de l'indiquer en s'appuyant sur la typologie morphologique.

0

0 0

En nous efforçant de mettre en oeuvre ces différents principes méthodologiques nous sommes parvenu à dégager une interprétation générale de la dégradation structurale de la surface du sol sous l'action des pluies, débouchant sur des relations descriptives ou prévisionnelles quantifiées. Il est clair que ces relations reposent, pour le moment, sur un effectif de résultats expérimentaux encore insuffisant (et en particulier acquis dans une gamme de stabilité structurale du sol trop peu étendue) pour que l'on puisse les considérer comme utilisables dans leur forme numérique actuelle. Par contre, nous pouvons envisager dès à présent, d'un point de vue qualitatif, les conséquences et les possibilités d'application de ces résultats.

1/ - Un premier aspect concerne la maîtrise des risques culturels liés à la battance, c'est à dire ayant principalement trait à la réussite des semis. Cette maîtrise passe par l'utilisation de différents moyens impliquant des décisions techniques à plus ou moins long terme.

Ils peuvent être examinés à la lumière de l'hypothèse selon laquelle le déclenchement de la phase 2 constitue un stade critique de la dégradation structurale.

a) - Pour retarder le plus possible ce déclenchement par rapport à l'émergence des plantules, il faut ralentir la décroissance de l'infiltrabilité. Or, celle-ci est contrôlée par les gradients de succion et donc le profil hydrique au début de la pluie et par la conductivité hydraulique en régime saturé des différents horizons où se réalise l'écoulement. Il y a donc trois points-clé :

- favoriser le ressuyage des couches ameublées. Ce sont alors l'ensemble des techniques de lutte contre l'excès d'eau qui sont concernées ;

- éviter la formation d'obstacles structuraux à faible profondeur : il est clair que, dans les zones d'engorgement immédiat que sont les traces de roue

la phase 2 se déclenche beaucoup plus rapidement qu'ailleurs. Ceci met en cause les techniques de travail du sol et spécialement de confection du lit de semence.

- ralentir la décroissance de l'infiltrabilité pendant la phase 1, c'est-à-dire ralentir la dégradation de la mince couche immédiatement superficielle. Le problème se résume à limiter autant que possible la désagrégation par éclatement. Pour cela, on doit s'efforcer :

- . à court terme, d'éviter le plus possible la formation microlocale d'excès d'eau et la présence à la surface du sol de terre fine très sensible à l'éclatement. Ceci suppose d'éviter une fragmentation excessive lors des façons superficielles et d'utiliser à bon escient l'effet de tri vertical que peuvent exercer certains outils (en particulier les instruments à dents non animés tels que les herse ou canadiens).
- . à moyen et long terme, favoriser dans la mesure du possible, l'obtention ou le maintien d'une stabilité structurale élevée. Ceci met essentiellement en cause la politique d'entretien organique des terres de l'exploitation. Les résultats obtenus dans ce travail indiquent que les variations de statut organique induites en environ 20 ans de pratique de systèmes de culture nettement contrastés n'ont eu qu'une influence modeste sur le comportement du sol au champ : d'une part, les différences de teneur restent malgré tout limitées. D'autre part, le rôle des matières organiques concerne surtout les processus d'éclatement, or ceux-ci ne jouent qu'un rôle restreint lorsque les agglomérats terreux sont humides ; d'ailleurs l'influence des substances organiques sur la mouillabilité dépend beaucoup de l'histoire hydrique de la périphérie des fragments. Enfin, et surtout, la dégradation structurale fait intervenir non seulement la stabilité structurale mais tous les autres comportements structuraux intrinsèques ; ainsi une terre relativement stable mais très apte à la microfissuration peut s'avérer rapidement dégradable du fait d'une mobilisation de terre importante.

Finalement, sans contester l'intérêt pratique de l'effet stabilisateur des matières organiques, qui se manifeste de façon indiscutable sur le comportement après un retournement de prairie permanente où sur des parcelles recevant des apports massifs de fumier, ni leur rôle sur d'autres aspects de la fertilité, nous pouvons dire qu'il serait illusoire de prétendre contrôler la battance par le seul biais d'une politique d'entretien organique⁽¹⁾. Une question importante

(1) On confirme ainsi une des hypothèses de départ des fondateurs du dispositif de Montluel (SEBILLOTTE, 1968).

à ce sujet est de savoir si l'extériorisation d'une différence de teneur en matières organiques varie ou non suivant le niveau de cette teneur : les travaux de MONNIER (1965) suggèrent en effet l'existence d'effets de seuil. Nous sommes ici renvoyés à la nécessité de poursuivre le travail sur une gamme plus large de matériaux.

- b) - Une fois la phase 2 déclenchée, la vitesse d'épaississement des croûtes dépend avant tout de la masse de terre mobilisée par unité de surface, élément peu contrôlable, si ce n'est par le biais de la stabilité structurale, et du rapport des surfaces de départ aux surfaces d'accumulation. A cet égard, le caractère motteux de la surface n'apparaît plus unilatéralement favorable puisqu'il peut engendrer un épaississement très rapide des croûtes au niveau de sites d'accumulation de surface restreinte. Le moyen de contrôle technique le plus évident est l'obtention d'un modelé adéquat de la surface du sol après semis, la situation la plus favorable consistant à ce que les lignes de placement des graines soient légèrement en relief. L'obtention d'un tel modelé suppose la présence et le réglage correct d'accessoires ad hoc, sur les semoirs.
- c) - Enfin, une troisième catégorie de moyens de lutte consiste à diminuer la durée de la phase germination-levée c'est-à-dire le risque de pluies pendant cette période. Cette durée dépend de manière assez complexe de la profondeur de semis et celle-ci fixée, est avant tout contrôlée par la température et dépend donc surtout de la date de semis. On peut dire que pour les cultures d'automne le fait d'avancer les semis (et inversement pour les cultures de printemps le fait de la retarder) correspond statistiquement à une diminution des risques d'échec des semis du fait de la battance. Par ailleurs, il ne faut sans doute pas négliger l'effet des premiers stades de la dégradation (diminution rapide de la rugosité en cours de phase 1) sur le bilan thermique du lit de semence. On retrouve à nouveau l'intérêt d'une surface relativement motteuse, donc présentant une rugosité initiale élevée et par la suite une faible vitesse d'extension des plaques continues. Pour évaluer l'importance réelle de cet aspect il serait utile par la suite de préciser l'évolution de l'albédo en cours de phase 1.

En définitive, on voit que nos travaux permettent avant tout de valider et de pondérer l'intérêt de moyens techniques déjà préconisés et plus ou moins bien utilisés pour se prémunir des risques de battance.

2 - C'est donc surtout comme outils de diagnostic et de prévision que les résultats obtenus pourraient être valorisés, et ce dans deux directions :

a) - L'évaluation des risques d'échec des semis, basée sur l'estimation de la probabilité pour que la phase 2 se déclenche avant qu'un certain laps de temps (fonction de la température) soit écoulé depuis le semis. Cette estimation se réalisant à partir d'une analyse fréquentielle rétroactive, il faudrait pouvoir disposer d'enregistrements pluviographiques sur de longues séries chronologiques, ou, à défaut, obtenir à partir de séries plus restreintes des relations empiriques entre les indices KE cumulés par décades et les hauteurs et durées de pluies. Ce type de références devrait être établi pour quelques grandes stations météorologiques au sein du territoire afin de tenir compte des variantes régionales de structure des pluies. Une fois testée et mise au point, pour différents types de semences et plantules, cette procédure d'évaluation des risques permettrait aux agronomes de mieux discuter les itinéraires techniques employés au niveau d'une parcelle ; ainsi que les calendriers culturaux, l'assolement et l'équipement d'une exploitation. On peut aussi imaginer que cette procédure permettrait d'apprécier de manière plus objective les conséquences d'une variation de stabilité structurale. On aperçoit le parti qui pourrait en être tiré vis-à-vis de l'établissement des normes concernant la teneur en matière organique du sol ou le niveau calcique du sol à rechercher.

b) - L'évaluation du ruissellement et de l'érosion

La compréhension et la prévision du ruissellement au niveau d'une parcelle ou de petits bassins versants agricoles se heurte au problème de la variabilité, dans le temps et dans l'espace, des régimes d'infiltration (GASCUEL-ODOUX et al., 1983).

De ce point de vue, la connaissance des relations entre infiltrabilité et état de surface, et la possibilité de décrire et de prévoir l'évolution de cet état en un lieu donné en fonction du temps constitue un apport important.

En matière d'érosion, la plupart des approches opérationnelles actuelles restent basées sur l'équation universelle des pertes en terre (WISCHMEIER et al., 1958). Or les modalités de conception de cet outil et les conditions d'obtention des références numériques qui lui sont associées sont telles qu'il est difficile de l'appliquer à

un niveau spatial et chronologique relativement fin (par exemple celui d'une parcelle agricole donnée pour une fraction de campagne culturale), a fortiori en dehors du domaine géographique où il a été mis au point. Ces limites ont d'ailleurs été nettement soulignées par les concepteurs eux-mêmes (WISCHMEIER, 1976) et par de nombreux autres auteurs (par exemple ROOSE, 1980).

Concrètement, les termes de l'équation qui apparaissent particulièrement difficiles à quantifier lorsqu'on cherche à effectuer ce changement d'échelle, sont d'abord et avant tout : le facteur C, qui est censé exprimer l'influence d'ensemble du système de culture (incluant le calendrier d'occupation du sol, l'effet des techniques de travail du sol sur l'état du profil et de la surface et l'influence de diverses techniques sur la vitesse de recouvrement du sol par les cultures) ; et dans une moindre mesure les facteurs K (érodibilité du sol) et R (érosivité des pluies). Pour résumer de manière schématique cette difficulté on peut dire que deux éléments de variabilité sont en l'état actuel mal pris en compte :

- . la vitesse de déroulement des phases préparatoires de l'érosion, qu'il est essentiel de pouvoir confronter d'une part, à celle, également très variable, du recouvrement par la végétation, d'autre part, à la répartition chronologique des pluies les plus agressives ;
- . les processus de mobilisation de terre peu influencés par l'énergie cinétique des pluies (microfissuration et désagrégation par éclatement). Leur intervention fait que les seuils d'intensité habituellement considérés pour apprécier l'érosivité des pluies sont, d'après les résultats obtenus, trop élevés et donc conduisent à sous-estimer les risques d'érosion dans les régions du Nord Ouest de l'Europe caractérisées, en moyenne, par des pentes faibles et des pluies précipitantes mais par des sols à dominante limoneuse. Sur ce point, nos conclusions convergent avec celles de chercheurs Belges (de PLOEY, 1979, 1980 ; BOLLINNE, 1982) pour lesquels l'érosion dans ces zones est depuis plusieurs années un sujet réel de préoccupation.

Les résultats présentés dans ce mémoire peuvent contribuer à la résolution de ces deux problèmes, d'une part en permettant de prévoir l'évolution chronologique de l'infiltrabilité, d'autre part, en fournissant des éléments pour une meilleure interprétation et une meilleure évaluation des masses de terre mobilisées.

Le thème de la dégradation physique des sols retient une attention croissante de la part des agriculteurs, des techniciens et des pouvoirs publics. Ceci tient sans doute en grande partie au fait que le progrès technique a permis de résoudre des problèmes auparavant prédominants et qui masquaient l'influence de l'état physique du sol. Mais il y a peut être aussi dans certains cas, une baisse tendancielle peu réversible de certains critères de fertilité physique.

La dégradation structurale de la surface du sol est avant tout une évolution à court terme, qu'on ne peut assimiler en soi à une "dégradation du sol". Ceci ne veut pas dire qu'il n'y ait aucun rapport entre ces deux notions.

Ainsi la dégradation structurale à court terme peut, dans une certaine mesure, favoriser et même provoquer une dégradation à moyen ou long terme peu réversible. Nous avons déjà souligné les relations qui existent entre battance et érosion. Par ailleurs, il n'est certainement pas sans conséquence qu'environ 1 pour cent de la masse de terre de l'horizon labouré soit soumise chaque année à une désagrégation presque complète et réincorporée dans le sol à l'état de particules élémentaires. On peut même penser que ceci représente⁽¹⁾ un potentiel de transformation du sol bien plus rapide que certains processus de pédogenèse couramment invoqués pour expliquer la différenciation verticale des profils cultivés. A cet égard, les pratiques agricoles, en exposant le sol aux pluies dans un état fragmentaire, jouent un rôle aggravant indéniable.

En fait la dégradation à court terme doit surtout être envisagée comme un révélateur de la dégradation du sol c'est-à-dire de l'évolution défavorable de ses propriétés. On retrouve ici le problème souvent évoqué de la baisse des teneurs en matière organique entraînant une diminution de la stabilité structurale. Toutes choses égales par ailleurs, il en résulterait une augmentation, dans les terres limoneuses, de la vitesse de dégradation de la surface du sol. Mais notre travail montre que ce "toutes choses égales par ailleurs" est extrêmement difficile à réaliser et que la vitesse de dégradation de la surface du sol ne dépend pas seulement -et sans doute même pas au premier chef- de la stabilité structurale.

Ceci débouche sur une conclusion plus générale. Pour traiter correctement les problèmes de dégradation des sols, il faut absolument dépasser le stade de l'inventaire des processus élémentaires qui peuvent éventuellement conduire à une dégradation du sol. Sachant mal comment ces processus se combinent

(1) Même sans aller jusqu'à l'érosion différentielle dont ROOSE (1980) a montré le rôle prééminent dans la dynamique de formation des sols tropicaux.

en vraie grandeur, on les invoque souvent de manière abusiv et arbitraire à titre d'explication de problèmes agricoles ou même de comportements du terrain qui devraient être appréhendés à une tout autre échelle : c'est finalement le règne de l'opinion, et au bout du compte de l'inefficacité car les agriculteurs ne sont guère convaincus. Pour remédier à cette situation l'urgence est donc bien d'identifier avec rigueur et précision les symptômes d'une réelle dégradation d sol, et d'en tirer les indicateurs de constitution ou de comportement des matériaux nécessaires pour un dépistage permettant les actions préventives. Ceci milite pour un développement de l'étude systématisée des comportements du sol in si

1954

B I B L I O G R A P H I E

1954

BIBLIOGRAPHIE

- ARNDT W., 1965. The nature of the mechanical impedance to seedlings by soil surface seals. *Aust. J. Soil Res.*, 3, 45-54.
- ARNDT W., 1965. The impedance of soil seals and the forces of emerging seedlings. *Aust. J. Soil Res.*, 3, 55-68.
- ASSELIN J., VALENTIN C., 1978. Construction et mise au point d'un infiltromètre à aspersion. *Cah. ORSTOM, Sér. Hydrol.*, 15, 1-31.
- BEST A.C., 1950. The size distribution of raindrops. *Quarterly J. of the Roy. Meteor. Soc.*, 76, 16.
- BISAL F., 1950. Calibration of splash cup for soil erosion studies. *Agric. Engng*, 31, 621.
- BISHAY B.G., STOOPS G., 1975. Micromorphology of irrigation crusts formed on a calcareous soil of the mechanized farm, northwest Egypt. *Pedologie*, 25 (2), 143.
- BOIFFIN J., 1976. Histoire hydrique et stabilité structurale de la terre. *Ann. Agron.*, 27 (4), 447-463.
- BOIFFIN J., FABRE B., GAUTRONNEAU Y., SEBILLOTTE M., 1981. Les risques de mauvaise levée du colza d'hiver en terre battante. *Info. Tech. CETIOM n° 73*.
- BOIFFIN J., MONNIER G., 1982. Etats, propriétés et comportements des sols : recherche et utilisation de critères de fertilité physique. *Bull. Tech. Info.*, N° 370-372, p 401-408.
- BOIFFIN J., POUZET A., ROLLIER M., 1980. Un siècle d'évolution du colza en France : surfaces, rendements, maîtrise technique. *Info. Tech. CETIOM n° 70*, 11-31.
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., DUBY C., 1975. Influence des conditions écologiques et de l'histoire culturale sur le rendement du maïs-grain. Analyse de 8 campagnes sur un essai de longue durée. *Ann. Agron.*, 26 (5), 555-591.
- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., 1976. Climat stabilité structurale et battance. Essai d'analyse d'un comportement du sol au champ. *Ann. Agron.*, 27 (3), 295-325.

- BOIFFIN J., SEBILLOTTE M., TAGAUX M.J., 1982. Systèmes de culture e fertilité des sols limoneux : effets de l'enfouissement des pail les et de la prairie temporaire en champ d'essai de longue durée In La Transformation des terres, n° Spéc. Recherche Environnemen. 74-103.
- BOLLINNE A., 1975. La mesure de l'intensité du splash sur sol limo- neux. Mise au point d'une technique de terrain et premiers résul tats. *Pédologie*, 25 (3), 199-210.
- BOLLINNE A., 1980. Splash measurements in the field. p. 441-453. In. M. DE BOODT et D. GABRIELS. Proc. of the workshop GHENT, 1978, J. WILEY and sons Ltd. 563 p.
- BOLLINNE A., 1982. Etude et prévision de l'érosion des sols limoneux cultivés en moyenne Belgique. Thèse Université de Liège. 356 p. + annexes.
- BOULAIN J., 1978. Cours de Pédologie Générale. I.N.A. P-G, 238 p.
- BREWER R., 1964. Classification of plasmic fabrics of soil material. p. 95-105. In A. JONGERIUS. Soil micromorphology. Elsevier pub. Company, Amst. Lond., N.Y. 540 p.
- BRYAN R.B., 1968. The development, use and efficiency of indices of soil erodibility. *Geoderma*, 2, 5-25.
- BRYAN R.B., 1974. A simulated rainfall test for the prediction of so. erodibility. *Z. Geomorph. N.F., Suppl. Bd 21*, 138-150.
- BRYAN R.B., 1976. Considerations on soil erodibility indices and sh wash. *CATENA*, 3, 99-111.
- BURGEVIN H., HENIN S., 1939. Dix années d'expériences sur l'action des engrais et les propriétés d'un sol de limon. *Ann. Agron.* 771-799.
- BUSCH C.D., ROCHESTER E.W., JERNIGAN C.L., 1973. Soil crusting relat to sprinkler intensity. *Trans. ASAE*, 808-809.
- CANARACHE A., 1965. Les facteurs de la résistance mécanique des sol et les méthodes utilisées pour les étudier. *Sci. Sol*, 2, 89-107.
- CEMAGREF, 1983. Côtitière des Dombes. Hydrologie, hydraulique et aspe économiques. Travaux à entreprendre. CEMAGREF, 195 p.
- CHASSIN P., 1979. Détermination de l'angle de contact acides humiques solution aqueuse de diols, conséquence sur l'importance relative des mécanismes de destruction des agrégats. *Ann. Agron.*, 30 (6) 491.

- CHEN Y., TARCHITZKY J., BROUWER J., MORIN J., BANIN A., 1980. Scanning electron microscope observations on soil crusts and their formation. *Soil Sc.*, 130 (1), 49-55.
- CHEVERRY C., 1983. Le tassement et la portance des sols en rotations céréalières intensives. C.R. Journées d'études Rotations céréalières intensives. ONIC Paris.
- COLLIS-GEORGE N., LAL R., 1971. Infiltration and structural changes as influenced by initial moisture content. *Aust. J. Soil Res.*, 9, 107-116.
- CONCARET J., 1967. Etude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact des solutions aqueuses. *Ann. Agron.*, 18(2), 65-90.
- DE LEENHEER L., DE BOODT M., 1954. Discussion on the aggregate analysis of soils by wet sieving. *Trans. 5th int. Congr. Soil Sci.* 2, 111-117.
- DE PLOEY J., 1977. Some experimental data on slope wash and wind action with reference to quaternary morphogenesis in Belgium. *Earth Surface Processes*, 2, 101-115.
- DE PLOEY J., 1978. A consistency index and the prediction of surface crusting on Belgian loamy soils. p. 135-137. In H. VOGT et T. VOGT. Actes du colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Université L. Pasteur-STRASBOURG. INRA COLMAR 264 p
- DE PLOEY J., 1979. Aktieve Hellingserosie in Belgie. *Bull. Soc. Belge Géol.*, 88 (1-2), 137-142.
- DE PLOEY J., 1980. Crusting and time-dependent rain wash mechanisms on loamy soils, p. 139-152. In R.P.S. MORGAN. *Soil Conservation: problems and prospects*. Chichester U.K., J. WILEY and sons. 312 p.
- DE PLOEY J., 1981. Some Laboratory Techniques for investigating land erosion. In *Erosion and Sediment Transport Measurement*. Proc. of FLORENCE Symp. IAHS Publ. n° 133.
- DE PLOEY J., 1981. The ambivalent effects of some factors of erosion. *Mém. Inst. géol. Univ. Louvain*, 31, 171-181.
- DE PLOEY J., GABRIELS D., 1980. Measuring soil loss and experimental studies. p. 63-96. In M-J KIRBY et R.P.C. MORGAN. *Soil Erosion*. J. WILEY and Sons Ltd. 312 p.
- DE PLOEY J., J. MUCHER H.J., 1981. A consistency index and rain wash mechanisms on Belgian loamy soils. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, 319-330.

- DEXTER A.R., 1977. Effect of rainfall on the surface micro-relief of tilled soil. *J. Terramechanics*, 14 (1), 11-22.
- DHIR R.P., KOLARKAR A.S., SHARMA B.K., SHARMA M.L., 1974. A note on particle size distribution in surface crust in an arid zone soil. *J. Indian Soc. Sci.*, 22 (4), 377-378.
- DULEY F.L., 1939. Surface factors affecting the rate of intake of water by soils. *Soil Sc. Soc. Amer. Proc.*, 4, 60-64.
- DUMAS J.; 1965. Relation entre l'érodibilité des sols et leurs caractéristiques analytiques. *Cah. ORSTOM, Sér. Pédol.*, 3 (4), 307-333.
- EKERN P.C., 1950. Raindrop impact as the force initiating soil erosion. *Proc. Soil Sc. Soc. Am.*, 15, 7-10.
- EL HABIB F., 1980. Effet de la taille des gouttes et des fortes pluviométries sur la structure des sols et la levée d'une culture. *Mémoire I.N.A. Tunis. CTGREF Bordeaux*. 150 p.
- ELLISON W.D., 1944. Studies of raindrop erosion. *Agric. Engng*, 25, 131-136, 181-182.
- ELLISON W.D., 1947. Soil erosion. *Soil. Sci. Soc. Am. Proc.*, 12, 479-484.
- ELLISON W.D., 1954. Mechanics of water erosion. *C.R. V^e Congrès Intern. Sc. Sol*, 3, 380-387.
- EMERSON W.W., 1967. A classification of soil aggregates based on their coherence in water. *Aust. J. Soil Res.*, 5, 47-57.
- EPSTEIN E., GRANT W.J., 1967. Soil losses and crust formation as related to some soil physical properties. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 31, 547-549.
- EPSTEIN E., GRANT W.J., 1973. Soil crust formation as affected by raindrop impact. p. 195-201. In A. HADAS. *Physical aspects of soil water and salts in ecosystems. Ecological Studies*, springer-verlag (edit.), Berlin.
- EVANS D.D., BUOL S.W., 1968. Micromorphological study of soil crusts. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32 (1), 19-22.
- FARREL D.A., MOLDENHAUER W.C., LARSON W.E., 1974. Splash correction factors for soil erosion studies. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 38, 510-514.

- FARRES P.J., 1978. The role of time and aggregate size in the crusting process. *Earth Surface processes*, 3, 243-254.
- FARRES P.J., 1980. Some observations on the stability of soil aggregates to raindrop impact. *CATENA*, 7, 223-231.
- FAURE A., 1978. Comportement des sols au compactage : rôle de l'argile et conséquences sur l'arrangement des grains. Thèse Grenoble 178 p.
- FEODOROFF A., 1960. Evaluation de la stabilité structurale d'un sol (indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. agron.*, 11, 651-659.
- FEODOROFF A., 1965. Mécanismes de l'érosion par la pluie. *Revue de Géographie physique et de géologie dynamique*, 7 (2), 149-163.
- FIES J.C., 1970. Recherche de paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol : influence de la surface spécifique des éléments du squelette sur la stabilité structurale. *Sci. Sol*, 2, 27-37.
- FIES J.C., STENGEL P., 1981 a. Densité texturale des sols naturels. I. méthode de mesure. *Agronomie*, 1 (8), 651-658.
- FIES J.C., STENGEL P., 1981 b. Densité texturale des sols naturels. II. Eléments d'interprétation. *Agronomie*, 1 (8), 659-666.
- FOURNIER F., 1960. Climat et érosion : la relation entre l'érosion du sol par l'eau et les précipitations atmosphériques. Thèse Paris, P.U.F., 201 p.
- FREE G.R., 1960. Erosion characteristics of rainfall. *Agric. Engng*, July, 447-455.
- GASCUEL-ODOUX C., BRANCHARD J.P., MEROT P., 1983. Essai de caractérisation globale et de modélisation du fonctionnement hydrique d'un petit bassin versant. *Sci. Sol*, n° 1, 3-16.
- GHADIRI H., PAYNE D., 1981. Raindrop impact stress. *J. Soil Sci.*, 32, 41-49.
- GOYAL M.R., NELSON G.L., CARPENTIER T.C., 1979. Mechanical properties of soil crust. *Doc. ASAE* 16 p.
- GOYAL M.R., DREW L.O., NELSON G.L., LOGANT J., 1980. Critical time for soybean seedling emergence force. *Trans. ASAE*, 831-839.

- GREENLAND D.J., 1971. Changes in nitrogen status and physical conditions of soils under pasture, with special reference to the maintenance of fertility of Australian soils used in growing wheat. *Soils Fertil.*, 24, 237-251.
- GUERIF J., 1979. Rôle de la matière organique sur le comportement d'un sol au compactage. II. Matières organiques libres et liées. *Ann. Agron.*, 30 (6), 469-480.
- GUERIF J., 1982. Compactage d'un massif d'agrégats : effets de la teneur en eau et de la pression appliquée. *Agronomie*, 2 (3), 287-294.
- GUERIF J., 1984. The influence of water content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. A paraître dans *J. of Agric. Engng-Research*.
- GUERIF J., FAURE A., 1979. Rôle de la matière organique sur le comportement des sols au compactage. I. Etude Statistique. *Ann. Agron.*, 30 (5), 387-399.
- GUILLORE P., 1983. Méthode de fabrication mécanique et en série d lames minces (2ème éd.) I.N.A. P-G Dép. des Sols. 22 p.
- GUNN R., KINZER G.D., 1949. Terminal velocity of water droplets in stagnant air, *J. Meteorology*, 6, 243.
- HAMBLIN A.P., DAVIES D.B., 1977. Influence of organic matter on the physical properties of some east Anglian soils of high silt content. *J. Soil Sci.*, 28, 11-22.
- HAMBLIN A.P., 1977. Structural features of aggregates in some east Anglian silt soils. *J. Soil Sci.*, 28, 23-28.
- HALL M.J., 1970. A critique of methods of simulating rainfall. *Water Resources Research*, 6 (4), 1104-1114.
- HENIN S., 1938. Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse. Paris, 70 p.
- HENIN S., 1939. Influence des facteurs climatiques sur la stabilité structurale d'un sol de limon. *Ann. Agron.*, 301-311.
- HENIN S., 1976. Cours de physique du sol (2 vol.). ORSTOM. Edites Paris.
- HENIN S., FEODOROFF A., GRAS R., MONNIER G., 1960. Le profil cultural. L'état physique du sol et ses conséquences agronomiques. d'Édition des Ingénieurs Agricoles. Paris.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G., 1969. Le profil cultural (2ème éd MASSON, Paris. 332 p.

- HENIN S., MONNIER G., 1956. Evaluation de la stabilité de la structure du sol. C.R. Viè Congrès Int. Science du Sol, Paris, Vol. B, 49-52.
- HENIN S. ROBICHET O., JONGERIUS A., 1955. Principes pour l'évaluation de la stabilité structurale des sols. Ann. Agron., 6 (4) 537-557.
- HILLEL D., 1964. Infiltration and rainfall-runoff as affected by surface crusts. p. 54-61 In 8th Intern. Congress of soil Science, Bucharest, Romania.
- HILLEL D., 1974. L'eau et le sol. Principes et processus physiques. VANDER Edit. LEUVEN, PARIS, BRUXELLES. 288 p.
- HILLEL D., 1980. Applications of soil physics. Academic Press Inc. N.Y., 385 p.
- HJULSTROM F., 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the river Fyris. Bull. of the Geol. Inst. Univ. of UPSALA, 25, 293-305 et 442-452.
- HOLDER C.B., BROWN K.W., 1974. Evaluation of simulated seedling emergence through rainfall induced soil crusts. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 38, 705-710.
- HUDSON N.W., 1957. Erosion control research. Progress report on experiments at Henderson Research Station 1953-1956. Rhod. Agric. J., 54 (4), 297-323.
- HUDSON N.W., 1963. Raindrop size distribution in high intensity storms, Rhodesian J. of Agric. Res., 1 (1), 6-11.
- HUDSON N.W., 1981 Soil conservation. 2nd éd. Batsford Academic and Educational Ltd. LONDON, 324 p.
- JONGERIUS A., SCHOONDERBEEK D., JAGER A., KOWALINSKI S., 1972. Electro-optical soil porosity investigation by means of quantimet-B equipment. Geoderma, 7, 177-198.
- KEMPER W.D., 1965. Aggregate stability, p. 511-519. In BLACK. Methods of soil Analysis. Amer. Soc. Agron. Inc., Madison.
- KHEYRABI D., 1966. Influence de la composition granulométrique des sols sur leur stabilité structurale. Thèse Paris. 123 p.
- KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Etude expérimentale de l'influence de la composition granulométrique des terres sur leur stabilité structurale. Ann. Agron., 19 (2), 129-152.

- KINNELL P.I.A., 1974. Splash erosion : some observations on the splash-cup technique. *Proc. Soil Sci. Soc. J.*, 38, 657-660.
- KINNELL P.I.A., 1982. Laboratory studies on the effect of drop size on splash erosion. *J. Agric. Engng Res.*, 27, 431-439.
- KIRBY M.J., 1980. The problem, p. 1-16. In M.J. KIRBY et R.P.C. MORGAN. *Soil Erosion*. J. Wiley and sons, Ltd. 312 p.
- KUBIENA W.L., 1964. Role and mission of micromorphology and microscopic biology in a modern soil science. p. 1-14. In A. JONGERIUS. *Soil micromorphology*. Elsevier pub. Comp. AMST., LOND., N.Y. 540 p.
- LAWS J.O., 1941. Measurements of the fall-velocity of water-drops and raindrops. *Trans. Am. Geophys. Un.*, 22, 709-721.
- LAWS J.O., PARSONS D.A., 1943. The relation of raindrop size to intensity. *Trans. Amer. Geophys. Un.*, 24, 452.
- LUK S.H., 1979. Effect of soil properties on erosion by wash and splash. *Earth Surface Processes*, 4, 241-255.
- MANICHON H., 1982. Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse. Paris, 214 p. + annexes.
- MANICHON H., SEBILLOTTE M., 1975. Analyse et prévision des conséquences des passages successifs d'outils sur le profil cultural *Bull. Tech. d'Inf.*, 302-303, 569-577.
- Mc CALLA T.M., 1944. Waterdrop method of determining stability of soil structure. *Soil Sci.*, 58, 117.
- Mc INTYRE D.S., 1958. a. Permeability measurements of soil crusts formed by raindrop impacts. *Soil Sci.*, 85, 185-189.
- Mc INTYRE D.S., 1958. b. Soil splash and the formation of surface crusts by raindrop impacts. *Soil Sci.*, 85, 261-266.
- MAZURAK A.M., MOSHER P.N., 1968. Detachment of soil particles in simulated rainfall. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 32, 716-719.
- MERIAUX S., 1958. Stabilité structurale et composition des sols. *C.R. Ac. Agric.*, 799-803.
- MERIAUX S., 1961. Action du chaulage sur les composantes de la structure et sur l'état de saturation du sol. *C.R. Ac. Agric.*, 322-325.

- METTAUER H., TUAL Y., HUCK C., TRENDEL R., 1983. De la connaissance du comportement physique et mécanique des sols de l'Est de la France. *Agronomie*, 3 (2), 141-152.
- MEYER L.D., MONKE E.J., 1965. Mechanics of soil erosion by rainfall and overland flow. *Trans. ASAE*, 8 (4), 572-580.
- MIHARA Y., 1951. Raindrops and soil erosion. *Bulletin of Nat. Inst. Agr. Sci.*, 4-55.
- MONNIER G., 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. Thèse Paris. 140 p.
- MONNIER G., BUI HUU TRI, 1971. Une méthode d'évaluation de la taille des éléments structuraux du sol. *Bull. Ass. Franç. Etude du sol.*, n° 2, 17-27.
- MONNIER G., KONAN L., 1968. Influence des conditions de séchage des terres sur leur stabilité structurale. *Ann. Agron.*, 19 (5), 541-551.
- MONNIER G., STENGEL P., 1982. a. Structure et état physique du sol. In *Encyclopédie des Techniques Agricoles*. Fas. 1140-1141. Ed. Techn. Agric. PARIS.
- MONNIER G., STENGEL P., 1982. b. La composition granulométrique des sols : un moyen de prévoir leur fertilité physique. *Bull. Tech. Info.* N° 370-372, p. 503-512.
- MONNIER G., STENGEL P., 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.*, 25 (4), 533-545.
- MONNIER G., STENGEL P., GUERIF J., 1981. Recherche de critères sur la fertilité physique du sol et de son évolution en fonction du système de culture. C.R. Séminaire CEE-Agrimed, BARI (Italie), 32-52.
- MONNIER G., TURC L., JEANSON-LUUSINANG, 1962. Une méthode de fractionnement densimétrique par centrifugation des matières organiques du sol. *Ann. Agron.*, 13 (1), 55-63.
- MORGAN R.P.C., 1977. Soil erosion in the United Kingdom : field studies in the Silsoe area 1973-75. *Nat. Coll. of Agric. Engng*, occasional paper n° 4.
- MOSLEY M.P., 1973. Rainsplash and the convexity of badland divides. *Z. Geomorph.*, Suppl. Bd. 18, 10-25.

- MÜCHER H.J., DE PLOEY J., 1977. Experimental and micromorphologica investigation of erosion and redeposition of loess by water. *Earth Surface Processes*, 2, 117-124.
- MÜCHER H.J., DE PLOEY J., SAVAT J., 1981. Responses of loess materials to simulated translocation by water : micromorphological observations. *Earth Surface Processes and Landforms*, 6, 331-331.
- MUTCHLER C.K., 1970. Size, travel, and composition of droplets formed by waterdrop splash on thin water layers. *Thèse Minnesota*.
- MUTCHLER C.K., LARSON C.L., 1971. Splash amounts from waterdrop impact on a smooth surface. *Wat. Res. Res.*, 7 (1), 195-200.
- PALMER R.S., 1965. Waterdrop impact forces. *Trans. ASAE*, 8 (1), 672.
- PHILIP J.R., 1969. Theory of infiltration. *Adv. Hydrosci.*, 5, 215-290.
- POESEN J., SAVAT J., 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. II : Detachability and transportability measurements. *CATENA*, 8, 19-41.
- QUANTIN P., COMBEAU A., 1962. Relation entre érosion et stabilité structurale du sol. *C.R. Ac. Sci.*, 254, 1855-1857.
- QUIRK J.P., 1950. The measurement of stability of microaggregates in water. *Aust. J. Agric. Res.* 1, 276-284.
- REEVE I.J., 1982. A splash transport model and its application to geomorphic measurement. *Z. Geomorph. N.F.*, 26 (1), 55-71.
- ROOSE E., 1980. *Dynamique actuelle de sols ferralitiques et ferrugineux tropicaux d'Afrique Occidentale. Thèse Orléans. 587 p.*
- ROSE C.W., 1960. Soil detachment caused by rainfall. *Soil Sci.*, 79, 28-35.
- SAVAT J., 1977. The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall. *Earth Surface Processes*, 2, 125-140.
- SAVAT J., DE PLOEY J., 1981. Sheetwash and rill development by surface flow, p. 113-126. *Geo Abstracts*.

- SAVAT J., POESEN J., 1981. Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash. Part I : The calculation of absolute data on detachability and transportability. CATENA, 8, 1-17.
- SEBILLOTTE M., 1966. Histoire d'une motte de terre. Le Figaro Agricole. N° Mars.
- SEBILLOTTE M., 1968. Stabilité structurale et bilan hydrique du sol. Influence du climat et de la culture. Ann. Agron., 19 (4), 403-414.
- SEBILLOTTE M., 1981. Le concept de traitement. In Enquête et expérimentation, leurs valeurs respectives pour l'étude des problèmes agricoles (à paraître).
- SHARMA D.P., AGRAWAL R.P., 1978. Effect of initial moisture content and conditions of drying on crust strength. J. Indian Soc. Soil Sci., 26 (3), 254-256.
- SMITH D.D., WISCHMEIER W.H., 1957. Factors affecting sheet and rill erosion. Trans. Am. Geophys. Un., 38 (6), 889-896.
- SMITH D.D., WISCHMEIER W.H., 1962. Rainfall erosion. Adv. in Agron., 14, 109-144.
- SOANE B.D., CAMPBELL D.J., HERKES S.M., 1971. Hand-held Gamma-ray transmission equipment for the measurement of bulk density of field soils. J. Agric. Engng Res., 16, 146-156.
- 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. ITCF Paris 132-149.
- STENGEL P., 1979. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation des sols in situ. Ann. Agron., 30 (1), 27-51.
- TACKETT J.L., PEARSON R.W., 1965. Some characteristics of soil crusts formed by simulated rainfall. Soil Sci., 99, 407-413.
- THORNES J.B., 1980. Erosional processes of running water and their spatial and temporal controls ; a theoretical viewpoint, p. 129-182. In M.J. KIRBY et R.P.C. MORGAN. Soil erosion. J. Wiley and sons Ltd. 312 p.
- VALENTIN C., 1979. Problèmes méthodologiques de la simulation de pluies. Application à l'étude de l'érodibilité de sols. p. 117-122. In H. VOGT et T. VOGT. Actes du colloque sur l'érosion agricole des sols en milieu tempéré non méditerranéen. Univers. L. PASTEUR-STRASBOURG & INRA COLMAR - 264 p.

VALENTIN C., 1981. Organisations pelliculaires superficielles de quelques sols de région subdésertique (AGADECZ. République du NIGER) Dynamique de formation et conséquences sur l'économie en l'eau. Thèse Paris. 213 p. + annexes.

F194

VILENSKY D., 1974. Influence de l'humidité du sol sur sa structure. C.R.A.S.S. Inter. Science du sol (1ère commission), VERSAILL 97-108.

VINATIER J.M., 1983. Etudes préliminaires en vue du drainage des terres agricoles du département de l'Ain. Secteur de référence de la DOMBES. ONIC-Ministère de l'Agriculture.

WISCHMEIER W.H., 1976. Use and misuse of the universal soil loss equation. J. of Soil and Water Cons., 31 (1), 5-9.

WISCHMEIER W.H., JOHNSON C.B., CROSS B.V., 1971. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. J. of Soil and Water Cons., 26 (5), 189-193.

WISCHMEIER W.H., MANNERING J.V., 1969. Relation of soil properties to its erodibility. Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 33 (1), 131-1

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., 1958. Rainfall energy and its relationship to soil loss. Trans., Amer. Geophys. Un., 39, 285-2

WISCHMEIER W.H., SMITH D.D., UHLAND R.E., 1958. Evaluation of factors in the soil-loss equation. Agric. Engng, 39 (8), 458-46474.

YODER R.E., 1936. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. J. of the Amer. Soc. of Agron., 28, 337-351.

YOUNG R.A., WIERSMA J.L., 1973. The role of rainfall impact in soil detachment and transport. Water Res. Res., 9 (6), 1629-1636.

LISTE DES TABLEAUX

LISTE des TABLEAUX

. Caractérisation succincte des parcelles observées	1
. Illustration des différents faciès	2
. Récapitulatif des méthodes utilisées pour décrire l'évolution morphologique de la surface	3
. Caractérisation des états types de zones du profil selon deux critères	4
. Principaux traits morphologiques de l'évolution des profils culturaux	5
. Caractères de principaux types de microhorizons rencontrés sur les lames minces	6
. Disposition et particularités des microhorizons selon la situation du prélèvement	7
. Formation de flaques lors d'épisodés pluvieux observés directement	8
. Evolution des relations débits-formes des taches saturées	9
. Confrontation des flux d'infiltration mesurés avec le comportement sous la pluie et l'état de la surface du sol	10
. Caractéristiques moyennes des sols étudiés	11
. Indices de rugosité initiaux	12
. Profils de densité initiaux	13
. Récapitulation et nomenclature des parcelles du dispositif de Palaiseau	14
. Récapitulation et nomenclature des parcelles du dispositif de Montluel	15
. Gammes de variation obtenues	16
. Combinaison des différentes modalités de détachement et de déplacement des particules solides	17
. Calculs d'ordres de grandeur concernant le ruissellement	18
. Masses totales de projections recueillies sur le site de Palaiseau	19

. Masses totales de projection recueillies sur le site de Montluel	20
. Effet de l'interception des gouttes de pluie sur les masses de terre projetées	21
. Coefficients de corrélation simple entre les indices p_{80} et les caractéristiques pluviométriques des séquences	22
. Equations de régression progressive de l'indice p_{80} en fonction des caractéristiques pluviométriques des séquences (Site de Palaiseau, parcelles non protégées)	23
. Equations de régression progressive de l'indice p_{80} en fonction des caractéristiques pluviométriques des séquences (Site de Montluel)	24
. Relations entre masses de projection recueillies et composantes de l'indice de stabilité structurale (Site de Palaiseau)	25
. Relations entre masses de projection recueillies et taux d'agrégats stables (Site de Montluel)	26
. Corrélations entre masses de terre transférée et projetée : variations synchroniques entre parcelles	27
. Relations entre masses de terre transférée et projetée : variations diachroniques	28
. Valeur des coefficients du modèles de remplissage interstitiel en fonction de différentes hypothèses géométriques	29
. Relations entre le paramètre D_{lim} et différentes variables au cours de la phase 1 (Site de Palaiseau)	30
. Relations entre le paramètre D_{lim} et différentes variables au cours de la phase 1 (Site de Montluel)	31
. Rapports moyens D_{lim}/p_{80} observés à Montluel	32
. Variations de D_{lim} et de la stabilité structurale sur le site de Montluel	33
. Rappel des principales relations statistiques entre D_{lim}	
. Observation du flaquage sur les différentes parcelles des sites étudiés	35
. Infiltrabilité et stade de dégradation de la surface	36

. Chronologie des phases de la dégradation de surface sur le site de Palaiseau	37
. Chronologie des phases de la dégradation de surface sur le site de Montluel	38
. Densité des fragments de croûtes	39
. Cohérence des variations de densité et de cote de surface	40
. Effet de l'interception des gouttes de pluie sur la variation de l'indice des vides structural	41
. Effet de l'histoire culturelle sur la variation de l'indice des vides structural pendant la période d'observation (Site de Montluel)	42
. Fonctions élémentaires et processus de la redistribution spatiale	43
. Principales étapes de l'histoire climatique, hydrique et structurale des échantillons exposés au printemps 1983	44
. Classement des échantillons d'après les symptômes d'évolution structurale	45
. Observation des projections émises	46
. Influence du calibre des fragments prélevés sur la stabilité d'agrégats remaniés	47
. Influence du remaniement et de la localisation des fragments dans le profil sur les taux d'agrégats stables	48
. Interaction entre remaniement, localisation des fragments et histoire culturelle vis-à-vis de la stabilité structurale	49
. Relations nécessaires pour modéliser la dégradation culturelle : formes empiriques obtenues à Palaiseau et Montluel	50
. Conditions requises pour qu'un épisode pluvieux détermine déclenche la phase 2	51

LISTE DES FIGURES

LISTE des FIGURES

. Graphe de la dégradation structurale	1
. Délimitation des plaques	2 a
. Délimitation des zones de départ	2 b
. Evolution des critères morphologiques en fonction de la pluie cumulée	3 a à f
. Variation de la cote moyenne de surface en fonction des pluies cumulées	4
. Schémas de succession des microhorizons d'après les clichés	5
. Schéma de dégradation de l'horizon immédiatement superficiel	6
. Evolution du cylindre saturé par un gouteur au cours du temps	7
. Histoire hydrique et climatique des parcelles suivies à Palaiseau	8 a
. Histoire hydrique et climatique des parcelles suivies à Montluel (printemps 82)	8 b
. Histoire hydrique et climatique des parcelles suivies à Montluel (Automne-hiver 1982-83)	8 c
. Analyse en composantes principales sur les caractères analytiques des parcelles expérimentales de Palaiseau (a) et Montluel (b et c)	9
. Distribution dimensionnelle initiale des fragments sur le site de Palaiseau	10 a et b
. Distribution dimensionnelle initiale des fragments sur le site de Montluel	11 a et b
. Schéma de l'émission et de la réception des projections de terre	12 a et b
. Allure de la fonction f pour 2 valeurs L	13
. Relations numériques entre le modèle de réception du splash et l'ajustement exponentiel	14
. Récapitulatif des contrôles expérimentaux réalisés	15
. Plan d'une unité expérimentale	16

. Influence de la vitesse de l'eau sur le comportement de particules solides de différentes tailles	17
. Schéma général de la redistribution spatiale de matière solide à la surface du sol	18
. Distribution des coefficients b sur le site de Palaiseau	19
. Distribution des coefficients b sur le site de Montluel	20
. Variation des masses de terre projetée au cours du temps (Site de Palaiseau)	21
. Variation des masses de terre projetées au cours du temps (site de Montluel)	22
. Corrélation des masses de terre projetée (indices p_{80}) avec les composantes de l'A.C.P. réalisée sur les caractéristiques analytiques des parcelles	23 a,
. Eléments de modélisation des relations entre transfert et mobilisation	24
. Variation des masses de terre transférées m_T en fonction des masses de terre projetée (p_{80} cumulé) au cours de la phase 2, Site de Montluel	25
. Evolution du taux de recouvrement par les plaques continues en fonction de la pluie cumulée	26
. Relation entre le taux de recouvrement par les plaques continues et le calibre D_{min} , observée à Palaiseau	27
. Schéma d'incorporation progressive des fragments	28
. Relation entre taux de recouvrement par les plaques observé et taux prévu d'après D_{lim} , site de Palaiseau	29
. Relation entre taux de recouvrement par les plaques observé et taux prévu d'après D_{lim} , site de Montluel	30
. Relations hypothétiques entre le remplissage interstitiel et la surface des plaques	31
. Détermination du paramètre D_{lim}	32
. Evolution du paramètre D_{lim} en fonction des pluies cumulées, Site de Palaiseau	33
. Variation du calibre équivalent D_{lim} en fonction de l'indice p_{80} cumulé, Site de Palaiseau	34
. Caractérisation de la structure des pluies pour prévoir le déclenchement de la phase 2	35
. Structure des principales pluies précédant le déclenchement de la phase 2	36

. Représentation schématique de l'évolution morphologique au cours de la phase 2	37
. Relation entre indice de rugosité et taux de recouvrement des zones de départ	38 a, b
. Relation entre rugosité et masse de terre transférée	39
. Profils de densité au champ	40
. Influence de l'épaisseur initiale de l'horizon H1 sur la variation de cote totale	41
. Variations de l'indice des vides structural es moyen en fonction de la hauteur de pluie	42
. Variations de l'indice des vides structural en fonction des pluies cumulées P : ajustement hyperbolique	43
. Evolution de la taille modale des particules projetées	44
. Corrélation entre les classements d'abondance des projections à différentes dates et les classements d'intensité de la fissuration	45
. Influence du volume d'eau reçu, de l'état hydrique initial et de la hauteur de chute des gouttes sur le taux d'agrégats stables	46
. Influence du volume d'eau reçu et de la constitution du matériau sur le taux d'agrégats stables	47
. Influence du volume d'eau reçu, de la taille des fragments et de la hauteur de chute des gouttes sur le taux d'agrégats stables	48
. Variation du taux d'agrégats stables en fonction de la teneur en eau au moment du test	49
. Influence du calibre des fragments sur leur résistance à la désagrégation	50
. Diagramme de modélisation de la dégradation structurale au cours de la phase 1	51
. Organigramme de modélisation du déclenchement de la phase 2	52
. Diagramme de modélisation de l'épaississement des croûtes stratifiées au cours de la phase 2	53

INDEX DES RELATIONS,
CODES ET SYMBOLES UTILISÉS

INDEX DES RELATIONS

- 1 Expression de q_i . p. 57
- 2 Calcul de l'énergie cinétique des pluies
- 3 Expression des quantités de terre recueillies dans un récepteur.
- 4 Evaluation de la masse de terre transférée d'après les relevés de jalons.
- 5 Expression de l'indice des vides structural en fonction des relevés aspérimétriques.
- 6 Relation entre Indice de rugosité et proportion des surfaces de départ
- 7 et 8 Relations entre variation de cote de la surface du sol et densités apparentes initiale et finale . p.205

PRINCIPAUX CODES et SYMBOLES UTILISES

Codes des unités expérimentales du site de Palaiseau : Cf. TABLEAU 14 p. 91
Codes des unités expérimentales du site de Montluel : Cf. TABLEAU 15 p. 91

- . m_D : masse de terre déplacée
- . m_B : masse de terre mobilisée
- . m_P : masse de terre projetée
- . m_T : masse de terre transférée à l'échelle décimétrique
- . I_r : indice de rugosité
- . P : hauteur de pluie cumulée
- . I_H : infiltrabilité du sol humide
- . e_s : indice des vides structural
- . E_c : énergie cinétique des pluies
- . KE_x : énergie cinétique des pluies cumulée par classe d'intensité
(par exemple : $I \geq x$)
- . p_{80} : masse de projections recueillies dans un récepteur circulaire de 80 cm^2 , rapporté à la surface réceptrice.