

# THESES

présentées

A LA FACULTE DES SCIENCES

DE L'UNIVERSITE DE PARIS

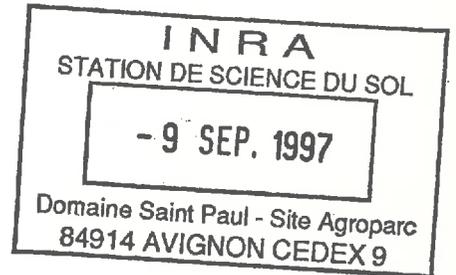
pour obtenir

LE TITRE DE DOCTEUR-INGENIEUR

par

Djamchid KHEYRABI

1<sup>ere</sup> THESE



## INFLUENCE DE LA COMPOSITION GRANULOMETRIQUE DES SOLS SUR LEUR STABILITE STRUCTURALE

2<sup>eme</sup> THESE

proposition donnée par la Faculté

## CARTOGRAPHIE DES SOLS EN VUE DE LEUR AMENAGEMENT HYDROLOGIQUE

*Soutenu le 13 JUIN 1966 devant la Commission d'Examen*

M. GLANGEAUD *Président*

MM. CAILLEUX  
HENIN } *Examineurs*

INSTITUT NATIONAL DE LA RECHERCHE AGRONOMIQUE

P L A N   G E N E R A L   D U   M E M O I R E

INTRODUCTION GENERALE.

CHAPITRE I

MATERIEL EXPERIMENTAL ET METHODE D'ETUDES

I.- LES METHODES D'ETUDES.

II.- CHOIX ET PREPARATION DES ECHANTILLONS.

- A - Choix et préparation des fractions élémentaires.
- B - Reconstitution des échantillons.

CHAPITRE II

ETUDE DES MELANGES BINAIRES

I.- RESULTATS DE STABILITE.

- A - Agrégats stables après prétraitement à benzène.
- B - Agrégats stables sans prétraitement.
- C - Agrégats stables après prétraitement à l'alcool et au dioxane.
- D - Comparaison de l'action de prétraitement.

II.- LES RESULTATS DU TEST DE COHESION.

### III.- INTERPRETATION DES RESULTATS.

A - Echantillons contenant moins de 40 % d'argile.

1°) Etude de l'arrangement des particules du sol.

2°) Etude des agrégats restant sur le tamis lors du test de la série aS.

Conclusion.

B - Echantillons du sol contenant plus de 40 % d'argile

1°) Etude de la fissuration.

2°) Conséquences de la fissuration :

a) Comportement d'un agrégat fissuré vis à vis du test de stabilité.

b) Comportement d'un agrégat fissuré vis-à-vis du test de cohésion.

3°) Origine de la fissuration.

4°) Mécanisme de stabilité des échantillons argileux.

C - Vue d'ensemble sur l'étude de mélanges binaires.

### CHAPITRE III

#### ETUDE DES ECHANTILLONS A 3 OU 4 FRACTIONS

I.- CHOIX DES ECHANTILLONS.

II.- RESULTATS

1°) Apparition de la stabilité

2°) Variations de la stabilité.

III.- DIFFERENCIATION DES PHASES DES ECHANTILLONS COMPLEXES.

CHAPITRE IV

MECANISMES GENERAUX DE STABILISATION

- I.- DEFINITION DES COURBES ISOSTABLES
- II.- CARACTERISATION DES COURBES ISOSTABLES.
- III - INTERPRETATION
- IV.- MELANGES A 5 FRACTIONS

CONCLUSIONS

CHAPITRE V

COMPARAISON GENERALE DES RESULTATS

- I.- COMPARAISON DE l.f. (L+s) et S.g.
- II.- EFFICACITE DE L'ARGILE.

CONCLUSIONS GENERALES.

---

## AVANT - PROPOS

Je remercie Monsieur le Professeur Glangeaud qui a accepté la présidence du Jury. C'est dans son laboratoire de la Sorbonne que je me suis familiarisé avec la géologie-dynamique.

Monsieur le Professeur Cailleux a bien voulu faire partie du Jury, je l'en remercie vivement.

Je tiens à remercier tout particulièrement Monsieur le Professeur HENIN, chef du département Agronomie, qui m'a accueilli dans son service et qui malgré ses lourdes charges m'a apporté avec générosité aide dans tous les domaines, recherche scientifique et condition du travail.

Monsieur MONNIER, Maître de recherches au laboratoire des sols, a été à la base de ma formation en physique du sol. Ce travail n'aurait pu être mené à bien s'il n'avait été enrichi par les conseils et par les idées apportés par lui. Je le remercie sincèrement.

Pour terminer, je voudrais exprimer mon attachement fidèle au laboratoire des sols en souhaitant de garder des liens vivants avec ce laboratoire.

---

## I N T R O D U C T I O N

La texture qui définit "l'ensemble des propriétés du sol qui résultent directement de la taille de ses constituants" est la notion à laquelle on a le plus souvent recours lorsqu'on tente de caractériser de façon compréhensive le matériau qui constitue un sol ou une partie de sol.

Olivier de Serre distinguait déjà deux grandes catégories de terres : les terres argileuses et les terres sableuses. La définition des types vernaculaires de sols bien qu'elle constitue dans de nombreux cas une synthèse entre des caractères très divers des terroirs s'appuie le plus souvent sur la notion de texture : c'est ainsi qu'on parle de terres franches, lourdes ou légères.

La généralité de l'intérêt présenté par ce concept est encore souligné par l'emploi qu'en font non seulement les agronomes mais aussi les Ingénieurs du Génie Civil. Si ceux-ci divergent parfois, selon les Ecoles, sur l'importance relative qu'il convient d'attribuer à d'autres caractéristiques des sols, ils se rejoignent pour les classer à l'échelon le plus élevé d'après leur granulométrie.

Aujourd'hui la texture et sa donnée analytique principale la granulométrie, sont encore à la base de la définition d'un sol par sa composition et de nombreux chercheurs s'efforcent d'établir des relations entre la texture et les principales caractéristiques de l'état physique du sol et de son comportement. C'est ainsi que Kozeny pour la vitesse de filtration, Gras (1957) pour l'humidité

équivalente, Russel (1928), Keen et Couttes (1928) pour diverses caractéristiques mécaniques ont proposé des formules permettant de les déduire de tout ou partie des données de l'analyse granulométrique, ou de leur traitement.

Un domaine reste cependant peu exploré : celui des relations entre la texture et la structure des sols. Alors que la première permet de porter un jugement sur la composition d'un sol, la deuxième résulte de la manière dont ses constituants sont disposés les uns par rapport aux autres; elle est donc un élément essentiel de la caractérisation de l'état physique du sol. Le contenu concret de ce concept est le suivant : les constituants élémentaires, c'est-à-dire ceux qui sont séparés lors de l'analyse granulométrique, peuvent être simplement juxtaposés : ce sont les structures monoparticulaires; les plus grossiers d'entre eux (limons et sables plus ou moins grossiers) peuvent ainsi être soudés par les ciments colloïdaux constitués par les fractions élémentaires les plus fines on obtient alors des structures fragmentaires ou continues selon que les ensembles cimentés sont ou non fragmentés. Dans tous les cas, la propriété globale exprimant le résultat de ces arrangements et de leurs diverses modalités est la porosité.

La structure telle que nous venons de la définir, ne peut toutefois caractériser l'état physique du sol qu'à un moment donné. En effet, l'arrangement des particules qu'elle décrit est perpétuellement modifié sous l'action de différents facteurs au premier rang desquels se trouve l'eau. Il faut donc nécessairement lui adjoindre la notion, complémentaire, de stabilité structurale, qui traduit la plus ou moins grande résistance des éléments structuraux à cette dégradation par l'eau.

C'est précisément ce comportement du sol dans ses relations avec la texture que nous nous proposons d'étudier.

L'appréciation de la stabilité structurale basée sur une observation directe de l'évolution de la structure du sol en place sous l'effet des agents susceptibles de la dégrader est une méthode inapplicable à une étude systématique : elle nécessite en effet des mesures sur le terrain fréquentes, particulièrement aux périodes caractéristiques.

Aussi a-t-on cherché à l'étudier au laboratoire et dans des conditions standard. Par ce moyen, il a été mis en évidence un certain nombre de mécanismes possibles de la dégradation de la structure. Parmi ceux-ci deux semblent jouer un rôle essentiel :

- Le gonflement et la dispersion des ciments colloïdaux (Schloesing 1885).
- L'éclatement des fragments de terre suivant le schéma de Yoder (1936).

Pour définir les facteurs de la stabilité structurale, Henin (1938) a imaginé une théorie dans laquelle ces deux mécanismes interviennent l'un et l'autre :

Lorsqu'on met un agglomérat sec au contact d'un large excès d'eau, celle-ci pénètre par capillarité dans les pores en commençant par les plus gros. Ce faisant elle comprime l'atmosphère interne du sol. Parallèlement, dans les parties de l'agglomérat déjà mouillées, les ciments colloïdaux gonflent et se dispersent plus ou moins, entraînant ainsi une baisse de la cohésion de la particule. Lorsque la pression interne qui croît devient supérieure aux forces de cohésion qui décroissent, l'agrégat éclate.

Plus précisément, la pression interne peut être exprimée sous la forme :

$$P = 2 \frac{T \cos \alpha}{r}$$

dans laquelle :

T est la tension superficielle de l'eau,  
 $\alpha$  l'angle de raccordement sol-eau,  
r le rayon des plus gros capillaires du sol.

La condition de stabilité peut alors s'écrire :

$$C > 2 \frac{T \cos \alpha}{r}$$

ou bien :

$$S = C - 2 \frac{T \cos \alpha}{r}$$

relation dans laquelle C représente la cohésion de la terre humide.

Il existe donc deux facteurs principaux de stabilité :

$\alpha$  qui exprime la mouillabilité des parois des pores,  
C cohésion de la terre humide.

Par différents moyens Henin a montré que les conséquences de cette théorie étaient conformes à l'expérience.

C'est ainsi que lorsqu'on imbibe une terre sous vide ou par capillarité, c'est-à-dire en commençant par les pores les plus fins, l'éclatement est fortement atténué. La dégradation est au contraire accentuée lors d'imbibitions sous pression.

Par ailleurs, si l'on augmente la cohésion de la terre à l'état humide, par addition d'une argile difficilement dispersable, par exemple, la stabilité augmente et il en est de même lorsqu'on diminue la mouillabilité du sol par addition d'un corps gras

Une étude récente de G. Monnier portant principalement sur les modifications de cohésion à l'état humide et de mouillabilité du sol à la suite de la fixation au sol de différentes

substances organiques est venue confirmer encore cette théorie que nous prendrons donc comme base de travail.

o

o o

Après avoir défini nos méthodes d'études (Chap. I), nous avons cherché, à partir d'échantillons simples, à deux fractions, à mettre en évidence les principaux facteurs et mécanismes entrant en jeu dans les variations de stabilité en fonction de la texture des sols (Chap. II); après avoir étendu et précisé ces données par l'étude d'échantillons plus complexes à trois et quatre fractions granulométriques (Chap. III), nous avons présenté les mécanismes généraux des phénomènes (Chap. IV) avant de conclure par une comparaison générale des résultats (Chap. V).

o

o o

C H A P I T R E    I

MATERIEL EXPERIMENTAL ET METHODES D'ETUDES

I.- LES METHODES D'ETUDES : APPRECIATION DE LA STABILITE STRUCTURALE.

La méthode que nous avons utilisée a été proposée par Henin et Monnier (1956). Son principe découle directement de la théorie de Hénin.

En voici, brièvement résumées, les principales caractéristiques. Il s'agit d'une série de tamisage à 200  $\mu$  effectués sous l'eau et dans des conditions standard sur des échantillons du sol étudié, composés d'agrégats d'une taille inférieure à 2 mm. et séchés à l'air.

Préalablement à leur mise au contact de l'eau, certains échantillons sont humectés par divers liquides organiques, dans le but d'apporter des nuances à l'action directe de l'eau sur la terre sèche.

Ainsi lorsqu'on "prétraite" des agrégats par un liquide polaire miscible à l'eau, l'alcool éthylique par exemple, la stabilité mesurée s'en trouve accrue. Lors de l'imbibition, l'alcool éthylique remplace l'air contenu dans les pores du sol sans que l'éclatement intervienne ou presque, car les ciments colloïdaux

conservent en présence d'alcool une cohésion suffisante. Lorsqu'on ajoute l'eau, celle-ci, parce que miscible à l'alcool, pénètre progressivement dans l'agglomérat. Dès lors la dégradation que l'on peut observer est principalement celle qui résulte de la plus ou moins grande dispersion des ciments qui intervient en présence d'eau.

On peut remplacer l'alcool éthylique par d'autres liquides dont l'influence est du même ordre, tout en se manifestant plus ou moins nettement suivant les caractéristiques de leur molécule. C'est ainsi que le dioxane exerce une action encore plus protectrice que celle de l'alcool éthylique.

Si, au contraire, on utilise des liquides non miscibles à l'eau, comme le benzène, on obtient une action générale opposée à la précédente. Un tel prétraitement remplace l'atmosphère interne des pores par un liquide se comportant comme un piston incompressible. L'éclatement en est rendu plus brutal et peut intervenir pour des valeurs supérieures de la cohésion à l'état humide. Seul le cas des terres humifères fait exception : le benzène s'accroche alors à la matière organique, rendant les parois des pores encore moins mouillables. L'action "sensibilisatrice" dont nous venons de parler sera donc d'autant plus atténuée que les terres étudiées contiendront plus de matières organiques.

L'intérêt de ces prétraitements est double :

- En premier lieu, ils permettent d'obtenir une sensibilité de la méthode supérieure à celle qui résulterait de l'action directe de l'eau sur la terre sèche. En particulier, le prétraitement à l'alcool éthylique permet de déceler de petites variations dans la zone des faibles stabilités et le prétraitement au benzène par son action brutale joue le même rôle dans le cas des très fortes stabilités.

- Mais le plus grand intérêt présenté par ces prétraitements est que chacun d'eux autorise une interprétation particulière à propos des facteurs qui provoquent une variation de la stabilité

Le mécanisme de leur action permet en effet de penser, et cela a été montré expérimentalement (G. Monnier, 1965), que le prétraitement à l'alcool conduit à des résultats dépendant principalement de la cohésion de la terre à l'état humide et de ses variations, le résultat du test au benzène dépendant, lui, de la mouillabilité.

La méthode classique comporte ainsi trois tamisages à 200  $\mu$  pour chaque échantillon étudié : le premier après prétraitement à l'alcool éthylique fournit un premier taux d'agrégats stables  $A_{ga} \%$ , le second au benzène permet d'obtenir  $A_{gb} \%$ . Quant au troisième effectué à la suite de l'action directe de l'eau sur la terre sèche, il conduit à un taux  $A_{ge} \%$  dit "sans prétraitement" ou prétraitement "air". Son interprétation isolée est dans le cas général moins simple que celle des deux prétraitements effectifs.

Il est indispensable, si l'on veut pouvoir aisément comparer un ensemble de sol de disposer d'un indice unique dont les composantes soient le résultat des différents tests de l'analyse d'agrégats. D'autre part, comme ceux-ci ont été choisis sur des bases théoriques, les auteurs ont élaboré cet indice de façon à ce que le classement qu'il permet d'établir soit aussi fidèlement que possible celui du comportement "in situ" des terres que représentent les échantillons étudiés.

En tenant compte de la quantité d'argile + limon qui se disperse au cours des opérations de tamisage, Hénin et Monnier ont donné à cet indice la forme suivante :

$$S \text{ ou } I_s = \frac{(A + L) \text{ max } \%}{A_{ga} + A_{gb} + A_{ge}} = 0,9 \text{ SG } \%$$

3

où  $(A + L)$  max. représente le taux d'éléments  $< 20\mu$  que l'on retrouve en suspension après le traitement le plus dispersant, et S.G. le taux de sables grossiers du sol. Il est, en effet, indispensable de tenir compte principalement des véritables agrégats stables, tout en maintenant une certaine place (coefficient 0,1) à l'influence favorable sur le comportement vis à vis de l'eau des sables présentant une taille équivalente.

Cet indice varie en raison inverse de la stabilité structurale de valeurs voisines de 0 pour les terres très stables à des valeurs supérieures à 100 pour des terres particulièrement fragiles. Comme la plupart des terres cultivées présentent des S compris entre 1 et 10 n'occupent ainsi que le 1/10 de l'échelle, on utilise fréquemment les logarithmes décimaux de S.

En définitive, cette méthode d'étude permet d'obtenir deux sortes d'indications :

- L'examen séparé du résultat des différents tests permet une interprétation des facteurs intervenant dans les mécanismes de la stabilité.

- L'indice global S fournit un classement des sols en accord avec leur comportement sur le terrain. Il est indispensable au stade de l'application.

## II.- CHOIX ET PREPARATION DU MATERIEL EXPERIMENTAL.

Rappelons que nous avons choisi d'étudier les relations entre la stabilité structurale et la texture. Celle-ci étant ici considérée dans un souci d'analyse comme le reflet de la seule répartition des constituants par classe de taille.

Il était dans ces conditions obligatoire d'opérer sur une série d'échantillons de granulométrie variable, mais dont la nature et la forme des constituants soient rigoureusement les mêmes pour chaque classe de taille.

Cette exigence nous a conduit à tenter de constituer artificiellement des échantillons à partir de mélanges en proportions variables de matériaux déterminés appartenant aux différentes fractions granulométriques. En effet, les sols naturels présentant des garanties suffisantes d'homogénéité (nature de l'argile et garniture ionnique, forme et nature des sables) quant à leur composition, ne couvrent généralement pas des échelles de granulométrie assez larges pour permettre une étude complète. De plus, excepté dans certains sous-sols, ils contiennent des matières organiques en quantité non négligeable, et leur comportement vis-à-vis de l'eau en est affecté.

#### A - CHOIX ET PREPARATION DES FRACTIONS ELEMENTAIRES.

Les classes granulométriques que nous avons choisies sont celles généralement utilisées de l'échelle d'Atterberg modifiée :

0 - 2	argile (a)
2 - 20	limon fin (l)
20 - 50	limon grossier ou sable très fin (L)
50 - 200	sable fin (s)
200 - 2000	sable grossier (S)
> 2 mm.	graviers.

Nous n'avons retenu comme constituants pour nos échantillons artificiels que les classes  $< 2$  mm. rentrant dans ce que l'on a coutume d'appeler la terre fine. Dans certains sols, il est certes vraisemblable que la présence d'éléments grossiers peut

modifier considérablement le comportement du sol; mais, dans un souci de simplification, nous avons éliminé ces cas, d'ailleurs les moins fréquents, auxquels nos méthodes d'investigation étaient mal adaptées.

Les éléments présentant un diamètre équivalent inférieur à  $50 \mu$  ont été extraits d'un matériau argilolimoneux prélevé dans l'horizon d'accumulation d'un sol de limon de Versailles (H.B.) saturé en calcium mais totalement dépourvu de calcaire.

La composition granulométrique de l'horizon B est présentée dans le tableau n° 1 :

Tableau N° 1

Composition granulométrique de l'horizon B. (H.B.)

Fractions	M.O.	Argile	Limon fin	Limon grossier	Sables fins	Sables grossiers
		$< 2 \mu$	$2.20 \mu$	$20-50 \mu$	$50-200 \mu$	$200-2000 \mu$
%	0,60	28.5	24.4	44,5	1,5	0,5

Du point de vue minéralogique la fraction inférieure à  $2 \mu$  est constituée par un mélange :

Les limons sont essentiellement composés par des grains de quartz dont la forme arrondie s'explique par leur origine géologique, il s'agit de dunes côtières du tertiaire remaniées et transportées par le vent. (Zone de déblayage dans les sables de Fontainebleau). Les fractions  $20.50 \mu(L)$ ;  $2.20 \mu(l)$ ; et  $< 2 \mu (a)$  ont été extraites du sol par décantations successives, après destruction de la matière organique par  $H_2O_2$  (20 vol.) à chaud, décalcification par  $HCl$  et dispersion par  $NH_4OH$ .

Les deux fractions limoneuses ont été lavées et séchées.

Une fois séparée, la suspension d'argile a été floculée et rendue monoionique  $Ca^{++}$  par contact avec des solutions de  $Cl^2Ca$ . L'argile floculée a été lavée et amenée par centrifugation à une humidité voisine de 130 %. Elle a été utilisée sous cette forme pour la fabrication des échantillons artificiels, une expérience préalable ayant fait apparaître les difficultés d'obtention d'un mélange homogène à partir d'argile séchée et broyée.

Quant aux fractions sables fins (50-200  $\mu$ ) et sables grossiers (200 - 2000) elles ont été extraites de sables de carrières représentant deux faciès de finesse différente des sables de Fontainebleau. Leur forme générale est également arrondie, surtout en ce qui concerne les sg.

Au cours des opérations de tamisages, effectuées pour les séparer, nous avons volontairement resserré les limites de taille de chacune de ces fractions de façon à éviter la présence d'éléments voisins de 200  $\mu$  qui entraîne des erreurs au moment du tamisage sous l'eau effectué à cette ouverture de maille dans l'analyse d'agrégats.

Finalement, les fractions à partir desquelles nous avons préparé les échantillons artificiels présentaient les caractéristiques rassemblées dans le tableau ci-dessous.

Fractions	Taille	Caractéristiques minéralogiques et morphologiques.
Argile (a)	0 - 2 $\mu$	
Limon fin (l)	2 - 20 $\mu$	Quartz de forme arrondie
Limon grossier (L)	20 - 50 $\mu$	"
sables fins (s)	63 - 160 $\mu$	" très rarement muscovite
sables grossiers (S)	280 - 1000 $\mu$	" micas noirs, feldspath, muscovite très rare

B - RECONSTITUTION DES ECHANTILLONS.

La fabrication d'échantillons artificiels pour les études de structure est difficile. En effet, la structure n'est pas définie seulement par les éléments qui la constituent mais également par leur arrangement.

Quant à la stabilité structurale, on conçoit qu'un de ses facteurs principaux, la cohésion, soit également affecté par la manière dont se fait la liaison entre les ciments et les éléments du squelette minéral (limons et sables). C'est ainsi qu'Héni (1938) a montré que le malaxage du sol dans certaines conditions d'humidité modifiait la stabilité structurale en changeant la cohésion.

Pour éviter d'introduire des causes de variations mal contrôlées, nous avons cherché à mettre au point une technique de fabrication telle qu'un échantillon reconstitué à partir de ses fractions élémentaires présente la même stabilité structurale que l'échantillon original. Nous avons opéré sur l'H.B.

La condition préalable est évidemment d'obtenir un mélange homogène. Il est réalisé en malaxant les fractions dans les proportions choisies en présence d'une quantité d'eau suffisante pour assurer une certaine mobilité aux éléments granulométriques, mais non excessive pour éviter les risques de sédimentation des éléments les plus grossiers au cours de l'opération. Par tâtonnements, cette humidité optimale a été fixée pour l'horizon B à 50 % de la terre sèche. Pour les autres échantillons, cette humidité optimale a été déterminée par extrapolation en se basant sur l'humidité équivalente calculée par la formule de Gras :

$$H_e = 0,59 a \% + 0,16 l \% + 5,47.$$

1  
220μ

L'humidité optimale de malaxage résulte alors de la relation :

$$Hm \% = \frac{50}{He \text{ de l'H.B.}} \times He \text{ de l'échantillon}$$

*↳ calculer d'après la formule de base = 16,3*

$$Hm = 1,92 \times He$$

Quant à la durée du malaxage, elle a été limitée à un quart d'heure, une certaine dessiccation risquant d'intervenir si l'on prolongeait cette opération.

La pâte obtenue a été ensuite ressuyée sur Buchner pendant cinq heures. Le temps de ressuyage s'est avéré capable d'influer sensiblement sur le comportement de l'échantillon obtenu.

Le gâteau de terre ressuyée a ensuite été séché à l'étuv à 105° jusqu'à poids constant, puis forcé à la main et avec précautions à travers un tamis de 2 mm. à mailles carrées.

Le tableau n° 2 permet de comparer le comportement d'agrégats compris entre 1 et 2 mm. extraits soit de l'horizon B naturel, soit d'un échantillon reconstitué suivant la technique décrite ci-dessus, et soumis aux différents tests de l'analyse d'agrégats.

Tableau N° 2

Comparaison de comportement de l'H.B. naturel et de l'H.B. reconstitué vis à vis du test de stabilité.

	Ag <sub>a</sub> %	Ag <sub>e</sub> %	Ag <sub>b</sub>	(A+L) <sub>a</sub>	(A+L) <sub>e</sub>	(A+L) <sub>B</sub>	log <sub>10</sub> I <sub>0</sub>
H.B. naturel 0,6 % de Mo.	( 22 21	( 6 6	2	( 18 19	( 13 13	38.5	1.60
H.B. reconstitué sans Mo.	( 22 25	( 5 6	0	( 21 19	( 13 12	47.0	1.68

On constate que les comportements des deux échantillons sont tout à fait comparables dans les différents tests à l'exception du test au benzène et de ses répercussions sur l'indice S. Cette différence peut s'expliquer d'ailleurs par la présence de 0,6 % de matière organique dans l'horizon B naturel.

Enfin, le tableau n° 3 montre que l'extrapolation des conditions de fabrications à d'autres compositions granulométriques se justifie.

Tableau N° 3

Comparaison du comportement de sols naturels et d'échantillons reconstitués de même granulométrie.

Origine du sol	M.o.	Désignation de texture	Prétraitement		
			Alcool	Benzène	Air
SARTHE PRRIONE B II.1 (0-10 cm)	1,75	a 1 L s S 6 2 9 34 47	0	0	0
Sol reconstitué	0	" " " " "	0,5	0	0,5
SARTHE PAILLE 1 : (10-40cm)	0,40	a 1 L s S 10 13 21 19 37	2	0,5	0,5
Sol reconstitué	0	" " " " "	1	0	0,5
ISERE APEP perret 1. (45-70cm)	0,55	a 1 L s S 13 11 47 25 1	0,5	0	0,5
Sol reconstitué	0	" " " " "	0,4	0	0,3
SARTHE FUTAIE 1. (10-45cm)	0,55	a 1 L s S 15 20 40 18 7	2	0,5	1
Sol reconstitué	0	" " " " "	1	0	0,5
SARTHE PLASSART 5 (25-35cm)	0,25	a 1 L s S 20 5 15 35 25	6	1	2,5
Sol reconstitué	0	a 1 (L+s) S 20 5 50 25	6	0	1,5
HAUTE-LOIRE BORD R <sub>1</sub> (65 cm)	0,75	a 1 L s S 17 15 6 11 50	16	4,6	7
Sol reconstitué	0	a 1 (L+s) S 20 15 17 48	16	0	8
SARTHE ETANG 1 (10-30cm)	1,05	a 1 L s S 24 8 11 16 40	19	2	10
Sol reconstitué	0	a 1 (L+s) S 25 8 27 40	21	0	8
ISERE MIANCHON 1 (50 cm)	0,40	a 1 L s S 27 24 40 8 0,7	22	0,40	5
Sol reconstitué	0	a 1 (L+s) 27 24 49	18	0	7
HAUTE GARONNE ONIA 60 (65 cm)	0,80	a 1 L s S 31 26 13 25 4	34	0,6	5
Sol reconstitué	0	a 1 (L+s) 31 27 42	30	0	11
SARTHE SPF 15 (10-50cm)	0,90	a 1 L s S 41 13 9 25 11	37	1,5	19
Sol reconstitué	0	a 1 (L+s)	38	0	24

## C H A P I T R E    I I

### ETUDE DES MELANGES BINAIRES

#### INTRODUCTION.

Une étude systématique de mélanges à cinq fractions abordée sans idée directrice soulèverait de nombreuses difficultés.

- Tout d'abord, le nombre d'échantillons à examiner et donc dans le cas qui nous occupe, à fabriquer, serait extrêmement élevé.

- Ensuite, l'interprétation des résultats serait nécessairement globale, basée sur la mise en évidence de l'allure générale de l'influence de telle ou telle fraction, selon qu'elle est associée à tels ou tels constituants complémentaires.

Il paraît donc difficile d'aborder une étude explicative sans l'aide de modèles constitués par des mélanges simples.

C'est pourquoi nous avons, dans un premier temps, étudié le comportement de mélanges binaires constitués de doses croissantes d'argile associées à chacune des fractions du squelette.

- Le limon fin l (série des mélanges al).
- Le limon grossier L (série des mélanges aL).
- Le sable fin s (série des mélanges as).
- Le sable grossier S (série des mélanges aS).

Pour chacune de ces séries il était donc possible de mettre en évidence le rôle de quantités croissantes d'argile.

Pour une teneur donnée en argile, nous pouvions également comparer l'influence de la fraction granulométrique complémentaire

Nous avons fait varier les teneurs en argile de 10 en 10 % de façon à obtenir d'emblée les grandes lignes du phénomène avec une précision suffisante.

## I.- LES RESULTATS DES TESTS DE STABILITE STRUCTURALE.

Pour les déterminations effectuées dans le but de classer les sols entre eux par rapport à leur comportement global, les échantillons sont constitués d'ordinaire par une aliquote de toutes les particules qui passent sous la pression des doigts au travers d'un tamis à maille carrée de 2 mm. d'ouverture. Ici, nous n'avons conservé que les agrégats les plus grossiers (compris en 1 et 2 mm.) dans le double but de limiter les erreurs d'échantillonnage et d'augmenter la sensibilité de la méthode.

Dans la suite de ce mémoire, nous désignerons par Ag % les agrégats vrais, c'est-à-dire la différence : agrégats stables - sables grossiers, afin de donner une valeur comparative aux différents résultats quelle que soit la teneur en sables grossiers des échantillons qu'ils concernent.

Enfin, nous avons effectué pour chaque échantillon quatre tamisages sous l'eau : l'un après prétraitement à l'alcool ( $Ag_a$  %), un autre après prétraitement au dioxane ( $Ag_D$  %), un troisième après prétraitement au benzène ( $Ag_b$  %), un quatrième enfin après action directe de l'eau sur la terre sèche ( $Ag_e$  %).

#### A - AGREGATS STABLES APRES PRETRAITEMENT AU BENZENE.

On constate que tous les échantillons quelles que soient leur teneur en argile ou la dimension des particules complémentaires présentent un taux  $Ag_b$  % nul.

Ce résultat n'est pas surprenant compte tenu du mode d'action du benzène. En l'absence de matières organiques diminuant la mouillabilité du sol, le prétraitement au benzène, rappelons-le sensibilise à un tel point la terre à l'action de l'eau que seule des cohésions extrêmement élevées à l'état humide permettent aux agrégats de résister. Le résultat entraîne donc deux conclusions :

- L'argile utilisée, même lorsqu'elle est à l'état pur, ne présente jamais une cohésion suffisante.

- La mouillabilité de tous les échantillons est assez élevée pour ne pas intervenir de façon sensible aux tests utilisés et même au plus spécifique d'entre eux.

Cette deuxième conclusion est la plus importante : elle permettra de simplifier l'interprétation des autres résultats. Les différents tests ne mettront en évidence que des effets "cohésion". Aussi pourrions-nous nous baser sur le taux d'agrégats stables sans prétraitement, obtenu à la suite de l'action de l'eau la plus énergique, les agrégats stables aux autres prétraitements nous fournissant des éléments pour une interprétation plus nuancée à certains niveaux.

B - AGREGATS STABLES SANS PRETRAITEMENT.

Le graphique n° 1 indique quelles ont été les variations de stabilité des différentes séries en fonction des taux croissants d'argile.

• On peut d'abord faire un certain nombre de constatations générales :

- D'une manière générale, la stabilité (Age %) croît avec la teneur en argile.

- Cette augmentation de stabilité n'est pas linéaire sauf exception. Les courbes ont en général une forme en S.

- Les faibles doses d'argile sont parfois insuffisantes pour provoquer l'apparition d'une stabilité décelable par le test utilisé.

- La stabilité maxima est atteinte pour des taux d'argile inférieurs à 100 % : on note une certaine baisse de stabilité vers les fortes teneurs en argile ( $> 60$  %).

• Si maintenant nous comparons les courbes représentant la stabilité des différentes séries, nous pouvons noter que si elles présentent les caractères communs précédents, elles font également apparaître des différences de comportement des échantillons selon la dimension de la fraction complémentaire :

- Tout d'abord, pour les séries a1 et aS l'apparition d'agrégats stables se manifeste pour des teneurs en argile plus faibles que dans le cas des séries aL et aS' (tableau n° 4)

Toutefois, la série aS dans laquelle, nous l'avons vu, on pouvait déjà noter l'apparition d'un taux d'agrégats stables à partir de teneurs en argile plus faibles que dans les séries aL et as, fait exception à cette règle tant que la teneur en argile ne dépasse pas 40 %.

- Il résulte de la comparaison de ces différentes séries que les mélanges contenant soit du limon grossier, soit du sable fin, ont pour chaque teneur en argile des comportements très voisins, s'opposant d'une part aux mélanges de la série al, d'autre part à ceux de la série aS.

#### C - AGREGATS STABLES APRES PRETRAITEMENT A L'ALCOOL ET AU DIOXANE

Les variations du taux d'agrégats stables sans prétraitements, si elles permettent une interprétation simple dans le cas où la mouillabilité du sol reste élevée ( $Ag_b$  constamment nul) n'en traduisent pas moins les réactions à une action brutale de l'eau sur la terre sèche. Aussi, dans le but de nuancer et de préciser les constatations que nous venons d'exposer, avons-nous examiné le résultat des prétraitements à l'alcool et au dioxane, dont G. Monnier (1965) a montré qu'ils étaient à même de faire apparaître, grâce à leur action protectrice, des variations de stabilité trop faibles pour ressortir de l'action directe de l'eau.

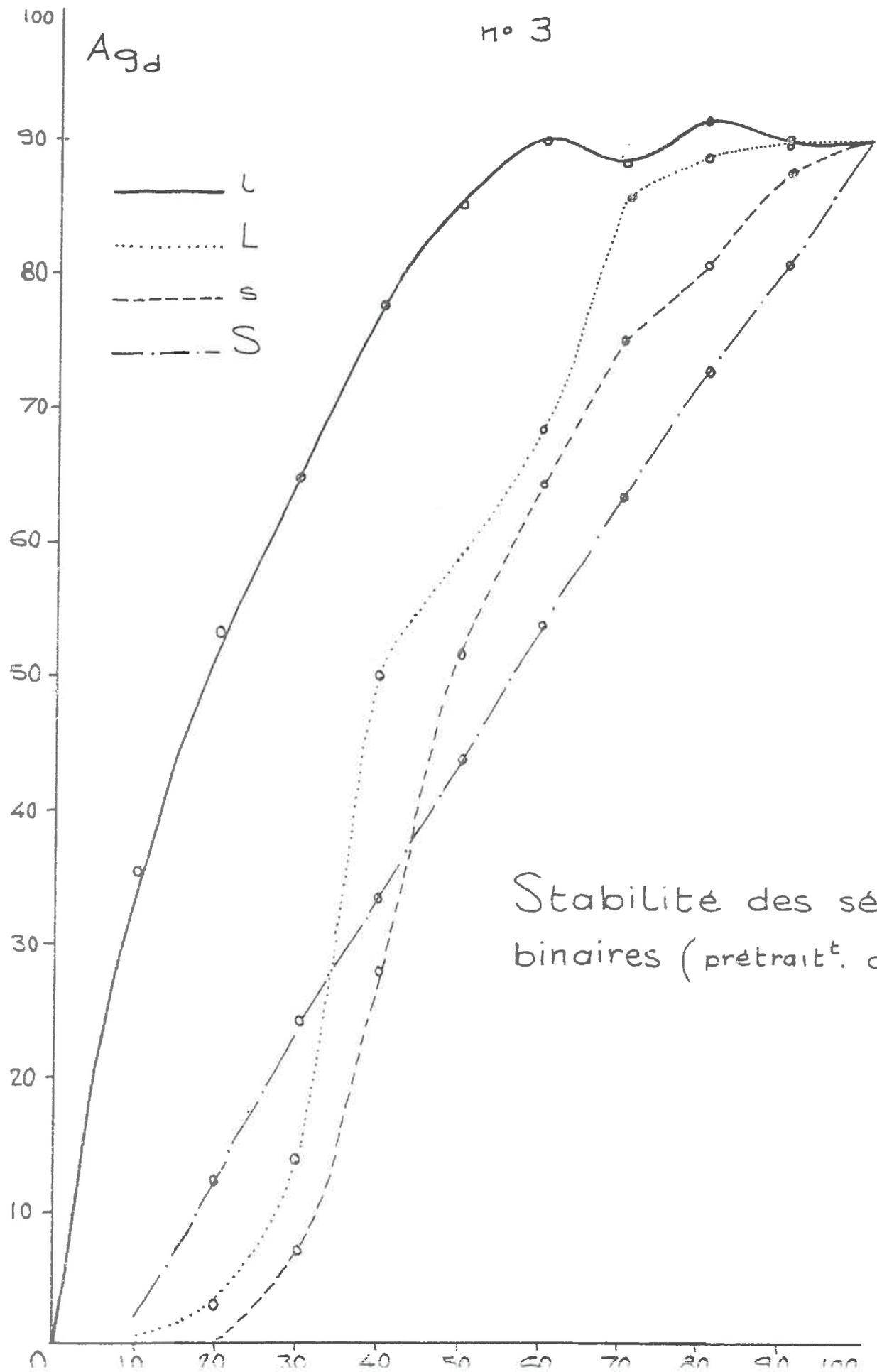
Les graphiques n° 2 et 3 rassemblent les résultats obtenus

On peut constater que si l'allure générale des variations de stabilités est la même exprimée en  $Ag_a$  ou  $Ag_D$  qu'en  $Ag_e$  il existe un certain nombre de différences :

- Dans la série al et pour les taux d'argile inférieurs à 40 %, l'action protectrice des prétraitements Dioxane et alcool éthylique est très marquée. Au contraire, dans le cas des mélanges

$A_{gd}$

n° 3



Stabilité des série  
binaires (prétrait<sup>t</sup>. diox

argiles - sables grossiers, Ag<sub>e</sub> Ag<sub>a</sub> Ag<sub>d</sub> sont très voisins pour chaque teneur en argile. Quant aux séries aL et as elles ont un comportement intermédiaire à cet égard.

Le tableau N° 6 dans lequel nous avons fait figurer pour les quatre séries le taux d'argile minimum à partir duquel la stabilité aux différents prétraitements commence à se manifester, illustre ce fait.

Tableau N° 6

Teneurs en argile pour lesquelles la stabilité apparaît aux prétraitements.

Mélanges	Air	Alcool	Dioxane
al.....	30	supérieur à 10	inférieur à 10
aL.....	supérieur à 30	supérieur à 20	20
as.....	supérieur à 30	supérieur à 20	supérieur à 20
aS.....	supérieur à 10	10	10

Ce tableau fait, de plus, ressortir, que les mélanges à base de limon grossier ou de sables fins ne présentent aucune stabilité lorsque la teneur en argile est inférieure à 20 % et cela quel que soit le prétraitement. Au contraire, les mélanges argile limon fin présentent des agrégats stables pour des taux d'argile inférieurs à 10 % après prétraitement au dioxane, supérieurs à 10 % après prétraitement à l'alcool, égaux ou supérieurs à 30 % sans prétraitement.

- Après nous avoir précisé l'allure des phénomènes lors de l'apparition des premiers agrégats stables, l'emploi des prétraitements nous fournit des éléments complémentaires au niveau des fortes stabilités (maximum apparent et au-delà).

On constate en effet que la teneur en argile correspondant au maximum pour chaque prétraitement est d'autant plus élevée que le prétraitement est plus protecteur. Ce fait vient utilement éclairer la baisse des taux d'âge que nous avons noté pour toutes les séries, sauf aS, au-delà d'une certaine teneur en argile. En fait, après le prétraitement le plus protecteur, le dioxane, cette baisse disparaît dans tous les cas. Après prétraitement à l'alcool elle est fortement atténuée.

Tableau N° 7

Teneur en argile correspondant à un taux d'agrégat maximum dans les différentes séries et avec les divers prétraitements.

Texture	Air	Alcool	Dioxane
al	60	60 - 80	60 - 100
aL	80	90	80 - 100
as	90	90	100
aS	90	90 - 100	100

Pour tirer parti des informations que nous fournit l'action comparée des différents prétraitements, il devient nécessaire de préciser la signification que l'on peut attribuer au rapport des taux d'agrégats stables.

#### D - COMPARAISON DE L'ACTION DE PRETRAITEMENTS

Pour avoir une idée sur la taille moyenne des agrégats stables nous avons fait une observation directe de ceux-ci. Nous avons remarqué, qu'en général, la différence entre les tailles

moyennes des agrégats stables aux trois prétraitements est d'autant plus grande que le taux d'agrégats à ces prétraitements sont plus voisins.

En outre, au cours de l'étude de la stabilité, nous avons constaté qu'il y a certains mélanges, dans lesquels les taux d'agrégats aux trois prétraitements sont très voisins l'un de l'autre.

Les mélanges qui montrent la même stabilité aux prétraitements à l'alcool et au dioxane ne sont pas rares.

Ces constatations paraissent ne pas être conformes à ce que l'on sait de l'action protectrice différente des prétraitements et nous avons cherché à expliquer ces divergences.

Pour la comparaison, nous avons illustré l'action plus ou moins protectrice des prétraitements pour un mélange donné par la différence des taux d'agrégats stables aux prétraitements divers et par leur rapport.

Nous avons rassemblé dans le tableau N° 8 les rapports de  $\frac{A_{ga}}{A_{ge}}$  et  $\frac{A_{gd}}{A_{ga}}$  et les différences  $A_{g_a} - A_{g_e}$  et  $A_{g_d} - A_{g_a}$ .

Tableau N° 8

Rapports  $\frac{Ag_a}{Age}$  et  $\frac{Ag_d}{Ag_a}$  et différences  $Ag_a-Age$  et  $Ag_d-Ag_a$

a % mélanges		10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		$\frac{Ag_a}{Age}$			50	24	3	1,1	1,1	1,15	1,24
aL				12	9	3,5	1,72	1,40	1,30	1,35	1,26
as				5	4,5	2,00	1,43	1,33	1,26	1,30	1,26
aS			1,36	1,32	1,25	1,18	1,14	1,18	1,17	1,19	1,26
$Ag_a-Age$			26	46	45	7	6	11	16	15	14
aL				5	27	36	25	21	18	23	14
as				8	26	27	18	17	16	19	14
aS			2	6	7	6	6	9	10	12	14
$\frac{Ag_d}{Ag_a}$		36	2	1,35	1,14	1,07	1,06	1,04	1,10	1,25	1,32
aL				2,33	1,61	1,17	1,11	1,14	1,05	1,02	1,32
as				1	1	1	1,06	1,08	1,06	1,06	1,32
aS			1	1	1	1,05	1,04	1,05	1,07	1,14	1,32
$Ag_d-Ag_a$		35	26	17	10	6	5	4	9	8	22
aL			2	8	19	9	7	11	4	2	22
as				0	0	0	4	6	5	5	22
aS		0	0	0	0	2	2	3	5	10	22

Nous avons fait les constatations suivantes :

- Pour les mélanges dans lesquels les agrégats stables apparaissent dans chaque série ( $Ag_e = 2$ ), la différence entre les taux d'agrégat aux prétraitements divers est d'autant plus faible que les fractions associées à l'argile sont plus grossières.

- Dans chaque série, les taux d'agrégat aux divers prétraitements, sont de plus en plus voisins à mesure que la teneur en argile et, par conséquence, les taux d'agrégats stables augmentent.

Toutefois, dans la série  $a_s$  et pour les teneurs en argile inférieures ou égales à 50 % les taux d'agrégats stables à l'alcool et au dioxane sont égaux. Ils diffèrent légèrement pour les teneurs en argile supérieures à 50 %.

Dans la série  $a_S$  ce phénomène est encore plus marqué et le taux d'agrégats stables à l'eau est très voisin des autres.

D'autre part, dans toutes les séries, les rapports et les différences atteignent un minimum pour des teneurs en argile inférieures à 100 % et ils augmentent ensuite.

- En général, pour une teneur donnée en argile,  $Ag_a$  est beaucoup plus proche d' $Ag_d$  que d' $Ag_e$ .

- Les variations de ces rapports et de ces différences sont beaucoup plus marquées pour les teneurs en argile inférieures ou égales à 40 % que pour les teneurs supérieures.

o

o o

Pour les mélanges ayant des teneurs en argile supérieures à 40 % la stabilité est suffisamment élevée pour que la plus grande partie des agrégats résistent à l'action directe de l'eau. C'est ainsi que le taux d'agrégat à l'eau, dans cette gamme de teneur en argile, ira rejoindre les taux d'agrégats à l'alcool et au dioxane. C'est ce qui se passe pour la série aS quelle que soit la teneur en argile des mélanges. Nous verrons plus tard que, dans cette série, le ciment argileux intervient plus directement et lui confère une stabilité élevée. Si cette stabilité ne se concrétise pas toujours par un taux élevé d'agrégats, c'est en raison de l'élimination des constituants sableux pour la détermination de taux d'agrégats vrais.

Pour les mélanges ayant des teneurs en argile inférieures ou égales à 40 %, et, par conséquent moins stable, le comportement de la série aL paraît normal vis à vis des traitements. En effet, dans cette gamme de teneur en argile cette série montre des taux très différents les uns des autres.

Seul, reste à expliquer le comportement des séries aL et aS, pour les teneurs en argile  $< 40\%$ . Pour ces mélanges, les taux d'agrégats sont très peu élevés et très voisins l'un de l'autre et quelquefois, même, égaux.

Nous pouvons assimiler l'action de trois prétraitements à celle de trois forces différentes. Ces forces ne détruisent qu'une partie importante de matériau auquel elles sont appliquées. On peut penser qu'une plus grande partie ne résiste pas même à la force la plus modérée, tandis que l'autre partie est assez résistante, même vis à vis de la force la plus importante.

Ce schéma nous conduit, en quelque sorte, à la notion d'hétérogénéité des agrégats aL et aS en ce qui concerne la répartition de l'argile.

La répartition de la phase argileuse paraît plus homogène dans la série al que dans la série aL et as pour les mélanges où la stabilité commence à se manifester.

On peut se demander quelles sont les causes de ce défaut d'homogénéité. Nous examinerons ultérieurement cet aspect du problème.

Enfin, nous pouvons expliquer l'augmentation des rapports et les différences des taux, pour les fortes teneurs en argiles (supérieures à 60 %) par la baisse de stabilité, qui se manifeste lorsque les matériaux sont très argileux.

o  
o o

On voit que pour les agrégats suffisamment stables les trois prétraitements ne sont pas capables de nuancer les résultats de stabilité (taux d'Ag. stables) d'une manière significative. La seule conséquence qui se manifeste se situe au niveau de la taille moyenne des agrégats stables qui est très différente d'un prétraitement à l'autre.

Pour les mélanges ayant une stabilité mauvaise ou moyenne (teneur en argile inférieure à 40 %), les trois prétraitements ne donnent pas des résultats différents si les mélanges soumis au test ne sont pas assez homogènes.

Tout ceci conduit au fait que le sens (direction) des variations des taux d'agrégats aux différents prétraitements ne reste pas toujours le même.

Ainsi on voit qu'il est difficile de porter un jugement suffisamment précis sur la cohésion des mélanges en se basant

seulement sur le comportement comparé des agrégats aux différents prétraitements.

Les taux d'agrégats stables reflètent à la fois la plus ou moins grande résistance du matériau suivant sa cohésion propre et la position de la taille des particules résultant de la dégradation par rapport à 200 ; limite conventionnelle du tamisage.

C'est pourquoi nous sommes amené à étudier d'une façon plus directe la cohésion des agrégats de nos échantillons.

## II Les tests de Cohésion

Test de cohésion :

On sait que dans le cas qui nous occupe c'est la cohésion à l'état humide qui constitue la caractéristique du sol intervenant dans le schéma proposé par S. Henin et que nous avons à préciser.

En effet, lorsqu'on met un agrégat au contact de l'eau, d'une façon suffisamment ménagée pour éviter sa destruction sa cohésion évolue au cours de l'humectation. Au fur et à mesure que le ciment argileux absorbe de l'eau, il voit ses propriétés mécaniques plus ou moins modifiées, selon le cas.

La cohésion à l'état humide résulte d'une telle évolution

Il nous a donc fallu imbiber les agrégats de cette manière, pour amener leur cohésion à la valeur particulière qui nous intéresse.

Le principe de cette imbibition repose sur les observations déjà citées de S. Henin, selon lesquelles une imbibition sous vide ou par capillarité réduit considérablement l'éclatement. L'humectation a donc eu lieu sous vide et à partir d'une plaque de porcelaine de porosité très fine. L'eau et les agrégats ont été préalablement soumis au vide pendant une heure. Les agrégats, après

avoir été imbibés ont été laissés au repos vingt minutes pour que le gonflement et la dispersion aient le temps d'intervenir. Grâce à ce procédé même les agrégats constitués à partir des mélanges les plus instables ont conservé leur forme initiale. Seuls les agrégats ayant des fortes teneurs en argile ont eu un comportement différent, sur lequel nous reviendrons.

Nous avons, ensuite, testé la cohésion des agrégats à l'état humide. Nous parlons de test de cohésion, puisque la mesure de celle-ci sur un matériau aussi hétérogène qu'un agrégat n'a pas de sens physique précis. Dans ce but, nous avons utilisé la technique mise au point par Concaret (1965) qui consiste à comprimer l'agrégat entre une butte et le plateau d'une balance jusqu'à ce que l'agrégat éclate.

Le mode opératoire retenu a été le suivant :

En appliquant des efforts croissants de façon continue, il arrive un stade où une première ou plusieurs ruptures apparaissent dans l'agrégat. Nous avons désigné l'effort appliqué à ce stade par "seuil de rupture" ou par le terme de "valeur minima de cohésion". Si nous poursuivons l'application d'efforts croissants l'agrégat s'effondre brutalement. La force correspondant à ce stade est désigné par le terme "seuil d'éclatement" ou par "valeur optima de cohésion".

Pour obtenir une moyenne représentative de la cohésion des mélanges; nous avons soumis aux mesures quelques dizaines d'agrégats pour chaque échantillon (30-35).

## II.- LES RESULTATS DU TEST DE COHESION.

Nous avons rassemblé dans les graphiques n° 4 et 5 les moyennes arithmétiques des valeurs de cohésion de toutes les séries (seuil de rupture et d'éclatement). On constate que :

- La cohésion augmente en fonction de la teneur en argile, mais elle atteint un maximum pour les teneurs en argile  $\geq 50\%$ , selon le cas, et elle descend ensuite.

- La teneur en argile correspondant à la cohésion maximum est d'autant plus forte que la fraction associée à l'argile est plus grossière. Au contraire, la valeur absolue de cette cohésion diminue, lorsque la **taille** des particules associées à l'argile augmente.

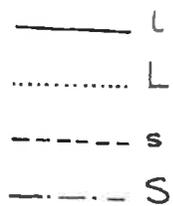
- Pour une teneur donnée en argile, la cohésion est d'autant plus faible qu'on passe de fractions complémentaires fines à des fractions les plus grossières.

On voit que, dans leurs grandes lignes, les variations de cohésion coïncident avec celles de la stabilité structurale. Il apparaît que les causes principales qui interviennent dans l'augmentation et dans la baisse des résultats du test de stabilité et de la cohésion sont les mêmes.

Toutefois si on compare, plus en détail, ces deux séries de résultats on constate que :

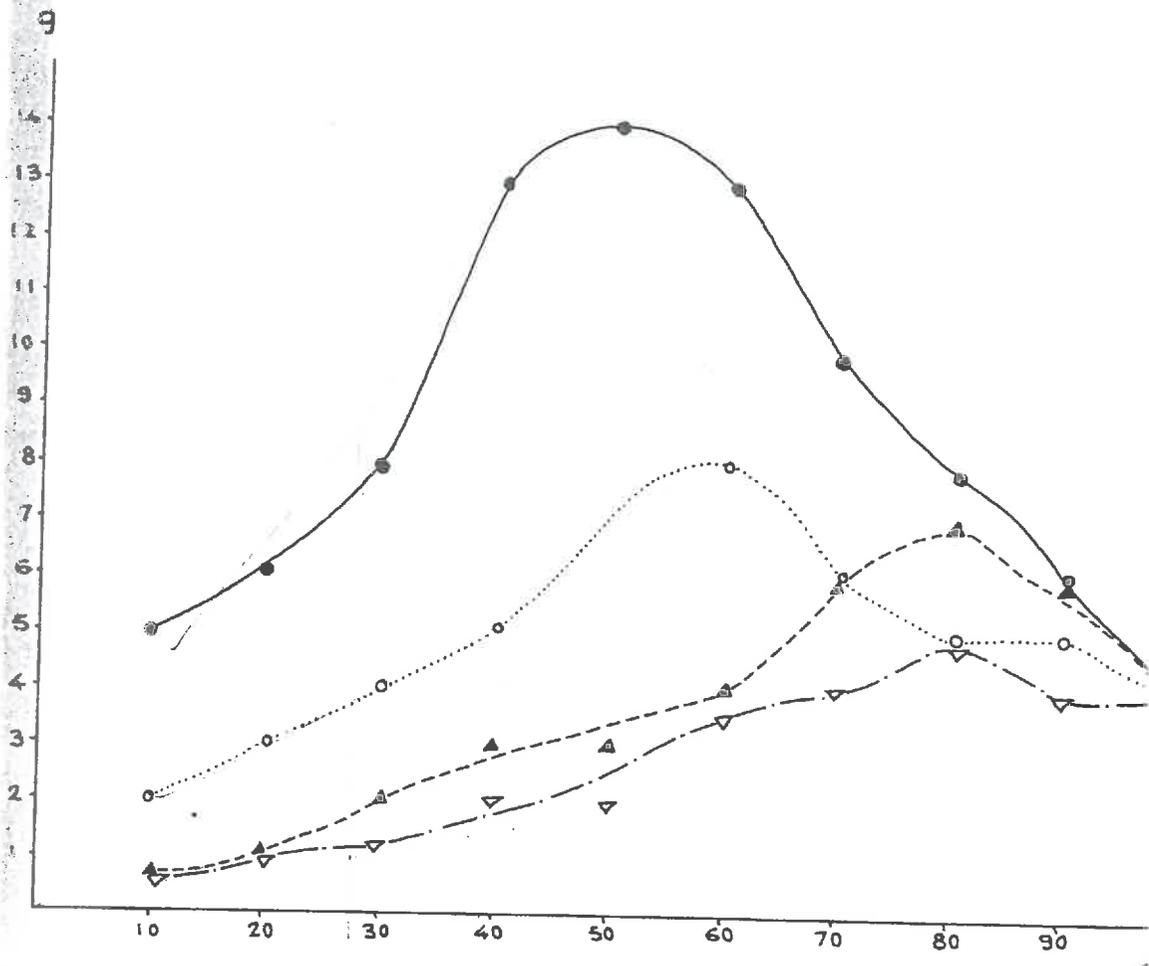
. Pour une série donnée, la cohésion devient maximum pour une teneur en argile qui est, en général, inférieure de 10 % à celle qui entraîne le maximum de stabilité.

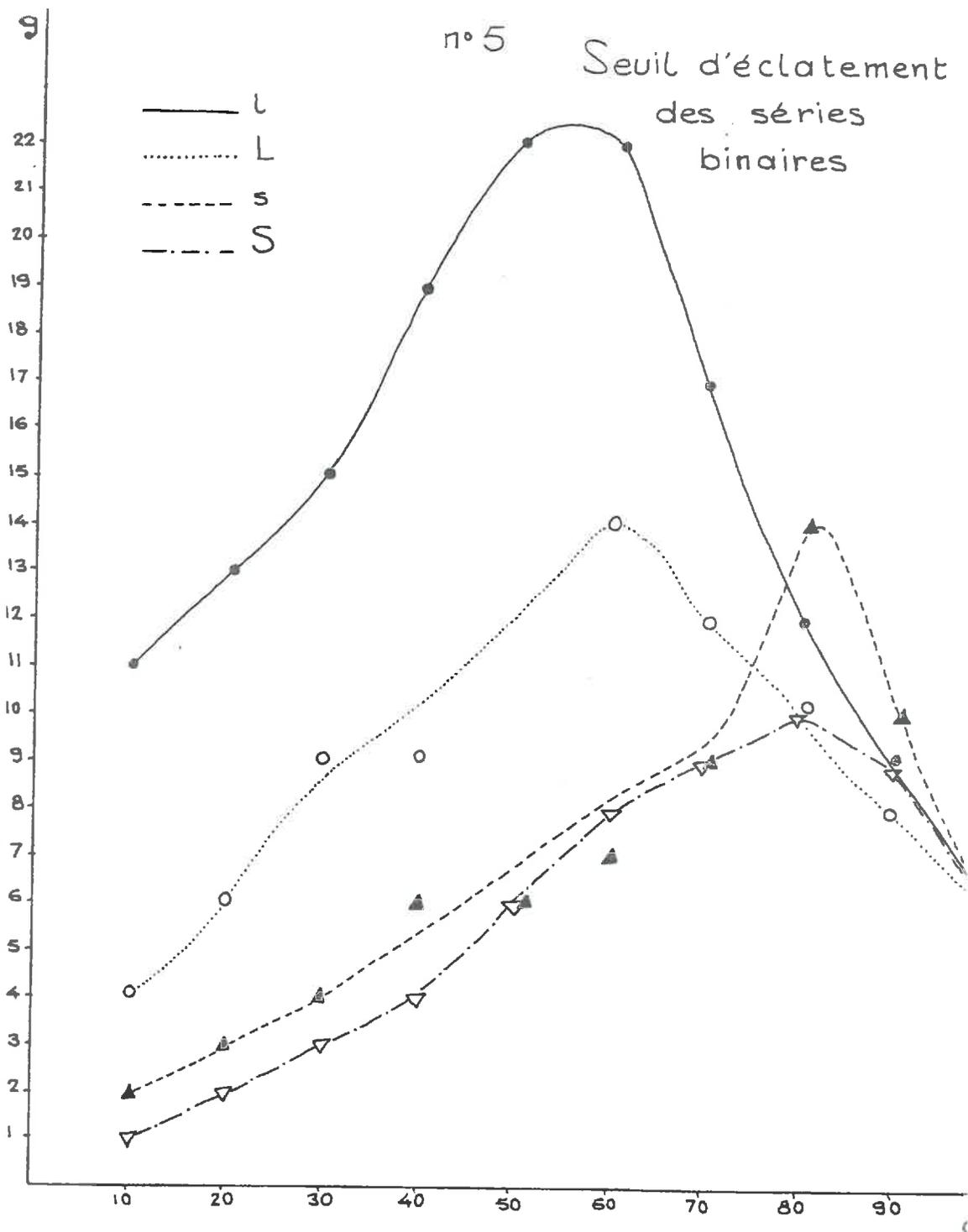
. La baisse de cohésion à partir de cette valeur maximum est beaucoup plus marquée que celle de la stabilité.



n° 4

Seuil de rupture des séries binaires





. Si dans la série aS et jusqu'à 40 % d'argile, le taux d'agrégats stables à l'eau, est plus fort que dans les autres séries, cette particularité disparaît pour les résultats du test de cohésion (on voit que la courbe de cohésion de la série aS passe, toujours, au-dessous de celles des autres séries).

. Si le passage des teneurs en argile inférieures à 40 aux teneurs supérieures est marqué par une augmentation importante de la stabilité, cela n'est plus vrai pour la cohésion.

### III.- INTERPRETATION DES RESULTATS.

Nous allons maintenant expliquer les divergences qui existent entre les deux séries du test de stabilité et de cohésion. Nous nous proposons, même, d'étudier le mécanisme de l'apparition et de variation de stabilité.

Pour effectuer une telle étude, nous avons envisagé la stabilité (taux d'agrégat ~~est stable~~ et la cohésion) dans trois gammes de teneur en argile :

A - Les teneurs en argile inférieures à 40 %.

B - Les teneurs en argile allant de 40 % jusqu'aux teneurs correspondant aux valeurs maximum de taux d'agrégats stables et de cohésion.

C - Les teneurs en argile supérieures à celles qui correspondent aux résultats maxima des tests.

A - ECHANTILLONS CONTENANT MOINS DE 40 % D'ARGILE.

Plusieurs raisons nous ont conduit à considérer comme critique une teneur en argile de l'ordre de 40 % :

- C'est pour les teneurs en argile inférieures à ce seuil qu'apparaissent les premiers agrégats stables.

- Les rapports  $\frac{A_{ga}}{A_{ge}}$  et les différences  $A_{ga} - A_{ge}$  sont beaucoup plus élevés pour les teneurs en argile inférieures à 40 % que pour les teneurs supérieures. Le passage de 40 % à 50 % de la teneur en argile est très nettement marqué par une diminution brutale des rapports  $\frac{A_{ga}}{A_{ge}}$  et des différences  $A_{ga} - A_{ge}$ .

- Jusqu'à 40 % d'argile la série aS manifeste une stabilité, vis-à-vis de l'action directe de l'eau plus grande que les autres séries.

— Lorsqu'on passe de 40 à 50 % d'argile, il se produit une augmentation très nette de taux d'agrégats stable à l'eau dans toutes les séries.

Nous avons cherché à expliquer par quel mécanisme cette teneur en argile de 40 % intervient plus particulièrement dans la stabilité.

Pour cela, nous avons pris en considération toutes les variables qui, dans les conditions où nous avons opéré, peuvent intervenir dans les variations de stabilité structurale. Ces variables sont les suivantes :

- La teneur en argile.
- La taille des particules associés à l'argile, leurs teneurs relatives et enfin leur arrangement (la densité et la forme des particules sont presque les mêmes pour toutes les fractions granulométriques : la densité réelle étant environ de 2,6 et la forme pouvant être considérée comme sphérique).

Nous avons déjà montré que la stabilité varie non seulement en fonction de teneur en argile, mais aussi, dans une large mesure, en fonction des particules qui lui sont associées. Toutefois on sait que la stabilité en absence de ciment argileux est toujours nulle.

On peut en déduire que toutes les variables correspondant aux fractions associées à l'argile interviennent indirectement, dans la stabilité, en modifiant l'action de l'argile. Ces interventions s'exercent par l'intermédiaire des vides que les particules peuvent laisser entre elles. Le rapport entre le volume de ces vides et la quantité d'argile présent influe sur la répartition de cette dernière dans l'échantillon de terre.

On voit ainsi que la répartition de l'argile dans le sol peut, dans une très large mesure, résumer et traduire l'action de tous les variables et leur influence finale dans la stabilité.

C'est pourquoi nous nous proposons d'étudier cette répartition et en particulier les quantités qui sont nécessaires pour remplir le vide laissé entre les particules qui lui sont associées, dans des conditions diverses.

1°) Etude de l'arrangement des particules des sols.

Supposons que toutes les particules associées à l'argile ont une forme sphérique de même diamètre et prenons huit de ces sphères. L'assemblage de quatre sphères dont les centres sont dans un plan horizontal, constitue une couche. Nous pourrions superposer deux couches. C.S. Slichter distingue deux types d'arrangement de ces huit sphères, cubique et rhombique. Gratton et Fraser ont montré la possibilité de six dispositions, mais nous retiendrons seulement les deux types extrêmes conduisant aux porosités maxima et minima :

Dans le type 1 d'arrangement, dit cubique, les couches sont formées de sphères dont les centres sont aux sommets d'un carré et le centre des sphères de deux couches superposées se trouvent aux sommets d'un carré dans un plan vertical. L'arrangement cubique a pour conséquence une porosité maxima de 47,64 %.

Dans le type 6 d'arrangement (rhombique) les couches sont formées de sphères dont les centres sont aux sommets d'un losange d'angles 60° et 120° et les centres des sphères de deux couches superposées se trouvent aux sommets d'un losange dans un plan vertical. Cet arrangement conduit à un vide minimum qui est 25,95 % (1). Signalons que ces pourcentages sont indépendants du diamètre des sphères.

En tenant compte de la densité réelle des fractions complémentaires (2,66 mesurée pour les S.g.) et la densité apparente mesurée de l'argile (1,80) dans les conditions de fabrication que nous avons retenues, on peut calculer, à partir de pourcentages en volume (47,64 et 25,95) les pourcentages pondéraux d'argile nécessaire pour remplir les vides dans ces deux cas extrêmes :

---

(1) G. Castany, Cours de Géologie appliquée, Edition scientifique Riber.

- Arrangement cubique avec un vide maximum de 47,64 %

Supposons que dans un tel arrangement tous les vides soient occupés par l'argile et le reste (52,36 %) soit occupé par une fraction complémentaire : on peut obtenir le pourcentage pondéral d'argile de la relation suivante : 
$$\frac{d_1 v_1}{d_1 v_1 + D_2 (100-v_1)} 100$$
 dans lequel :

$d_1$  est égal à la densité apparente de l'argile (1,80)

$v_1$  est égal au pourcentage volumique occupé par l'argile.

$D_2$  est égal à la densité réelle de fraction complémentaire (2,66)

On obtient ainsi le pourcentage pondéral d'argile suffisant pour remplir tous les vides dans l'arrangement le plus lâche, soit : 38,10 %.

Dans l'arrangement du type 6 (rhombique) avec un vide minimum de 25,95 % le pourcentage pondéral de l'argile est 19,10.

Nous constatons que ces deux teneurs en argile ont une valeur déterminante dans la répartition plus ou moins continue de la phase argileuse dans les échantillons de terre. En effet :

. Pour les teneurs en argile inférieures à 19 %, dans les conditions théoriques, quel que soit l'arrangement des fractions associées; la phase argileuse est discontinue : l'argile n'est pas présente en quantité suffisante pour remplir tous les vides.

. Pour les teneurs en argile supérieure à 38 % quel que soit l'arrangement des fractions associées, la phase argileuse est continue : l'argile est toujours présente en quantité suffisante pour remplir tous les vides.

. Pour les teneurs en argile comprises entre 19 et 38 % la continuité de la phase argileuse dépend de la proportion des arrangements de type cubique et des types les plus serrés.

Pour utiliser ces données à l'étude des sols il faut tenir compte du fait que le diamètre des particules associées à l'argile varie non seulement d'une fraction à l'autre, mais aussi, à l'intérieur même d'une classe granulométrique. Si le diamètre des particules intervient seulement dans l'épaisseur plus ou moins grande de la phase argileuse, ses variations interviennent dans l'arrangement plus ou moins serré, et par là, dans la perturbation des teneurs en argile 19 % et 38 %, envisagées comme seuil dans la répartition de celle-ci.

Toutefois, la teneur en argile de 40 % que, d'après les résultats expérimentaux, nous avons reperé comme une teneur particulière, coïncide étroitement avec celle que nous avons calculé pour un arrangement de type cubique (38 %). On peut, a priori, considérer les teneurs en argile voisines de 19 % et voisines de 38 % d'argile comme deux points de repère pour préciser les variations de stabilité et pour les expliquer.

On constate, tout d'abord, qu'avec moins de 20 % d'argile nous n'obtenons pas d'agrégat stable dans les séries aL et as, même avec le prétraitement le plus protecteur (dioxane). Par contre **pour la série a l manifeste une** certaine stabilité aux prétraitements à l'alcool et au dioxane. Ceci paraît contraire à l'hypothèse que nous avons admise.

On peut attribuer l'apparition de stabilité dans cette série, qui se manifeste pour les teneurs en argile plus faibles que les séries aL et as, au fait que la variation relative de diamètre de l.f. est plus grande que celle de L.g; et s.f.

Comme nous l'avons dit, la gamme de variations de diamètre des fractions associées peut intervenir dans leur arrangement et perturber la répartition du ciment argileux par rapport au schéma théorique.

Ainsi, nous avons calculé que dans l'arrangement le plus serré des particules sphériques de diamètre  $d_1$ , pour remplir les vides on peut introduire des particules sphériques ayant un diamètre  $d_2$  tel que  $\frac{d_1}{d_2}$  soit égal ou supérieur à 6,52.

Pour le l.f. il y a donc possibilité d'un arrangement très serré puisque le rapport de  $\frac{\text{limite supérieure}}{\text{limite inférieure}}$  est égal à 10. Au contraire, une telle possibilité n'existe pas pour le L.g. et le s.f. puisque ces rapports sont respectivement  $\frac{50}{20} = 2,50$  et  $\frac{160}{63} = 2,54$ .

L'action de l'arrangement très serré est telle que pour les teneurs en argile inférieures à 20 % il y a des agrégats stables aux prétraitements à l'alcool et au dioxane.

D'autre part, les rapports de  $\frac{A_{ga}}{A_{ge}}$  et  $\frac{A_{gd}}{A_{ga}}$  sont très élevés dans la série al. Ce qui implique, comme nous l'avons dit, une homogénéité de structure plus grande dans la série al que dans les séries aL et as. Cette homogénéité est probablement due à un arrangement plus serré des particules.

Il en résulte une répartition plus favorable de l'argile pouvant créer une certaine stabilité qui se manifeste grâce aux prétraitements protecteurs.

Bref, en ce qui concerne l'apparition des agrégats stables, on peut penser qu'en général la stabilité d'un mélange est nulle tant que la phase argileuse est discontinue.

- Examinons maintenant la stabilité des mélanges contenant entre 20 et 40 % d'argile :

. Dans la série al la stabilité à l'eau des agrégats commence à se manifester aux environs de 30 % d'argile, et, dans les séries aL et as elle commence pour les teneurs en argile supérieures à 30 %.

. Dans les séries aL et as il n'y a que très peu d'agrégats stables à l'eau jusqu'à ce que la teneur en argile atteigne 40 %.

. Les taux d'agrégat stable aux prétraitements à l'alcool et au dioxane ne sont jamais nuls, dans aucune série, pour cette gamme de teneur en argile. Mais , l'augmentation de stabilité, pour toutes les séries et pour tous les prétraitements, dans cette gamme est, presque toujours peu marquée.

On voit que la stabilité croît lentement pour les teneur en argile où il n'y a pas nécessairement continuité du ciment argileux dans les mélanges.

Pour la série aS , un phénomène particulier intervient La taille des S.g est telle qu'elle modifie considérablement l'épaisseur de la phase argileuse.

La discontinuité de la phase argileuse et son épaisseur suffisamment élevée, ainsi que la taille des particules sableuses (supérieure à 200  $\mu$  ) dans cette série, sont à l'origine d'un comportement particulier que nous allons examiner.

## 2°) Etude des agrégats qui restent sur le tamis lors du test de la série aS.

L'observation directe des agrégats stables de la série aS montre qu'ils comprennent d'une part les S.g nus et complètement séparés de l'argile et, d'autre part des agglomérats de ciment argileux. Nous appellerons ce phénomène : "différenciation des phases".

Comme nous l'avons vu, la continuité de la phase argileuse n'est pas assurée pour les teneurs en argile inférieures à

40 %, et, jusqu'à ce niveau l'argile n'est pas présente en quantité suffisante pour englober entièrement les fractions associées quelle qu'elles soient.

Cependant, les S.g qui ont des dimensions plus grandes que les autres fractions ménagent entre eux des vides plus grossiers. D'autre part, pour un poids donné de fraction complémentaire, le nombre et la surface des particules sont beaucoup plus faibles que ceux des autres fractions. La surface de contact avec l'argile est donc moins élevée, d'où probablement une facilité plus grande de libération des S.g. de la phase argileuse.

Cette séparation peut se répercuter sur le test de stabilité parce que la phase argileuse, ayant une épaisseur moyenne supérieure à 200  $\mu$  reste sur le tamis.

La séparation des fractions complémentaires de la phase argileuse est possible dans toutes les séries, tant qu'il n'y a pas continuité de la phase argileuse. Mais elle ne peut pas causer la "différenciation des phases" proprement dite, pour les raisons inverses de celles qui la provoquent dans la série aS.

La différenciation des phases aboutit, lorsque la teneur en argile est inférieure à 40 %, à un taux d'agrégats stable à l'eau plus élevé dans la série aS que dans les autres séries. C'est pour cette raison, d'ailleurs, que la stabilité, dans cette série, apparaît pour des teneurs en argile plus faibles.

On peut penser que la phase argileuse de la série aS, une fois libérée de squelette sableux, se comporte, vis à vis de test de stabilité comme si les S.g. n'intervenaient pas. Pour le montrer, nous avons rassemblé dans le tableau n° 9 le taux d'agrégat stable mesuré et le taux d'agrégat stable calculé c'est-à-dire le taux qu'on pourrait obtenir si l'argile contenue dans le mélange était testée toute seule.

Tableau N° 9

Taux d'agrégats stables mesurés et calculés  
dans les échantillons de la série a.S.

Texture	Age		Age <sub>a</sub>		Age <sub>d</sub>	
	Mesuré	Calculé	Mesuré	Calculé	Mesuré	Calculé
a S 10 90	0,6	5	1	7	3	9
a S 20 80	9	11	11	15	12	18
a S 30 70	17	17	23	22	23	27
a S 40 60	26	22	33	30	33	36

On constate qu'il y a un bon accord entre les taux calculés et mesurés. Dans le seul mélange a<sub>10</sub> S<sub>90</sub> la différence entre ces deux taux est sensible et peut avoir un sens précis. Dans ce mélange, la teneur en argile de 10 % est loin d'être suffisante pour créer une continuité dans la phase argileuse, même, dans l'arrangement le plus serré. Par ailleurs, ce déficit d'argile accroît la probabilité d'un tel type d'arrangement dans l'agrégat. Dans ces conditions, l'épaisseur moyenne de la phase argileuse tombe au-dessous de 200 μ . En effet, comme nous l'avons dit, dans l'arrangement rhombique le rapport de  $\frac{R}{r}$  est égal à 6,5 , R étant le rayon des sphères élémentaires et, r étant le rayon des sphères introduites à l'intervalle des premières. Même si on suppose pour tous les S.g un diamètre maximum ( 1000 μ dans les conditions où nous avons opéré), le diamètre des fragments argileux

qui peuvent exister à l'intervalle des fractions sableuses, dans un arrangement plus serré; sera de l'ordre de  $\frac{1.000}{6,5}$ , inférieur à 200  $\mu$ .

Ainsi, les fragments de l'argile passent à travers le tamis, quelle que soit leur stabilité proprement dite. Ceci explique qu'il existe une certaine différence entre les taux d'agrégats stables calculés et mesurés.

Pour les teneurs en argile supérieures à 20 %, il apparaît que la forme et la dimension moyennes des fragments argileux sont telles qu'elles ne sont plus à l'origine d'une baisse de stabilité de cet ordre.

o  
o o

Nous avons ainsi expliqué l'apparition d'agrégat stable dans les différentes séries et les variations de leur taux. Nous avons montré, d'autre part, pourquoi, pour une teneur donnée en argile, la cohésion de la série aL était supérieure à celle de aL et es.

Nous allons, maintenant, examiner, pour quelle raison pour une teneur donnée en ciment argileux, la cohésion mesurée est plus grande pour la série aL que pour la série as et pour la série as que pour la série aS :

Les résultats du test de cohésion des série as et aS **dépendent**, non seulement de la cohésion même des mélanges soumis au test, mais d'un comportement particulier des agglomérats dû à la présence de particules complémentaires grossières. En effet, lorsqu'on fait subir le test à des agrégats sableux, il y a une répartition irrégulière des grands efforts appliqués par la butée.

En effet, les S.g. et les s.f. ne transmettent pas uniformément les pressions qu'ils subissent; mais provoquent des effets du coin. On aboutit ainsi à une baisse de seuil de rupture et de seuil d'éclatement. Cet effet est, évidemment, d'autant plus marqué que les particules intéressés sont plus grossiers.

Conclusion :

En tenant compte de l'arrangement des fractions complémentaires et de la discontinuité plus ou moins grande de la phase argileuse qui en résulte, on peut expliquer le mécanisme de la formation des premiers agrégats stables pour les teneurs en argile supérieures ou égales à 20 %.

Pour une fraction donnée, l'introduction, lorsqu'elle est possible, des grains les plus fins d'une fraction dans les vides laissés, par l'empilement des plus grossiers, explique pourquoi, dans la série a1, l'apparition de la stabilité se manifeste pour des teneurs en argile plus faibles. Elle explique, également, par quel mécanisme les agrégats, dans cette série, résistent à l'action des prétraitements à l'alcool et au dioxane, pour les teneurs en argile inférieures à 20 %.

C'est, aussi, en interprétant les schémas d'arrangements possibles qu'on peut expliquer, dans une certaine mesure, pourquoi la courbe de la cohésion de la série a1 passe au-dessus de la courbe de cohésion de la série aL.

Par ailleurs, le comportement différent par comparaison avec les autres séries, des séries as et aS, vis à vis du test de cohésion, explique pourquoi, pour une teneur donnée en argile, la cohésion diminue lorsqu'on passe de la série aL à as et puis à aS.

Enfin la différenciation des phases permet de comprendre pourquoi pour une teneur donnée en argile inférieure à 40 %, la stabilité est supérieure dans la série aS à ce qu'elle est dans les autres séries. Le même phénomène explique aussi que, dans la série aS l'apparition de stabilité se manifeste pour les teneurs en argile plus faibles que dans les autres séries (aL et as particulièrement).

B - ECHANTILLONS DE SOL CONTENANT PLUS DE 40 % D'ARGILE.

Comme nous l'avons dit lorsque la teneur en argile dépasse 40 %, quels que soient le mode d'arrangement et la dimension des particules du squelette, il y a continuité dans la phase argileuse. Cette continuité du ciment se manifeste avec une grande netteté sur les résultats des tests de stabilité et de cohésion.

- Pour les teneurs en argile supérieures à 40 %, quel que soit le prétraitement, la stabilité s'accroît considérablement. A cet égard, si l'on considère l'action directe de l'eau, la plus brutale, (excepté celle du benzène), cette augmentation est remarquable lorsqu'on dépasse une teneur en argile de 40 % (Tableau n° 10).

Tableau N° 10

Augmentation du taux d'agrégats stables à l'eau lorsqu'on passe de 40 à 50 % d'argile.

Texture \ a %	30	40	50	60
a 1	2	23	73	78
a L	1	4	15	36
a s	2	8	25	42
a S	-	-	-	-

- D'autre part, les rapports  $\frac{Aga}{Age}$  et  $\frac{Agd}{Age}$  diminuent brutalement lorsque la teneur en argile passe de 40 à 50 %. Comme nous l'avons vu pour les teneurs en argile supérieures à 40 % les variations de ces rapports en fonction de teneurs en argile sont beaucoup plus faibles que pour les teneurs en argiles inférieures à 40 % (Tableau n° 11).

Tableau N° 11

Diminution des rapports  $\frac{Aga}{Age}$  et  $\frac{Agd}{Age}$   
lorsqu'on passe de 40 % à 50 % d'argile

Rapport du taux d'agrégats stables.	Texture \ a %	30	40	50	60
	$\frac{Aga}{Age}$	a l	24	3	1,10
a L		12	9	3,5	1,7
a s		5	4,5	2	1,43
$\frac{Agd}{Age}$	a l	32	3,4	1,16	1,16
	a L	26	13	4	1,5
	a s	12	3,7	2	1,52

- Le taux d'agrégat stable dans la série aS baisse considérablement par rapport aux autres séries, lorsqu'on passe des teneurs en argile inférieures à 40 % aux teneurs supérieures.

La différenciation des phases qui avait comme origine l'insuffisance du ciment argileux pour englober les grains de S.g., disparaît.

- Le passage des teneurs en argile inférieures à 40 % à des teneurs supérieures, est nettement marqué par une augmentation brutale de l'écart type de résultats de cohésion (seuil de rupture) dans la série al. Il varie de 1,71 à 4,67 lorsqu'on passe de a l à a l .

30	70	à	a l	.
			40	60

Il apparaît ainsi que les variations de stabilité sont discontinues lorsqu'on passe de teneurs en argile inférieures à 40 % à des teneurs supérieures. On peut considérer une teneur en argile, d'environ 40 % comme un seuil à partir duquel la phase argileuse devient continue et la stabilité augmente brusquement.

En résumé, pour les teneurs en argile supérieures à 40 % la stabilité croît au fur et à mesure que la teneur en argile augmente et que corrolairement la phase continue de l'argile devient de plus en plus épaisse.

Toutefois, comme nous l'avons vu, la stabilité n'augmente pas jusqu'à 100 % d'argile. Il arrive même qu'elle diminue à partir de 60 % d'argile. Nous allons, maintenant, étudier cet aspect du phénomène.

#### 1°) Etude de la fissuration.

Nous avons constaté, en diverses occasions, telle que le test de stabilité et de cohésion, que les agrégats mouillés riches en argile étaient plus ou moins délités et fissurés.

Ces constatations nous ont conduit à penser que ce phénomène de fissuration pourrait être responsable de la baisse de stabilité et de cohésion.

C'est à partir d'une telle hypothèse que nous avons étudié les caractères de la fissuration et les conséquences qui en découlent :

Nous avons cherché à savoir, tout d'abord, si la fissuration était indépendante de l'éclatement. Dans ce but, nous avons effectué une observation directe des agrégats mouillés, après avoir supprimé l'éclatement par les deux procédés suivants :

- Imbibition des agrégats à l'alcool éthylique.
- Imbibition des agrégats à l'eau, mais sous vide, et à partir d'une plaque poreuse. Nous avons opéré dans les mêmes conditions que celles de la préparation des agrégats pour le test de cohésion à l'état humide.

Dans les deux cas, nous avons noté que ce sont les agrégats riches en argile qui se sont fissurés. Ensuite, pour préciser cette observation, nous avons imbibé à l'alcool tous les échantillons des séries binaires et nous les avons observé systématiquement au microscope binoculaire (agrandissement 12) et à l'oeil nu. Nous avons constaté les faits suivants :

- . La fissuration se manifeste toujours, pour les teneurs en argile égales ou supérieures à 40 %.
- . Le taux d'agrégat affecté par la fissuration, dans chaque série, augmente à mesure que la teneur en argile croît.
- . L'intensité de la fissuration (inverse de la distance moyenne entre deux fissures successives), est d'autant plus grande que la teneur en argile est plus forte. Il y a une relation directe entre l'intensité de fissuration et le nombre d'agrégats fissurés.
- . L'intensité de la fissuration, pour une teneur donnée en argile est de plus en plus marquée lorsqu'on passe de a1 à aL puis à as.
- . L'aspect de la fissuration dans la série aS est différent.

Nous avons apprécié le pourcentage d'agrégats fissurés dans tous les mélanges; les résultats sont rassemblés dans le tableau N° 12.

Tableau N° 12

Pourcentage d'agrégats fissurés,  
apprécié à l'oeil nu ou au microscope binoculaire  
dans les séries des mélanges binaires.

Texture \ a %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
a l	0	0	0	4	15	40	100	100	100	100
a L	0	0	0	0	5	25	80	100	100	100
a s	0	0	0	0	1	3	15	70	100	100
a S	0	0	0	10	40	60	80	100	100	100

Dans les échantillons où les premières fissures se forment et où le taux d'agrégats affectés par le phénomène est inférieur à 10 ou 15 %, la fissuration n'est décelable qu'à la loupe binoculaire. Toutefois, dans la série aS la fissuration est tellement fine que, jusqu'à 60 % d'argile, elle n'est pas observable à l'oeil nu. Pour tous les autres échantillons, on peut facilement observer les fissures qui atteignent une intensité maximum pour l'argile pure (une dizaine de fissures, parfois plus, dans un agrégat de diamètre moyen 1,5 mm.).

L'observation montre que les surfaces de fissures ne sont pas obligatoirement planes, ni même, toujours parallèles. Divers aspects sont possibles : emboîtement arrondi ou anguleux. Il y a aussi les fissures simples : continues, discontinues ou entrecroisées.

La fissuration dans la série aS, comme nous l'avons dit, a un aspect particulier. Cela provient du fait que les localisations argileuses, dans cette série, sont suffisamment épaisses pour qu'une fissuration fine se produise à l'intérieur même de cette phase. Les lignes directrices des fissures sont discontinues et elles sont arrêtées, si on peut dire, par les particules sableuses. Dans les autres séries, au contraire, les fissures intéressent la totalité du volume de l'agrégat.

Après avoir ainsi précisé le phénomène et ses variations, nous avons cherché à savoir si la fissuration des échantillons reconstitués ne provenait pas de leur mode de fabrication. Pour cela, nous avons pris en essai des sols naturels, riches en argile (60 % et 90 %) et nous avons montré non seulement l'existence des fissures dans ces terres argileuses, mais aussi l'identité des caractères de fissuration dans les sols artificiels et naturels (intensité de la fissuration, orientation des surfaces de fissures, etc...).

Pour compléter l'étude directe de la fissuration et de sa comparaison avec celle des sols naturels, nous avons photographié des agrégats tirés de la série al et de sols naturels contenant plus de 40 % d'argile, à l'état sec et après leur imbibition à l'alcool. On peut y voir plus précisément la fissuration et ses caractères tels que nous les avons décrit.

L'observation de la fissuration, ne suffit pas, à elle seule, à montrer l'influence du phénomène sur la stabilité et sur la cohésion de terre humide. C'est pourquoi, nous allons étudier, plus en détail les conséquences directes de ce phénomène, afin de pouvoir expliquer toutes les particularités qui en découlent.

2°) Conséquences de la fissuration.

a)- Comportement d'un agrégat fissuré vis-à-vis du test de stabilité.

La fissuration a pour première conséquence la diminution de la taille moyenne des agrégats effectivement soumis au test de stabilité. Cette diminution de la taille moyenne des agrégats doit normalement aboutir à une baisse générale de stabilité. Ceci nous conduit à attribuer à ce phénomène la baisse de stabilité que nous avons noté vers les fortes teneurs en argile.

Il faut souligner dans cette hypothèse que la baisse de stabilité vers les fortes teneurs en argile n'implique pas une baisse de stabilité intrinsèque des matériaux étudiés qui sont de plus en plus argileux. En effet, la stabilité intrinsèque peut augmenter en fonction de teneurs en argile croissantes.

Pour le montrer, nous avons soumis au test de stabilité des agrégats de la série al d'un diamètre inférieur à celui que nous avons choisi précédemment (0,28 à 1 mm. au lieu de 1 à 2 mm)

Nous avons constaté que, dans ces conditions, la stabilité augmentait jusqu'à 80 % d'argile au lieu de 60 % pour des agrégats plus grossiers (Tableau N° 13).

En effet, pour un mélange donné, un agrégat est d'autant moins affecté par les fissures que sa taille moyenne est plus petite. Autrement dit, les agrégats qui ont un diamètre inférieur à la distance moyenne entre deux fissures successives (échelle de fissuration) sont normalement moins fissurés que les agrégats plus grossiers.

On voit donc que la baisse de stabilité, dans la série al à partir de teneur en argile 60 % n'est pas due à une baisse

de stabilité intrinsèque, puisqu'en diminuant l'intensité de la fissuration (par diminution de la taille moyenne des agrégats soumis au test) la stabilité continue à croître.

On peut aller encore plus loin pour chercher les conséquences de la fissuration, et par là, la diminution de la taille moyenne des agrégats soumis au test de stabilité : la fissuration des agrégats fait en sorte que certaines particules terreuses se libèrent au cours du test de stabilité et qu'elles peuvent passer à travers du tamis à  $200 \mu$ , même si elles résistent à l'action de l'eau. Il y aura donc accroissement de taux de particules, d'une taille légèrement inférieure à  $200 \mu$ , au fur et à mesure que la fissuration devient plus intense. Nous appelons ces particules qui passent à travers du tamis à  $200 \mu$ , mais qui ont une taille supérieure à  $20 \mu$ , les "sous-agrégats". Ils sont mal définis pour les séries aL et as puisque les fractions associées dans ces séries ont un diamètre, lui aussi compris entre  $20 \mu$  et  $200 \mu$ . C'est pourquoi nous avons étudié les taux de sous-agrégats, seulement pour la série al. Nous avons obtenu ces taux par le calcul suivant :  $100 - \left[ (a+1) \text{ inférieur à } 20\mu \text{ mesuré} + \text{le taux d'agrégats stables} \right]$ . (Tableau N° 13)

On voit que quel que soit le diamètre des agrégats soumis au test, la diminution de taux d'agrégat stable sous l'action de la fissuration est accompagnée par une augmentation de "sous-agrégat". Cette augmentation est très nette en passant de  $a_{60} l_{40}$  à  $a_{70} l_{30}$  ; pour les agrégats soumis au test compris entre 1 et 2 mm., et nous savons que c'est précisément la zone où le taux d'agrégat stable baisse. Pour les agrégats, 0,28 - 1 mm. l'augmentation de taux de "sous agrégat" a lieu lorsqu'on passe de  $a_{80} l_{20}$  à  $a_{90} l_{10}$ . Là encore il s'agit du point où le taux d'agrégats stables diminue.

On peut aussi montrer directement la diminution de la taille moyenne des agrégats soumis au test par la fissuration. Pour cela, nous avons comparé le nombre des agrégats stables à l'alcool dans les mélanges de la série al pour un poids déterminé (100 mg.) (Tableau N° 13) : on constate que, quel que soit le diamètre des agrégats soumis au test, la baisse de taux d'agrégat stable est accompagné d'une nette diminution de la taille moyenne des agrégats stables.

.../...



En résumé, la fissuration qui entraîne une diminution de la taille moyenne des agrégats effectivement soumis au test se manifeste :

- par une baisse de taux d'agrégat stable (supérieur à  $200 \mu$  ) ;
- par une baisse de la taille moyenne des agrégats stables ;
- par une augmentation de taux de "sous-agrégats" ( $20\mu - 200 \mu$  ) .

Ces constatations conduisent à penser que les teneurs en argile correspondant à une stabilité maximum, sont celles qui assurent un compromis entre la cohésion et la fissuration.



Si la fissuration perturbe les résultats du test de stabilité par la diminution de la taille moyenne des agrégats soumis au test, elle intervient d'une autre manière et par un autre mécanisme dans le test de cohésion et dans la perturbation de ses résultats.

b)- Comportement d'un agrégat fissuré vis-à-vis du test de cohésion.

L'existence de fissures dans un agrégat soumis au test de cohésion a des répercussions directes sur les résultats du test. En effet, nous ne mesurons plus, alors, la résistance à la rupture, ni résistance à l'éclatement d'un matériau continu, mais, plutôt

une "résistance à la séparation" ou "résistance au délitement" d'un agrégat suivant les surfaces de fissures.

Les mesures, telles que nous les avons définies, seront influencées non seulement par l'intensité de la fissuration, mais aussi dans une certaine mesure, par la disposition des surfaces de fissures par rapport à la direction des efforts appliqués.

Un tel comportement de l'agrégat fissuré entraîne une baisse des seuils mesurés lors de l'apparition de fissures.

Toutefois, la baisse des moyennes arithmétiques des résultats du test de cohésion ne se manifeste pas pour les teneurs en argile correspondant à l'apparition de la fissuration. En effet, pour ces teneurs, les agrégats soumis au test ne sont pas tous fissurés. Les moyennes arithmétiques ne peuvent alors révéler ni la baisse brutale des mesures des seuils pour les agrégats fissurés, ni l'augmentation assez importante de cohésion proprement dite pour les agrégats dans lesquels la phase argileuse devient continue.

Dans un cas pareil, c'est l'écart-type des résultats qui peut mettre en évidence leur grande dispersion en ce qui concerne les échantillons pour lesquels tous les agrégats ne sont pas fissurés. C'est dans ce but que nous avons fait le calcul des écarts types des résultats de cohésion (seuil de rupture), pour les séries a1 et aL dans lesquelles la fissuration est suffisamment marquée.

Le tableau N° 14 rassemble les moyennes arithmétiques de seuil de rupture et leur écart-type dans les séries a1 et aL.

Tableau N° 14

Moyennes et écart-types du seuil de rupture  
dans les séries a1 et aL.

		mélanges a %		10	20	30	40	50	60	70	80	90
a1	seuil de rupture	moyennes arithmétiques		5	6	8	13	14	13	10	8	6
		Ecart-types		1,72	1,83	1,71	4,67	4,78	4,45	2,34	2,20	2,20
aL	seuil de rupture	moyennes arithmétiques		2	3	4	5	-	8	6	5	5
		Ecart-types		0,53	0,80	1,38	1,10	-	2,92	1,67	2,35	1,68

On constate d'abord que, si les écarts types varient dans le même sens que les moyennes arithmétiques, seuls les premiers augmentent brutalement lorsqu'on passe de teneurs en argil inférieures à 40 % à des teneurs égales ou supérieures, par exemple l'écart-type varie de 1,71 à 4,67 lorsqu'on passe de a<sub>30</sub> 1<sub>70</sub> à a<sub>40</sub> 1<sub>60</sub>. Cette augmentation est due à une baisse de cohésion apparente des agrégats fissurés d'une part, et à une élévation importante de cohésion des agrégats intacts, d'autre part. C'est pour quoi, d'ailleurs, les écarts-types diminuent rapidement lorsqu'on passe aux échantillons dans lesquels les agrégats sont entièrement fissurés, par exemple, l'écart-type décroît de 4,45 à 2,34 en passant de a<sub>60</sub> 1<sub>40</sub> à a<sub>70</sub> 1<sub>30</sub>. (Ces agrégats du mélange a<sub>70</sub> 1<sub>30</sub> étant entièrement fissurés). (Voir tableau n° 12, page 49).

Ainsi, s'explique le fait que les variations des moyennes arithmétiques de cohésion ne coïncident pas avec celles de taux d'agrégat stable, lorsque la phase argileuse devient continue (lorsqu'on passe de teneurs en argile inférieures à 40 % à des teneurs supérieures).

D'autres divergences entre les variations de deux séries de résultats du test de cohésion et de stabilité, dont nous avons parlé, ont comme cause principale le comportement différent d'un agrégat fissuré vis-à-vis des deux tests. Nous avons vu que les teneurs en argile correspondant aux cohésions maximum sont inférieures à celles qui correspondent aux stabilités maximum. Cela provient du fait que les moyennes arithmétiques rassemblent les résultats concernant aussi bien les agrégats fissurés que les agrégats intacts. Alors que la cohésion des agrégats non fissurés augmente en fonction de teneur en argile.

La baisse de cohésion à partir de sa valeur maximum qui est plus grande que celle de stabilité, est due au comportement différent de l'agrégat fissuré vis-à-vis de deux tests. En effet, la cohésion à l'échelle d'agrégat diminue considérablement en présence de fissure. Une mesure plus directe de cohésion comme celle de seuil de rupture, met en évidence, le mieux, cette baisse. Tandis que dans le test de stabilité, les agrégats, même disloqués par les fissures, tant qu'ils ne sont pas passés à travers de tamis à 200  $\mu$ , se groupent par convention, parmi les agrégats stables. Comme le comportement d'un agrégat fissuré est différent dans deux tests de cohésion et de stabilité, il sera inutile de chercher, en tout cas, une coïncidence étroite entre les résultats de cohésion et ceux de stabilité des agrégats fissurés. En effet, ce qui est principal dans notre étude est : suivre l'évolution de cohésion en fonction de texture, dans deux tests. Cette cohésion résiste à l'action d'eau (éclatement) dans le test de stabilité et elle résiste à l'action des efforts mécaniques (résistance à la rupture et

à l'éclatement), dans le test de cohésion. Nous avons montré qu'en absence de fissuration, la cohésion varie dans la même direction, dans les deux tests, en fonction de ~~terreux~~ en argile et des fractions complémentaires. Nous avons montré également que, lorsque la phase argileuse devient continue, la cohésion et la stabilité des échantillons augmentent considérablement.

o  
o o

Nous avons ainsi étudié la fissuration des agrégats à l'état humide, ses caractéristiques et ses conséquences. On peut, de même, se demander si les fissures préexistent dans l'agrégat à l'éclat sec, ou, si elles n'apparaissent qu'à l'éclat humide. Nous allons maintenant examiner cet aspect de fissuration :

### 3°) Origine de fissuration.

Il est difficile, sinon impossible, de mettre en évidence par la seule observation, l'existence de fissures dans un agrégat à l'état sec. Nous avons pensé, donc, à un autre moyen.

Nous nous sommes basé sur l'hypothèse que les fissures préexistantes peuvent perturber les résultats de mesures de seuil de rupture sur les agrégats secs. Nous avons vu que cela est vrai pour les agrégats à l'état humide, même lorsque les fissures ne sont pas visibles à l'oeil nu.

Le principe de technique choisi est celui de mesure de seuil de rupture et seuil d'éclatement d'agrégat à l'état humide. Nous avons seulement adapté le test à des cohésions beaucoup plus élevées.

La technique consiste à comprimer l'agrégat en appliquant des efforts croissants et continus jusqu'à l'apparition d'une première rupture ou d'une série de ruptures (seuil de rupture), ou, jusqu'à l'effondrement de l'agrégat (seuil d'éclatement).

Les efforts sont appliqués à la main, avec une régularité suffisante, par l'intermédiaire d'un levier. Ces efforts, après avoir comprimé l'agrégat entre un plateau et une butée, sont transmis à un dynamomètre qui indique les valeurs relatives des efforts correspondants aux seuils de rupture et d'éclatement. Le recul de l'aiguille de dynamomètre, aux moments de l'apparition de la rupture ou de l'effondrement de l'agrégat, permet de préciser les valeurs des seuils.

Pour obtenir une moyenne arithmétique représentative, nous avons pris en essai dans chaque échantillon un nombre d'agrégats de l'ordre de soixante. Nous avons mesuré, sur la moitié, le seuil de rupture et sur une autre moitié le seuil d'éclatement.

Nous insisterons surtout sur les résultats de seuil de rupture qui ont une signification physique plus simple.

Nous avons opéré seulement sur les séries  $a_1$  et  $a_L$ .

Enfin, nous avons calculé les écarts types des résultats des seuils, pour connaître la dispersion de ceux-ci qui pourraient être utiles pour mettre en évidence la fissuration.

Nous avons rassemblé les résultats du test de cohésion à l'état sec (les moyennes arithmétiques des seuils et les écarts-types de résultats de seuils de rupture) dans le tableau N° 15.

Tableau N° 15

Moyennes et écart type des  
différents tests de cohésion.

textures	argile %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
		Cohésion									
a L	Moyennes arithmétiques	5	7	9	12	19	25	25	25	24	27
	Seuil de rupture : —										
	Ecart types	1,4	2,1	2,5	2,24	4,8	6,4	5,4	8,4	9,4	8,6
	Seuil d'éclatement	8	11	12	14	24	37	38	34	36	30
a L	Moyennes arithmétiques	3	5	6	9	11	18	24	24	20	27
	Seuil de rupture : — <b>CV</b>	15%	42%	53%	65%						
	Ecart types	0,22	1,2	1,3	2,4	2,8	3,7	3,5	5,3	6,8	8,6
	Seuil d'éclatement	3	5	6	9	11	21	28	29	31	30

On constate que :

- Les seuils de rupture et d'éclatement augmentent dans les deux séries, en fonction de la teneur en argile et atteignent un maximum avant 100 % d'argile . Pour les teneurs en argiles égales et supérieures à 60 %, ils ne varient plus, ou très faiblement. Au contraire, les écarts-types croissent jusqu'à la fin dans ces deux séries.

- L'augmentation des moyennes arithmétiques et des écarts types est brutale lorsqu'on passe de  $a_{40} l_{60}$  à  $a_{50} l_{50}$  et de  $a_{50} l_{50}$  à  $a_{60} l_{40}$ .

- Pour une teneur donnée en argile, les seuils de rupture et de l'éclatement et les écarts-types sont plus élevés dans la série  $al$  que dans la série  $aL$ .

- Nous pouvons, enfin, constater que pour une série donnée, la différence entre les deux seuils de rupture et de l'éclatement est d'autant plus grande que la teneur en argile est plus forte. De plus, pour une teneur donnée en argile, cette différence est plus importante pour la série  $al$  que  $aL$ .

Ces constatations sont en faveur de l'hypothèse d'une préexistence des fissures à l'état sec. En effet, dans le cas contraire la cohésion devrait, normalement toujours augmenter avec la teneur en argile. On peut penser que, dans les conditions où nous avons opéré, l'intensité de la fissuration pour les teneurs en argile égales ou supérieures à 60 % est telle qu'elle empêche l'augmentation de cohésion. Mais, par contre les écarts types deviennent de plus en plus grands, à mesure que la teneur en argile augmente, et que, par voie de conséquence, la fissuration devient de plus en plus intense. En effet, comme dans le cas de la cohésion à l'état humide, pour un échantillon de terre où les agrégats sont les uns fissurés et les autres non fissurés, l'écart type est supérieur à ce qu'il est pour un échantillon homogène (les agrégats entièrement intacts ou entièrement fissurés).

D'autre part, les teneurs en argile de 40 et 50 % qui marquent, dans les séries  $al$  et  $aL$ , une augmentation brutale des résultats correspondent précisément aux teneurs où la continuité de la phase argileuse est suffisante pour apparition des premières fissures. Nous avons déjà montré l'existence de fissures

pour les teneurs en argile dans les séries al et aL par observation (tableau N° 12, page 49).

Dans la série al, pour une teneur donnée en argile, la cohésion à l'état sec et la fissuration préexistante paraissent être plus fortes que celles de la série aL, ce qui est vrai, d'ailleurs, pour les agrégats à l'état humide.

On voit que les résultats du test de cohésion à l'état sec sont comparables avec ceux de cohésion à l'état humide. On peut en tirer des présomptions quant à l'existence des fissures à l'état sec.

Toutefois, la cohésion des échantillons ne montre, pratiquement, aucune baisse vers les fortes teneurs en argile. En effet, l'action d'un liquide, l'alcool en l'occurrence, accentue les fissures qui aboutissent à une baisse de cohésion à l'état humide et une diminution des écarts types pour les fortes teneurs en argile. Tandis que l'influence des fissures préexistantes sur les résultats du test de cohésion à l'état sec est suffisamment modérée pour qu'elle ne cause pas une baisse de cohésion.

Enfin, on peut penser qu'il y a une certaine relation directe entre la convergence de deux seuils de cohésion à l'état sec et la fissuration préexistante, puisque, comme nous avons vu, cette différence augmente en fonction de la teneur en argile, et, en fonction de la finesse des fractions complémentaires.

Ainsi, nous avons montré qu'il préexistait une fissuration à l'état sec. Ce fait paraît d'ailleurs normal. En effet, à partir des teneurs en argile, où cette phase devient continue dans un mélange, les processus de gonflement au contact d'un liquide et de retrait au cours de la dessiccation interviennent de façon très sensible dans la formation des fissures. Dans ces conditions, il est très probable que l'on peut extrapoler les résultats obtenus pour les séries al et aL ; aux séries as et aS.

#### 4°) Mécanisme de stabilité des échantillons argileux.

Nous avons montré quelles étaient les variations de stabilité en fonction de la teneur en argile lorsqu'elle est supérieure à 40 %, et les phénomènes qui se produisent en présence des fortes teneurs en argile.

Nous allons maintenant examiner l'influence dans les mélanges très argileux de la nature des fractions complémentaires :

Nous avons déjà fourni, pour le comportement des mélanges binaires, contenant moins de 40 % d'argile une explication basée sur les diverses possibilités d'arrangement des éléments de squelette.

Pour les teneurs en argile supérieures à 40 %, on peut penser encore à un tel mécanisme, en particulier pour la série aL qui fournit, pour un pourcentage donné en ciment argileux, une cohésion et un taux d'agrégat plus élevé que les autres séries.

Quant à la comparaison de taux d'agrégat stable pour les séries aL et aS, comme nous l'avons dit, elles se comportent presque de la même façon, vis à vis du test de stabilité.

Il reste à expliquer pourquoi, pour une teneur donnée en argile, la série aS fournit un taux d'agrégat stable inférieur à celui des autres séries, au-dessus de 40 % d'argile, avec prétraitement et au-dessus de 60 % d'argile sans prétraitement : en présence de S.g. , quelle que soit la teneur en argile, la stabilité est plus ou moins influencée par la différenciation des phases. Mais l'intensité et les causes de celle-ci, sont différentes pour les teneurs en argile inférieures à 40 % d'une part et pour celles supérieures à 40 %, d'autre part. Si, pour les teneurs en argile inférieures à 40 %, c'est la discontinuité de la phase argileuse qui cause ce phénomène, pour les teneurs en ciment supérieur c'est au contraire sa continuité qui conduit à ce résultat. Rappelons, en effet, que la fissuration dans la série aS présente un aspect

particulier : l'épaisseur de la phase argileuse y est suffisante, pour que les fissures y prennent naissance. Une telle fissuration cause la "différenciation des phases" pour les teneurs en argile supérieures à 40 %. Elle est, d'ailleurs, moins intense que celle qui se produit pour les teneurs en argile inférieures à 40 % ; on voit, sur le tamis, non seulement les sables nus d'une part et les fragments de l'argile d'autre part, mais aussi un certain nombre d'agrégats stables qui contiennent des sables et qui n'ont donc pas complètement subi la différenciation des phases proprement dite.

On voit que si la différenciation des phases ne cesse pas d'intervenir, elle cause une baisse relative du taux d'agrégat stable pour les teneurs en argile supérieures à 40 %, par rapport aux autres séries. En effet, les fragments de l'argile, disloqués par suite de la fissuration fine, passent à travers le tamis.

Toutefois, le mode de calcul de taux "d'agrégats stables vrais" pour la série aS est tel qu'on ne peut pas effectuer une étude comparée précise de taux d'agrégat stable de cette série avec les autres. En effet, on retranche les S.g. qu'ils soient associés ou non à l'argile, sur le tamis alors que dans les autres séries la fraction associée à l'argile qui reste sur le tamis, est, normalement, comprise dans le taux d'agrégats stables.

Enfin, nous devons expliquer le déplacement du niveau maximum de stabilité vers des teneurs en argile de plus en plus élevées, lorsque la taille des particules complémentaires augmente; on peut le rapprocher d'une manifestation de la fissuration, intervenant pour des teneurs en argile de plus en plus élevées, lorsqu'on passe de la série aI à aL et puis à aS. Dans la série aS, nous l'avons vu, la fissuration, dès qu'elle apparaît, entraîne une baisse de stabilité. C'est pourquoi la teneur en argile correspondant à la stabilité maximum est normalement la plus élevée, de 90 à 100 %. Tandis que, dans les trois autres séries,

la fissuration tant qu'elle n'a pas une certaine intensité, ne peut pas aboutir à une baisse de taux d'agrégat stable.

Pour les teneurs en argile où la fissuration devient suffisamment intense ( $a > 60 \%$ ), elle influence les résultats du test de stabilité et de cohésion tel qu'il n'y a aucune règle dans leur variation.

o  
o o

Jusqu'ici, pour expliquer la stabilité des échantillons, nous avons surtout fait appel, à des mécanismes faisant intervenir la continuité de la phase argileuse, la différenciation des phases, l'arrangement des particules élémentaires associées à l'argile, et enfin, la fissuration. On peut aussi estimer que la taille des particules du squelette joue un rôle plus direct. On sait que, pour un poids donné d'une particule, la surface de contact augmente en proportion inverse de diamètre. C'est ainsi que, pour une teneur donnée en argile, la surface de contact de "l'argile-squelette" est d'autant plus grande que le diamètre des éléments associés est plus petit. On peut, normalement, penser que cette surface de contact joue un rôle dans la cohésion de l'ensemble. Nous avons calculé les surfaces de contact "argile-squelette" pour les différentes séries d'échantillons : nous sommes parti d'un agrégat de 1,5 mm.

En effet, les agrégats que nous avons pris en essai dans le test de stabilité ont un diamètre supérieur à 1 mm. et inférieur à 2 mm. Pour simplifier, nous lui avons supposé une forme cubique d'arête 1,5 mm. Par ailleurs, nous avons postulé une forme sphérique pour les particules du squelette disposées à l'intérieur de l'agrégat suivant l'arrangement cubique. Nous avons utilisé pour les calculs des diamètres moyens :  $11 \mu$  pour l.g.,  $35 \mu$  pour L.g.,  $111 \mu$  pour s.g. et  $640 \mu$  pour S.g.

Nous avons rassemblé dans le tableau N° 16 le nombre de particules limoneuses ou sableuses et la surface de contact "argile-squelette" à l'intérieur de l'agrégat.

Tableau N° 16

Surface spécifique maxima de contact  
avec l'argile des 4 fractions complémentaires.

Classes granulométriques	Diamètre moyen de la classe $\mu$	Nombre de particules dans $(1.5)^3$ mm <sup>3</sup> .	Surface des particules en mm <sup>2</sup> .
l	0,011	2.515.456	953
L	0,035	79.507	288
s	0,111	2.516	95
S	0,640	12	15

On constate que, même dans l'arrangement cubique, où les particules occupent un volume minimum, (52,36 %), la surface de contact "argile-squelette" peut varier dans le rapport de 1 à 60 lorsqu'on passe des S.g. au l.f.

Il est probable que l'augmentation du nombre des particules et de leur surface de contact avec l'argile, interviennent, dans une certaine mesure, dans l'élévation de cohésion de fragments terreux, et aussi, peut-être, dans l'apparition et dans l'intensité de fissuration.

On sait que les variations de diamètre des éléments associés à l'argile, provoquent, de plus, des variations de l'épaisseur

de la phase argileuse. Nous avons vu que, dans la série aS, l'épaisseur de cette phase était la seule responsable des répercussions de la différenciation des phases sur le test de stabilité

*variation de diamètre*  
Bref, la variation du diamètre des particules élémentaires intervient principalement dans l'arrangement plus ou moins serré et par là, dans la continuité plus ou moins grande de la phase argileuse. Toutefois, il est possible que s'ajoute à cette action l'influence des variations de diamètre des particules sur la surface de contact "argile-squelette", sur le nombre de ces contact et enfin, sur l'épaisseur de la phase argileuse.

C - VUE D'ENSEMBLE SUR L'ETUDE DES MELANGES BINAIRES.

Pour présenter l'ensemble des résultats de l'étude des mélanges binaires, nous avons fait figurer dans le tableau N° 17 les critères principaux de stabilité et de cohésion et les éléments d'interprétation correspondants :

1)- Le taux d'argile correspondant à la stabilité maximum dans chaque série.

Cette valeur peut indiquer la teneur en argile à partir de laquelle la fissuration devient suffisamment intense pour aboutir à une baisse de taux d'agrégat stable.

2)- La teneur en argile, pour laquelle d'après les observations directes, dans chaque série, la quasi-totalité des agrégats sont fissurés après imbibition à l'alcool.

3)- La teneur en argile, pour laquelle dans chaque série la diminution de la taille moyenne des agrégats stables est brutale et nette.

Cette teneur en argile correspond à une intensité de fissuration suffisante pour entraîner une baisse considérable de la taille moyenne des agrégats stables.

4)- La teneur en argile pour laquelle, dans chaque série, les premières fissures apparaissent à l'état humide.

5)- Le taux d'argile, correspondant à la cohésion maximum dans chaque série (moyenne arithmétique) à partir duquel la fissuration se répercute sur la cohésion de terre humide et aboutit à une baisse de celle-ci.

6)- La teneur en argile à partir de laquelle, dans une série donnée les limites supérieures des résultats du test de cohésion des mélanges montrent une certaine baisse. On peut penser qu'à partir de cette teneur la quasi-totalité des agrégats est fissuré.

7)- La teneur en argile à partir de laquelle, dans une série donnée, les limites inférieures des résultats de test de cohésion des mélanges, baissent. Cette teneur peut correspondre au niveau à partir duquel la fissuration apparaît.

8)- Les teneurs en argile pour lesquelles la dispersion des résultats du test de cohésion (limite supérieure - limite inférieure) est élevée; marque la gamme où les agrégats sont d'une part fissurés et d'autre part intacts. Cela est vrai aussi pour les teneurs en argile des échantillons pour lesquels les écarts types sont plus grands que les autres.

9)- Les teneurs en argile pour lesquelles la série aS marque un taux d'agrégats stables à l'eau plus grand que les autres séries.

10)- Les teneurs en argile pour lesquelles la stabilité apparaît ( $Ag_e = 2$ ), dans chaque série, marquent certaine possibilité dans la continuité de la phase argileuse.

11)- Les teneurs en argile pour lesquelles l'augmentation de taux d'agrégat stable à l'eau est brutale marquent la continuité de la phase argileuse.

12)- Les teneurs en argile pour lesquelles les rapports  $\frac{Ag_a}{Ag_e}$  et  $\frac{Ag_d}{Ag_e}$  diminuent brutalement marquent une continuité suffisante de la phase argileuse pour les échantillons, où, les taux d'agrégats stables aux divers prétraitements s'approchent brusquement.

13)- La teneur en argile correspondant au taux de "sous-agrégat" minimum dans la série al. Cette valeur indique la teneur en argile à partir de laquelle la fissuration devient tellement intense qu'elle aboutit à une augmentation des "sous-agrégats".

TABLEAU N° 17

CRITERES PRINCIPAUX DE STABILITE ET DE COHESION DES MELANGES BINAIRES ; ELEMENTS D'INTERPRETATION.

		a1	aL	as			
1	La teneur en argile correspondant à la stabilité maxima	AIR	60	80	90		
		ALCOOL	60-80	90	90		
		DIOXANE	60-100	80-100	100		
2	La teneur en argile pour laquelle d'après l'observation directe la quasi totalité des agrégats est fissuré.	70	80	90			
3	La teneur en argile pour laquelle la diminution de la taille moyenne des agrégats stables est brutale	60 ± 70	70 à 80	aucun passage net	pe		
4	La teneur en argile pour laquelle les premières fissures apparaissent	40	50	60-70			
5	La teneur en argile correspondant à la cohésion maximum	Seuil de rupture	50-60	60	80	a	
		Seuil d'éclatement	50-60	60	80		
6	La teneur en argile à partir de laquelle les limites supérieures des résultats du test de cohésion baissent	Seuil de rupture	50	60	80-90		
		Seuil d'éclatement	60	60	80		
7	La teneur en argile à partir de laquelle dans une série donnée les limites inférieures des résultats du test baissent	Seuil de rupture	40	50-60	70-80	a	
		Seuil d'éclatement	30	50-60	80	a	
8	Les teneurs en argile pour lesquelles la dispersion des résultats du test de cohésion est élevé	Limite sup.-Limite inf.	Seuil de rupture	50-60	60	90	
			Seuil d'éclatement	60	60	80	
		Ecart type de seuil de rupture	40-60	60	-		
9	Les teneurs en argile pour lesquelles la série aS marque un taux d'agrégats stable à l'eau plus grand que les autres	-	-	-	a		
10	La teneur en argile pour laquelle la stabilité à l'eau apparaît (Age = 2)	30	> 30	> 30			
11	Les teneurs en argile pour lesquelles l'augmentation de taux d'agrégats stables est brutale	> 30	> 40	> 40	au passage		
12	Les teneurs en argile pour lesquelles les rapports $\frac{Ag_a}{Age}$ et $\frac{Ag_d}{Age}$ diminuent brutalement	a > 40	a > 50	a > 50	au passage		
13	La teneur en argile correspondant aux taux de "sous agrégat" minimum dans la série a1	AIR	60				
		ALCOOL	60				
		DIOXANE	60				

On peut tirer de ce tableau des conclusions principales suivantes :

- Les premiers agrégats stables apparaissent dès que la teneur en argile (inférieur à 40 %) et la nature de fraction associée, offrent la possibilité d'une continuité de la phase argileuse.

- Pour les teneurs en argile supérieures à 40 %, la stabilité est largement assurée par suite d'une continuité générale de la phase ciment.

- Il n'y a aucune fissuration pour les mélanges ayant des teneurs en argile inférieures à 40 %, où la quantité de l'argile n'est pas suffisante pour créer une continuité générale de la phase argileuse.

- La continuité de la phase argileuse, d'une façon suffisante pour formation de fissures est fonction de la teneur en argile et de la nature de fraction complémentaire. Les teneurs suffisantes de l'argile pour apparition de fissuration dans les séries diverses sont les suivantes :

40 %	série aI
50 %	série aL
50-60 %	série aS
40 %	série aS

- La fissuration atteint son intensité telle qu'elle baisse les courbes de la stabilité et de la cohésion dans les séries diverses pour les teneurs en argile suivantes :

70 %	série aI
80 %	série aL

90 % ssérie as  
90-100 % série aS

pour les teneurs en argile de la fissuration est facilement visible à l'oeil nu sur les agrégats imbibés à l'alcool et quasi totalité des agrégats est fissurée.

- Au passage des agrégats non fissurés aux agrégats entièrement fissurés, il y a ceux d'intermédiaires.

o  
o o

C H A P I T R E     I I I

ETUDE DES ECHANTILLONS A 3 OU 4 FRACTIONS

I.- CHOIX DES ECHANTILLONS.

L'étude des échantillons à deux fractions nous a fourni des informations sur les mécanismes par lesquels se manifestent la cohésion de la terre, facteur essentiel, en absence de matières organiques, de sa stabilité structurale. Si cette étude permet d'apprécier le rôle de différentes classes de particules prises séparément, elle ne permet, évidemment pas d'aborder les interactions entre les différentes fractions, associées à l'argile.

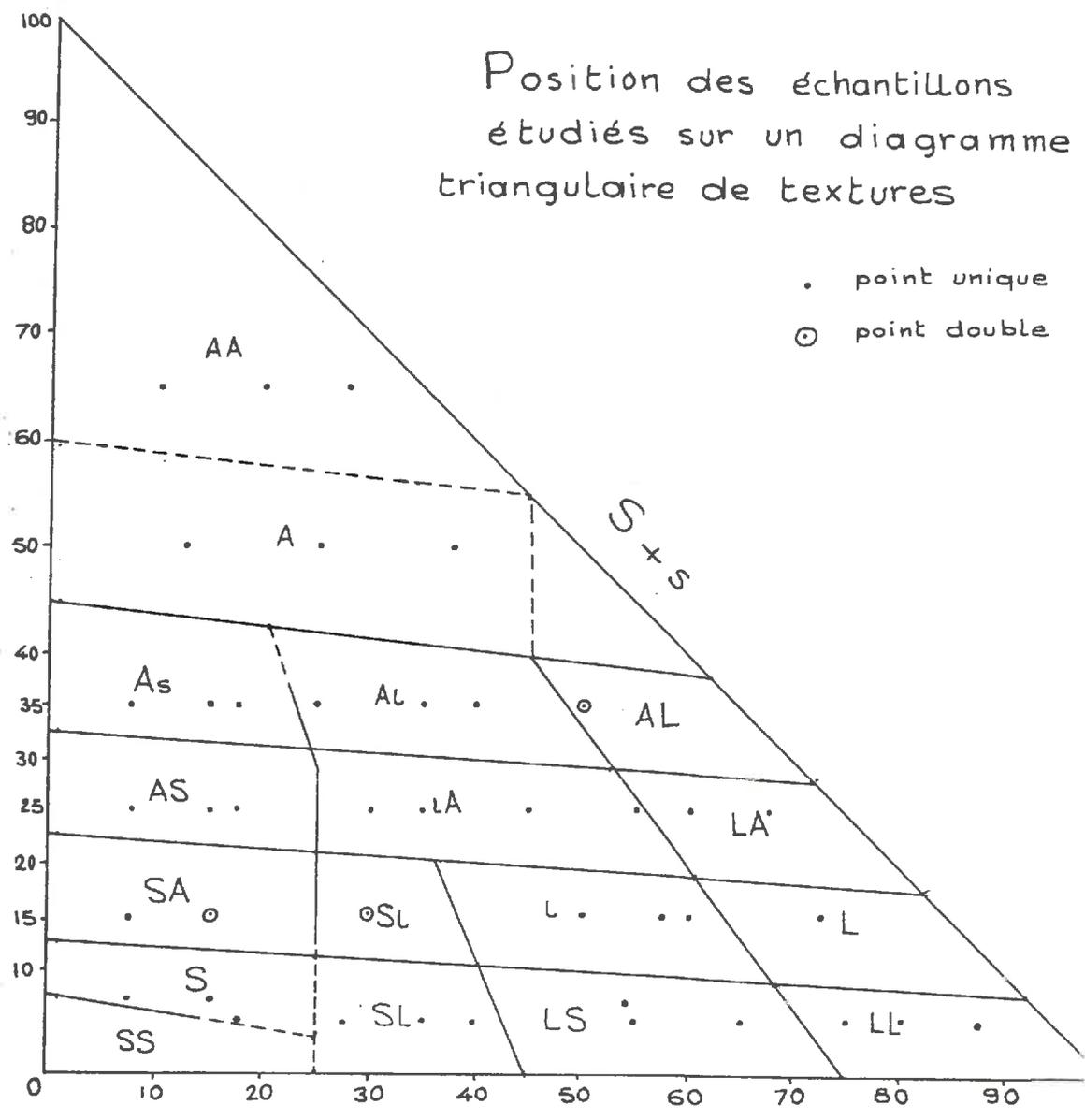
C'est pourquoi nous nous proposons d'étudier la stabilité d'échantillons plus complexes, mais autorisant des essais d'interprétation. Cette exigence nous a conduit à choisir les échantillons, dans lesquels le nombre des fractions ne dépasse pas trois ou quatre.

Pour choisir les textures de ces échantillons, nous nous sommes basés à priori sur le diagramme de texture de Betremieux (1963). Ce diagramme triangulaire comprend des divisions et des subdivisions texturales, établies d'après les impressions de terrain des prospecteurs pédologues. Le choix a été fait de telle sorte que chaque classe texturale soit représentée par au moins deux et, au plus quatre échantillons. Les textures retenues sont présentées dans le diagramme N° 6.

argile

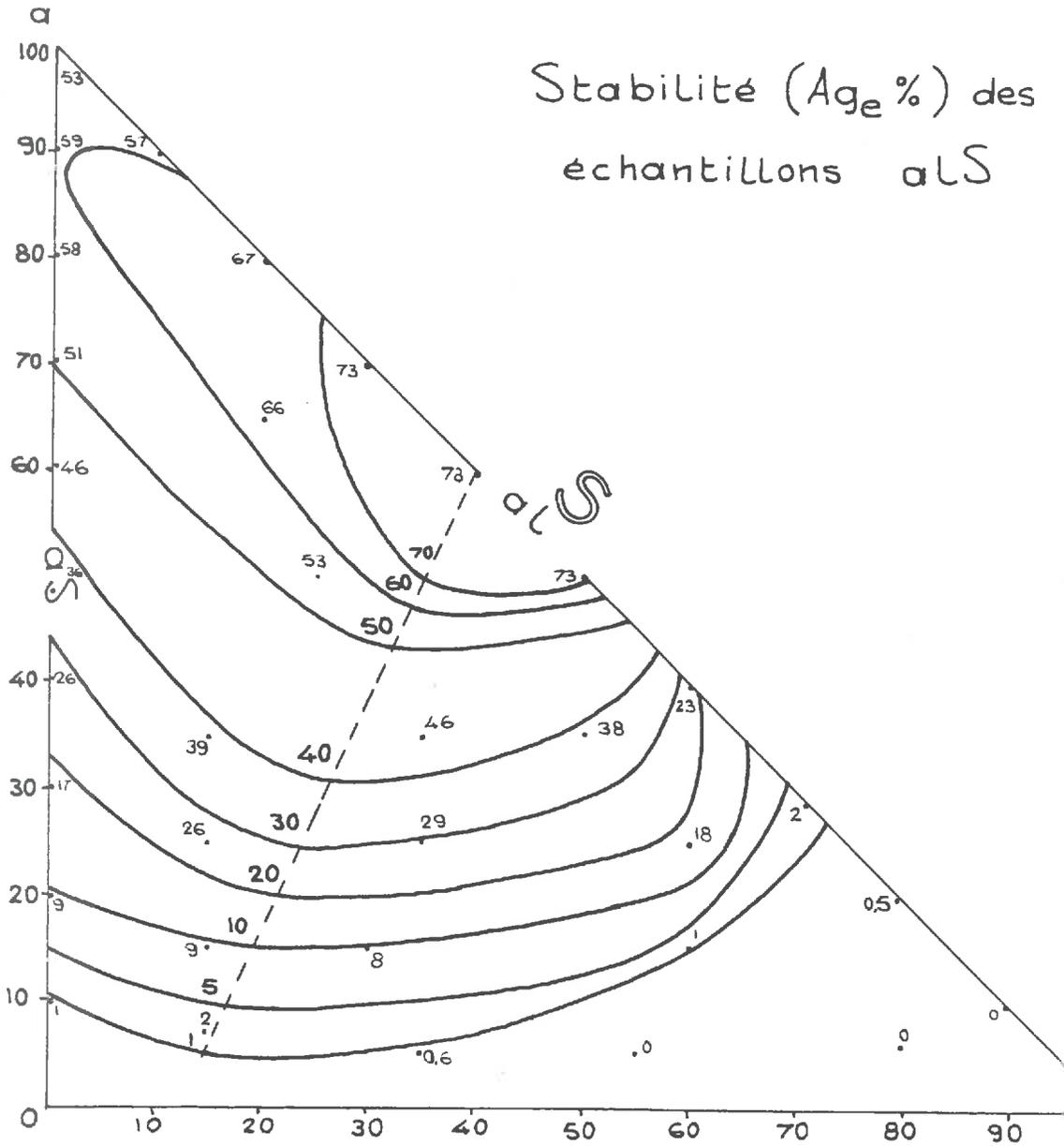
n° 6

# Position des échantillons étudiés sur un diagramme triangulaire de textures



n° 7

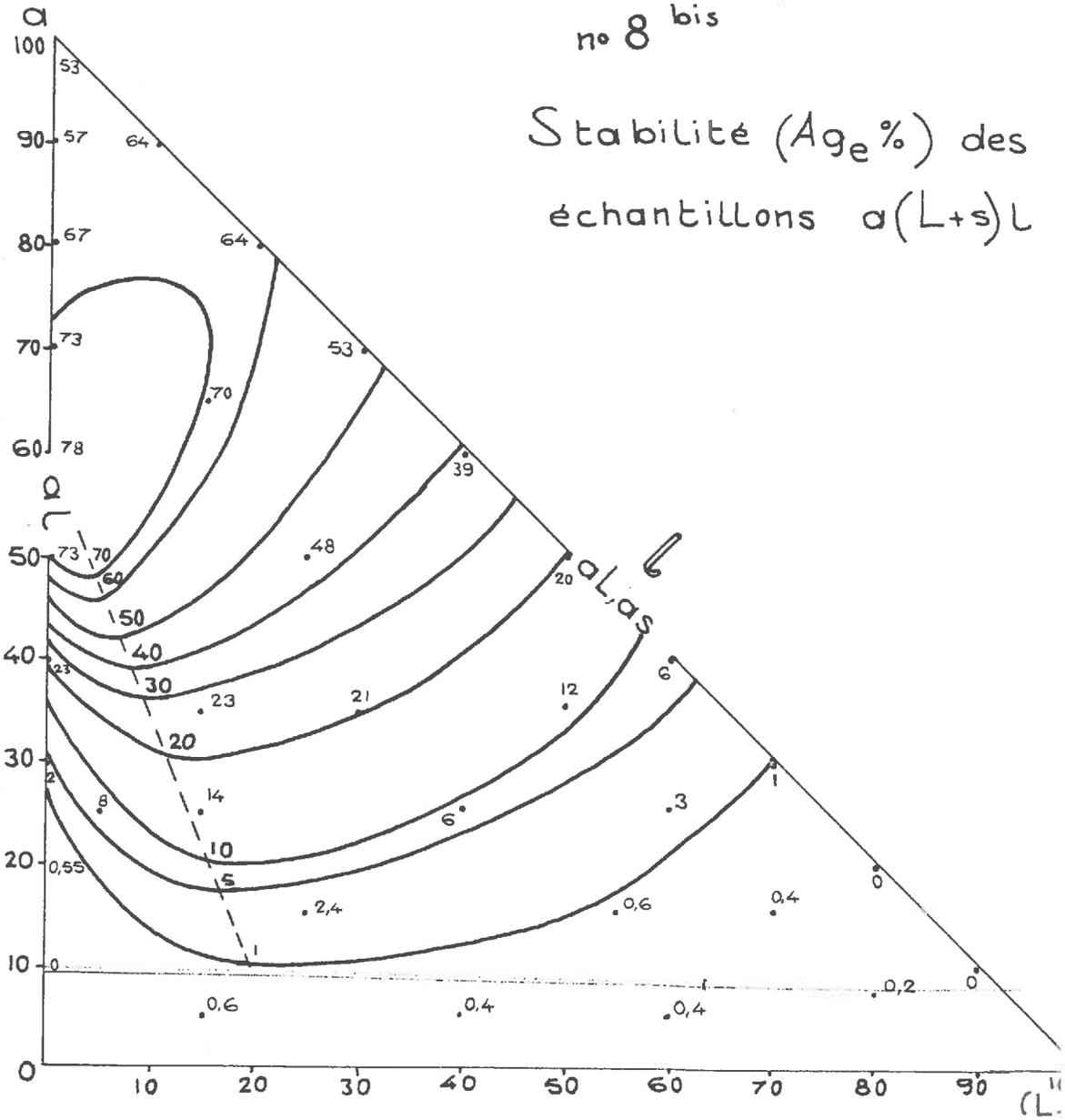
Stabilité ( $A_{ge}$  %) des  
échantillons aLS





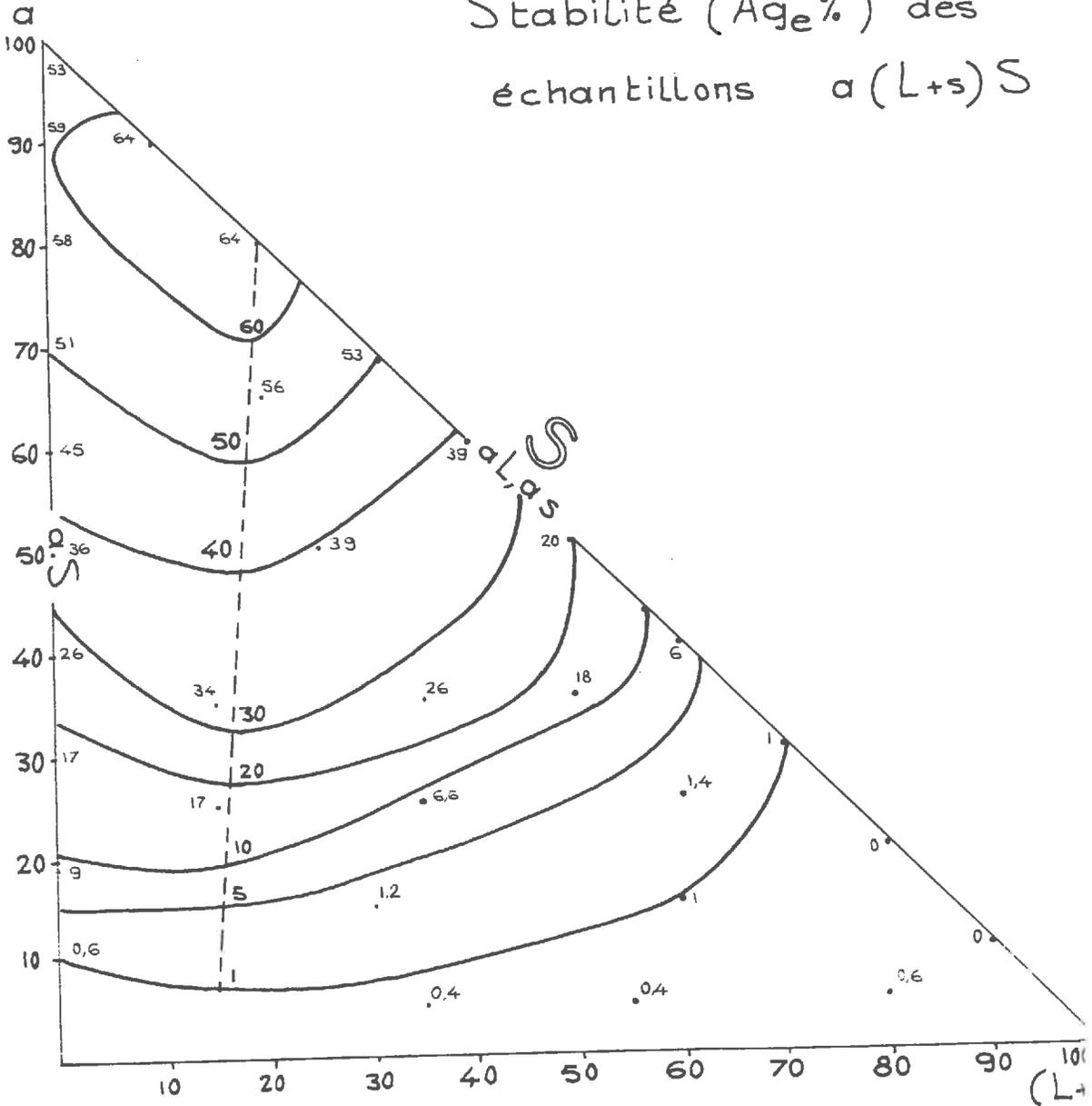
no 8 bis

Stabilité ( $A_{ge}\%$ ) des  
échantillons  $a(L+s)L$



n° 9

Stabilité (Age%) des échantillons a(L+s)S



Ainsi, nous nous sommes assuré de couvrir toute la gamme des textures qui ont servi de base, à l'établissement du diagramme et de ses subdivisions.

Nous avons retenu sept taux d'argile : 5 %, 7 , 15 , 25 , 35 , 50 et 65 % . En effet, les échantillons présentant ces teneurs en argile se situent tous suffisamment loin des limites des divisions texturales basées sur la teneur en argile.

Un nombre assez important des échantillons a une teneur en argile inférieure ou égale à 35 % , ce qui coïncide avec la partie la plus subdivisée du diagramme. On sait d'autre part que la plupart des sols cultivés ont une teneur en argile comprise dans cette gamme, c'est-à-dire entre 5 et 35 %.

Quant au choix de la nature des fractions associées à l'argile et de leur teneur relative, nous avons tenté, dans la mesure du possible, d'éviter une complexité excessive qui rendrait malaisée l'interprétation des résultats. C'est pourquoi nous avons tout d'abord considéré le mélange de (L.g. 50 % + s.f. 50 %) comme une seule fraction granulométrique, en tenant compte du comportement presque identique de ces deux classes de particules, vis à vis du test de stabilité dans les échantillons binaires (sable fin de Atterberg).

D'autre part, bien que nous soyons guidé, en général, dans le choix de la nature et de la teneur des fractions, par les divisions texturales, dans le souci de faciliter les comparaisons, nous avons reconstitué les séries d'échantillons suivants : a 1 S (que nous appellerons la série des échantillons ternaires), a 1 (L + s) et a(L + s)S(que nous désignerons par le terme de série des échantillons quaternaires).

Comme nous l'avions dit, pour chaque série, nous avons retenu 7 taux d'argile. Le l.f. et le (L+s) peuvent avoir, selon le cas, les teneurs de 15, 30, 35, 55, 60 et 80 %.

Dans chaque série, on peut étudier, pour une teneur donnée en argile, l'influence de fractions complémentaires à des taux divers. Par exemple, on peut comparer le mélange  $a_{15} l_{15} S_{70}$  avec  $a_{15} l_{30} S_{55}$  pour étudier l'influence sur la stabilité, du remplacement de l.f. par le S.g. De même, en passant d'une série à l'autre, on peut étudier, pour une teneur donnée en argile l'influence du remplacement total d'une fraction complémentaire par une autre fraction. On peut par exemple comparer les mélanges  $a_{35} l_{15} S_{50}$  et  $a_{35} (L+s)_{15} S_{50}$  où 15 % de l.f. sont remplacés par (L+s).

A l'intérieur de chaque série, nous avons aussi la possibilité d'étudier le remplacement d'une partie du squelette par de l'argile. Par exemple, la comparaison de  $a_{15} l_{15} S_{70}$  avec  $a_{25} l_{15} S_{60}$  où 10 % de S.g. ont été remplacés par de l'argile.

Nous avons testé la stabilité des échantillons sans et avec les prétraitements.

## II.- RESULTATS.

Nous allons, d'abord, examiner les résultats obtenus sans prétraitement (action directe d'eau) qui, comme nous l'avons dit, sont les plus directs et les plus faciles à interpréter pour les sols non organiques.

Signalons qu'au cours de l'étude des échantillons binaires, nous avons constaté que la stabilité, dans chaque série, apparaît à des teneurs en argile bien déterminées. Nous avons interprété cette apparition de stabilité en tenant compte de l'importance de la phase argileuse et de la différenciation des phases, etc. Nous avons procédé de même pour les échantillons ternaires et quaternaires.

1°) Apparition de la stabilité.

Nous avons constaté que le teneur en argile nécessaire pour l'apparition de stabilité dans les échantillons ternaires et quaternaires dépend, d'une part, de la nature des deux ou trois fractions associées à l'argile, et, d'autre part, de leurs teneurs relatives.

Examinons d'abord le teneur minimum en argile qui, indépendamment des teneurs relatives des fractions dans chaque série, est toujours suffisante pour que la stabilité apparaisse ( $Age = 2$ ). Ces teneurs sont les suivantes :

pour la série a l S	supérieure à 15 %
pour la série a l (L+s)	égale à 25 %
pour la série a (L+s) S	supérieure à 25 %.

on constate que, si l'on remplace (L+s), totalement par le l.f. et S.g. la stabilité apparaît pour les teneurs en argile beaucoup plus faibles. On peut en déduire que dans les échantillons à trois ou quatre fractions (L+s) est moins favorable que le l.f. ou S.g. Toutefois, si nous comparons la série quaternaire a l (L+s) avec les séries binaires correspondantes, c'est-à-dire al, aL et as, nous constatons que la présence de (L+s) a favorisé l'apparition de stabilité. Rappelons, en effet, que dans les échantillons binaires la stabilité apparaissait ( $Age = 2$ ) pour les teneurs en argile suivantes :

a = 30 %	dans la série	al
a > 30 %	"	aL et as
a > 10 %	"	aS

On voit que, excepté dans la série aS, l'apparition de stabilité n'a jamais eu lieu pour les teneurs en argile inférieures à 30 %, dans les séries binaires, tandis que dans la série quaternaire al (L+s), elle apparaît pour 25 % d'argile.

Cette constatation nous conduit à penser que, seul un arrangement plus favorable des particules peut être responsable de l'augmentation de stabilité dans la série a1 (L+s). En effet, lorsqu'on passe de aL et as à a1 et puis à a1 (L+1), on augmente la gamme de variations de diamètre des particules associées à l'argile. Ainsi, on rend possible un arrangement de plus en plus serré et corollairement une répartition de ciment argileux de plus en plus favorable.

Enfin, on constate qu'en présence de S.g. l'apparition de stabilité dans les séries ternaires et quaternaires dépend ~~largement~~ **des autres** fractions complémentaires, puisque la stabilité en présence de l.f. apparaît pour les teneurs en argile supérieures à 15 %, et en présence de (L+s), elle apparaît pour les teneurs en argile supérieures à 25 %. D'autre **part**, l'observation des agrégats stables montre que les S.g. interviennent directement dans la différenciation des phases. Une phase comprend toujours les S.g. et l'autre phase comprend les fractions complémentaires qui sont associées à l'argile. Nous **r**appellerons cette dernière phase la "phase résiduelle" et nous parlerons, plus en détail, de son rôle dans la stabilité.

Examinons maintenant pour chaque série la teneur minima en argile, qui, grâce à des teneurs relatives favorables des fractions complémentaires, est suffisante pour apparition de la stabilité. Ces teneurs sont les suivantes :

- a = 7 % pour la série a l S
- a = 15 % pour la série a l (L+1)
- a = 15 % pour la série a1 (L+1) S

En comparant les séries d'échantillons ternaires et quaternaires entre elles, on constate toujours que, même dans les meilleures conditions, si l'on remplace totalement (L+s) par l.f. et S.g. la stabilité apparaît pour les teneurs en argile plus faibles.

Toutefois, la présence de (L+A), à un taux optimum, favorise considérablement l'apparition de stabilité dans les mélanges quaternaires, par comparaison avec les mélanges binaires correspondants. On voit que, si pour les séries binaires aL et aS, la stabilité apparaît pour les teneurs en argile égales ou supérieures à 30 %, elle peut apparaître dans certain échantillon aL (L+s) pour une teneur de 15 %. Autrement dit, l'influence de mode d'arrangement des fractions associées à l'argile dans des échantillons favorables peut remplacer l'action de 15 % d'argile, et même plus, telle qu'elle se manifesterait, dans des arrangements moins bien organisés.

Si on compare, maintenant, pour chaque série, les teneurs en argile correspondant à l'apparition de stabilité d'une part indépendamment de teneurs relatives des fractions, et d'autre part, en fonction de celles-ci, on trouve une différence de l'ordre de 10 %. C'est-à-dire que l'influence de l'arrangement des particules associées à l'argile est équivalente à l'action de 10 % d'argile, dans chaque série des échantillons ternaires et quaternaires.

Enfin, on voit aussi qu'en présence de S.g. l'apparition de stabilité est influencée par la qualité de la phase résiduelle. Cette influence est telle que, dans la série aLS, la stabilité apparaît pour les teneurs en argile plus faibles que dans la série a(L+s)S et, même plus faible que les séries binaires correspondantes (aS et aL).

Maintenant, si on prend en considération l'action des prétraitements divers en ce qui concerne la teneur en argile correspondant à l'apparition de stabilité ( $Ag_0$  ou  $Ag_d = 2\%$ ) comme les tableaux N° 18 et 19 le montrent, les résultats sont en accord avec ceux que nous venons de décrire au sujet de l'apparition de stabilité sans prétraitement (action directe d'eau).

Tableau N° 18

Teneurs en argile correspondant à l'apparition de stabilité <sup>qualité avec l'essai</sup> indépendamment des proportions des fractions complémentaires.

prétraitement Textures	Air	Alcool	Dioxane
1 S	> 15	15	≥ 5
1 (L+S)	25	25	> 15
(L+S)S	> 25	25	25

Tableau N° 19

Teneurs en argile correspondant à l'apparition de stabilité en fonction des proportions des fonctions complémentaires.

Prétraitement Textures	Air	Alcool	Dioxane
a 1 S	a = 7 S ≥ 78	a = 5 S ≥ 40	a = 5
a1 (L+S)	a = 15 1 ≥ 60	a = 15 1 ≥ 50	a = 5 1 ≥ 55
a (L+S)S	a = 15 S > 60	a = 15 S ≥ 55	a = 15 S ≥ 50

On y voit évidemment des nuances et certains décalages systématiques qui sont dûs à l'action plus protectrice des prétraitements.

## 2°) Variations de la stabilité.

Examinons maintenant les variations de stabilité des échantillons ternaires et quaternaires sans prétraitement :

On constate d'abord que pour les teneurs en argile inférieures à 7 %, quelles que soient les fractions associées, la stabilité est nulle. Au contraire, pour les teneurs en argile supérieures à 25 % on peut toujours noter, même pour les arrangements les moins favorables une stabilité minima ( $A_{g_e} = 2 \%$ ).

Quant à l'action des fractions associées, elle se manifeste d'autant plus que la teneur en argile est plus faible. Comme nous l'avons vu, cette influence, dans une gamme de teneur en argile de 7 à 25 est absolument décisive dans l'apparition de stabilité.

Si nous comparons maintenant l'influence de chaque fraction dans chacune des séries, comme le tableau N° 20 le montre, on constate d'abord que, pour une teneur donnée en argile, la stabilité augmente, au fur et à mesure que le l.f. remplace le (L+s).

Quant au S.g., son rôle dans la stabilité pour les teneurs en argile inférieures à 40 %, est, en relation étroite avec la différenciation des phases et avec l'importance et les caractéristiques propres de la phase résiduelle. Toutefois, on peut considérer qu'en général, pour les teneurs en argile inférieures ou égales à 50 %, la stabilité augmente au fur et à mesure que le S.g. remplace le l.f. ou le (L+s). Le phénomène est toujours inverse pour les teneurs en argile supérieures à 50 %.

Tableau N° 20

Influence sur Age % du remplacement de  
1 ou de S par (L+s)

Fractions complémentaires	a %		5	7	15	25	35	50	65
	↗	↘							
l <sub>15</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{S}{(L+s)}$	↘	-	2	9	26	39	-	66
			-	0	0	3	12	-	70
l <sub>30</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{S}{(L+s)}$	↘	-	-	8	-	-	53	-
			-	-	0	-	-	48	-
l <sub>35</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{S}{(L+s)}$	↘	1	-	-	29	46	-	-
			-	-	-	6	21	-	-
l <sub>50</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{S}{(L+s)}$	↘	-	-	-	-	38	-	-
			-	-	-	-	23	-	-
l <sub>55</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{S}{(L+s)}$	↘	0	-	-	-	-	-	-
			0	-	-	-	-	-	-
l <sub>60</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{S}{(L+s)}$	↘	-	-	1	18	-	-	-
			-	-	0	14	-	-	-
l <sub>80</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{S}{(L+s)}$	↘	0	-	-	-	-	-	-
			0	-	-	-	-	-	-
s <sub>15</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	-	-	-	18	38	-	66
			-	-	-	1	18	-	56
s <sub>25</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	-	-	1	-	-	53	-
			-	-	0	-	-	39	-
s <sub>30</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	-	-	-	-	46	-	-
			-	-	-	-	26	-	-
s <sub>40</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	0	-	-	29	-	-	-
			0	-	-	7	-	-	-
s <sub>50</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	-	-	-	-	39	-	-
			-	-	-	-	34	-	-
s <sub>55</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	-	-	8	-	-	-	-
			-	-	0	-	-	-	-
s <sub>60</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	0	-	-	26	-	-	-
			0	-	-	17	-	-	-
s <sub>70</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	-	-	9	-	-	-	-
			-	-	5	-	-	-	-
s <sub>80</sub> <sup>+</sup> ou	↗ $\frac{1}{(L+s)}$	↘	-	2	-	-	-	-	-
			-	-	-	-	-	-	-

L'examen de l'action des prétraitements nous conduit aux mêmes résultats, mais, bien entendu, avec certaines nuances.

On voit que tous les aspects de la stabilité des mélanges ternaires et quaternaires peuvent s'expliquer, par l'arrangement des particules associées à l'argile, et par la différenciation des phases.

Toutefois, certains aspects de ce dernier mécanisme, et aussi son importance, sont différents de ceux que nous avons précisé au sujet des échantillons binaires. En effet, si dans les échantillons binaires, la phase résiduelle était toujours l'argile pure, au contraire, dans les échantillons complexes, cette phase est constituée par l'association à l'argile d'une ou deux fractions complémentaires l.f. ou le (L+s). C'est pourquoi, comme nous l'avons dit, dans deux échantillons ayant les mêmes teneurs en argile et les mêmes teneurs en S.g. la stabilité sera fonction des fractions (qualité et quantité), qui dans la phase résiduelle sont associées à l'argile.

D'autre part, la plupart des échantillons ternaires et quaternaires ont une teneur en argile inférieure à 40 %, et par là, le phénomène de différenciation des phases devient plus marqué.

Enfin, son action, pour les teneurs en argile inférieures à 40 %, en général, comme conséquence une augmentation de stabilité vis à vis de l'action directe de l'eau. Comme la plupart des sols cultivés ont des teneurs en argile comprises dans cette gamme, on peut voir l'intérêt pratique des conséquences qu'il entraîne.

Ce sont les raisons qui nous conduisent à reprendre, plus en détail, l'étude de la différenciation des phases.

### III.- DIFFERENCIATION DES PHASES DES ECHANTILLONS COMPLEXES.

Le mécanisme de la différenciation des phases et les causes qui interviennent dans le phénomène, sont ceux que nous avons décrit au sujet des échantillons binaires. Toutefois, il y a des cas où, surtout avec les prétraitements de plus en plus protecteurs, la différenciation des phases n'est pas totalement réalisée, et elle paraît moins intense que dans le cas des échantillons binaires. On peut alors, distinguer, à la loupe binoculaire une troisième phase dite intermédiaire. Dans cette phase, les agrégats stables contiennent des S.g. (les S.g. ne sont pas totalement libérés de l'agrégat). La formation de cette phase intermédiaire, est de plus en plus visible, à mesure que, toutes choses égales par ailleurs, d'une part la teneur en argile et la teneur en l.f. augmente, d'autre part, la teneur en S.g. et en (L+s) diminue.

Le fait que l'intensité de différenciation des phases soit moins grande dans les échantillons complexes, que dans les échantillons binaires, paraît normal. En effet, dans la série aS l'argile pure a toujours tendance à se désagréger sous l'influence de fissuration. Cette cause n'intervient presque pas pour les échantillons ternaires et quaternaires.

Toutefois l'influence de la phase intermédiaire pour les teneurs en argile inférieures à 40 % et surtout dans le test sans prétraitement est pratiquement négligeable, et c'est la phase résiduelle qui commande la stabilité. A cet égard le tableau N° 21 montre dans quelle mesure le taux d'agrégat stable varie en fonction de modifications, même minimales, de la composition de la phase résiduelle.

On voit, d'après les résultats du test et l'observation directe, que l'influence et l'importance de la phase résiduelle reste incontestable. Pour la préciser, nous avons supposé, comme

Tableau N° 21

Influence de la phase résiduelle  
sur la stabilité.

a %	Fraction complémentaire		Age	Age
7	$l_{15}$	S	2	2
	$(L+s)_{15}$	S	1	2
	0	S	0	0
15	$l_{15}$	S	9	14
	$(L+s)_{15}$	S	5	6
	0	S	5	6
25	$l_{15}$	S	26	30
	$(L+s)$	S	17	22
	0	S	13	17
35	$l_{15}$	S	39	43
	$(L+s)$	S	34	37
	0	S	22	28

pour les mélanges binaires, qu'en présence de S.g., la phase résiduelle se comporte vis-à-vis du test de stabilité, comme si les S.g. ne s'associaient pas aux autres constituants. La vérification de cette hypothèse exige l'appréciation de la stabilité propre de la phase résiduelle. Dans ce but, nous avons fait le calcul du taux d'agrégat stable de la phase résiduelle, à partir de taux d'agrégat mesuré pour les échantillons binaires. Citons deux exemples :

- Calcul du taux d'agrégats stables pour l'échantillon ternaire  $a_{15} l_{15} S_{70}$  :

Dans ce mélange, la phase résiduelle est " $a_{15} l_{15} \dots$ ", et son équivalent, parmi les échantillons binaires est  $a_{50} l_{50}$ . Le taux d'agrégat stable mesuré pour  $a_{50} l_{50}$ , sans prétraitement est égal à 73 %. Nous faisons ensuite une correction pour rapporter 100 % (échantillon binaire  $a_{50} l_{50}$ ) à 30 % (la phase résiduelle  $a_{15} l_{15} \dots$ ). Ainsi nous obtenons le taux d'agrégat stable calculé, de 22, pour l'échantillon  $a_{15} l_{15} S_{70}$ .

- Calcul du taux d'agrégats stables pour l'échantillon quaternaire  $a_{15} (L+s)_{15} S_{70}$  :

En présence de fraction (L+s), nous avons fait le calcul de taux d'agrégat stable, comme s'il n'y avait que le L.g. ou que le s.f. dans la phase résiduelle. En effet, nous devons nous référer aux résultats de taux d'agrégat d'échantillons binaires  $a_L$  et  $a_s$ . C'est pourquoi, dans l'échantillon ci-dessus, par exemple, nous faisons le calcul de taux d'agrégat stable ~~comme si~~ nous étions en présence de l'échantillon  $a_{15} L_{15} S_{70}$  ou  $a_{15} s_{15} S_{70}$  et ensuite nous faisons une moyenne de résultats :

Dans l'échantillon  $a_{15} L_{15} S_{70}$  la phase résiduelle est " $a_{15} L_{15} \dots$ " et son équivalent parmi les mélanges binaires est  $a_{50} L_{50}$ . La phase résiduelle pour  $a_{15} s_{15} S_{70}$  est " $a_{15} s_{15} \dots$ " et son équivalent est  $a_{50} s_{50}$ . Taux d'agrégats stables à l'eau, pour  $a_{50} L_{50}$  est égal à 15 % et pour  $a_s$  est 25 %. Nous faisons

le calcul de taux d'agrégat dans la phase résiduelle à partir de 15 % et 25 % et, ensuite, nous faisons une moyenne  $(\frac{4,5+7,5}{2} = 6)$ .

Nous obtenons le taux d'agrégat calculé, de 6 % pour l'échantillon quaternaire  $a_{15} (L+s)_{15} S_{70}$ .

Ainsi, nous avons apprécié le taux d'agrégat stable que présenterait théoriquement la phase résiduelle en l'absence de S.g. Nous avons rassemblé les taux d'agrégats stables mesurés et calculés, pour tous échantillons sableux ternaires et quaternaires, avec et sans prétraitement; dans le tableau N° 22. On constate qu'en général, l'accord entre deux séries de résultats est satisfaisant. En particulier l'allure des variations de deux taux d'agrégats mesurés et calculés est la même. Ceci confirme dans ses grandes lignes l'hypothèse que nous avons émise concernant l'influence sur la stabilité de la phase résiduelle, la phase résiduelle influence la stabilité.

.../...

Tableau N° 22

Comparaison des taux d'agrégats stables  
calculés et mesurés dans  
les échantillons à 3 ou 4 fractions.

Désignation de textures	P r é t r a i t e m e n t					
	A i r		A l c o o l		D i o x a n e	
	mesurés	calculés	mesurés	calculés	mesurés	calculés
a <sub>5</sub> l <sub>35</sub> s <sub>60</sub>	0	0	0	3	1	16
" (L+s) <sub>35</sub> "	0	0	0	0	1	1
a <sub>5</sub> l <sub>55</sub> s <sub>40</sub>	0	0	0	0	1	16
" (L+s) "	0	0	0	0	0	0
a <sub>5</sub> l <sub>80</sub> s <sub>15</sub>	0	0	0	0	4	18
" (L+s) <sub>80</sub> "	0	0	0	0	0	0
a <sub>7</sub> l <sub>15</sub> s <sub>78</sub>	2	2	2	12	3	15
" (L+s) "	0	0	2	3	1	4
a <sub>15</sub> l <sub>15</sub> s <sub>70</sub>	9	22	14	24	16	26
" (L+s) <sub>15</sub> "	5	5	6	15	10	17
a <sub>15</sub> l <sub>30</sub> s <sub>55</sub>	8	4	19	20	22	31
" (L+s) <sub>30</sub> "	1	1	2	7	3	9
a <sub>15</sub> l <sub>60</sub> s <sub>25</sub>	1	0	15	20	29	40
" (L+s) <sub>60</sub> "	1	0	1	1	1	3

Tableau N° 22 (suite)

Désignation de textures	P r é t r a i t e m e n t					
	A i r		A l c o o l		D i o x a n e	
	mesurés	calculés	mesurés	calculés	mesurés	calculés
a <sub>25</sub> l <sub>15</sub> S <sub>60</sub>	26	31	30	34	30	36
" (L+s) <sub>15</sub> "	17	17	22	25	23	28
a <sub>25</sub> l <sub>35</sub> S <sub>40</sub>	29	20	42	42	43	48
" (L+s) <sub>35</sub> "	7	5	22	22	18	25
a <sub>25</sub> l <sub>60</sub> S <sub>15</sub>	18	2	40	41	51	55
" (L+s) <sub>60</sub> "	2	1	4	6	5	8
a <sub>35</sub> l <sub>15</sub> S <sub>50</sub>	39	37	43	42	43	44
" (L+s) <sub>15</sub> "	34	27	37	36	38	40
a <sub>35</sub> l <sub>35</sub> S <sub>30</sub>	46	51	54	56	61	60
" (L+s) <sub>35</sub> "	26	15	41	35	44	39
a <sub>35</sub> l <sub>50</sub> S <sub>15</sub>	38	24	55	59	65	67
" (L+s) <sub>50</sub> "	18	6	33	29	37	34
a <sub>50</sub> l <sub>25</sub> S <sub>25</sub>	53	57	60	63	59	66
" (L+s) <sub>25</sub> "	39	34	57	49	55	56
a <sub>65</sub> l <sub>20</sub> S <sub>15</sub>	66	60	70	71	71	76
" (L+s) <sub>20</sub> "	56	51	66	66	-	71

Toutefois, les taux d'agrégats stables calculés ne coïncident pas toujours avec les taux mesurés. Les premiers sont parfois supérieurs, parfois inférieurs aux seconds. Pour les échantillons où le taux d'agrégat mesuré est inférieur au taux calculé, on peut attribuer, normalement, la différence au mécanisme déjà décrit (mélanges binaires, page 42 & 43). Mais dans les cas inverses, l'explication est plus difficile. Pour la chercher, nous avons pris, d'abord, en considération le taux d'agrégat stable à l'eau, mesuré et calculé dans la série ternaire a l S . Le choix du taux d'Ag<sub>e</sub> a permis d'éviter toutes les erreurs probables découlant de la formation de la phase intermédiaire, qui intervient, dans une certaine mesure, dans les tests avec prétraitements, diminuant ainsi la précision des comparaisons. D'autre part, en choisissant la série a l S nous avons évité, également, les erreurs probables dues au mode de calcul de taux d'agrégat stable en présence de L et s (voir p. 86 ).

Nous avons calculé la teneur en argile dans la phase résiduelle de la série a l S , et nous avons rassemblé dans le tableau N° 23 les taux d'agrégats mesurés et calculés, en fonction des teneurs en argile croissantes de la phase résiduelle.

.../..

Tableau N° 23

Comparaison des taux d'agrégats stables mesurés et calculés en rapport avec la teneur en argile de la phase résiduelle - dans la série a l, S.

Texture	Argile % dans la phase résiduelle.	Taux d'argile stable à l'air	
		Mesuré	Calculé
a <sub>5</sub> l <sub>35</sub> S <sub>60</sub>	12,5	0	0
a <sub>15</sub> l <sub>60</sub> S <sub>25</sub>	20	1	0
a <sub>25</sub> l <sub>60</sub> S <sub>15</sub>	30	18	2
a <sub>7</sub> l <sub>15</sub> S <sub>78</sub>	32	2	1
a <sub>15</sub> l <sub>30</sub> S <sub>55</sub>	33	8	4
a <sub>35</sub> l <sub>50</sub> S <sub>15</sub>	41	38	24
a <sub>25</sub> l <sub>35</sub> S <sub>40</sub>	42	29	20
a <sub>15</sub> l <sub>15</sub> S <sub>70</sub>	50	9	22
a <sub>35</sub> l <sub>35</sub> S <sub>30</sub>	50	46	51
a <sub>25</sub> l <sub>15</sub> S <sub>60</sub>	60	26	31
a <sub>50</sub> l <sub>25</sub> S <sub>25</sub>	66,5	53	57
a <sub>35</sub> l <sub>15</sub> S <sub>50</sub>	70	39	37
a <sub>65</sub> l <sub>20</sub> S <sub>15</sub>	76,5	66	60

On constate que dans tous les échantillons où l'argile n'est pas présente en quantité suffisante pour créer une continuité dans la phase résiduelle, les taux d'agrégat stable mesurés sont nettement supérieurs aux taux d'agrégats calculés. Cela est inverse pour les teneurs en argile où le ciment est toujours continu (argile supérieur à 42 % dans le tableau) dans la phase résiduelle

La conclusion principale de ceci est que quand il y a trop peu d'argile, dans la phase résiduelle, pour remplir tous les vides; l'action de la différenciation des phases accroit, non seulement le taux global d'agrégat stable, mais elle accroit aussi le taux d'agrégat correspondant à la phase résiduelle. Au contraire, à partir du moment où le ciment argileux devient continu dans la phase résiduelle, bien que la différenciation des phases augmente toujours le taux global d'agrégat de l'échantillon, elle diminue la stabilité propre à la phase résiduelle. Autrement dit, la forme et la dimension des fragments de la phase résiduelle, qui dépendent de l'arrangement avec les S.g., interviennent tantôt pour augmenter le taux d'agrégat stable, tantôt pour le diminuer, selon que l'argile est disposée de façon discontinue ou continue, dans la phase résiduelle.

Dans un deuxième temps, nous avons cherché, dans quelle mesure on peut adopter ces règles à la série a (L+s)S :

Nous avons rassemblé dans le tableau N° 24 les résultats des taux d'agrégat stable mesurés et calculés, sans prétraitement, en fonction de teneur en argile dans la phase résiduelle :

" a (L+s) .. ".

Tableau N° 24

Comparaison des taux d'agrégats stables mesurés et calculés en rapport avec la teneur en argile de la phase résiduelle dans la série a (L+s)S .

Texture	a % dans la phase résiduelle	Taux à l'air	
		mesuré	calculé
a <sub>5</sub> (L+s) <sub>35</sub> S <sub>60</sub>	12,5	0	0
a <sub>15</sub> (L+s) <sub>60</sub> S <sub>25</sub>	20	1	0
a <sub>25</sub> (L+s) <sub>60</sub> S <sub>15</sub>	30	2	1
a <sub>7</sub> (L+s) <sub>15</sub> S <sub>78</sub>	32	0	0
a <sub>15</sub> (L+s) <sub>30</sub> S <sub>55</sub>	33	1	1
a <sub>35</sub> (L+s) <sub>50</sub> S <sub>15</sub>	41	18	6
a <sub>25</sub> (L+s) <sub>35</sub> S <sub>40</sub>	42	7	5
a <sub>15</sub> (L+s) <sub>15</sub> S <sub>70</sub>	50	5	5
a <sub>35</sub> (L+s) <sub>35</sub> S <sub>30</sub>	50	26	15
a <sub>25</sub> (L+s) <sub>15</sub> S <sub>60</sub>	60	17	17
a <sub>50</sub> (L+s) <sub>25</sub> S <sub>25</sub>	66,5	39	34
a <sub>35</sub> (L+s) <sub>15</sub> S <sub>50</sub>	70	34	27
a <sub>65</sub> (L+s) <sub>20</sub> S <sub>15</sub>	76,5	56	51

On constate que les taux d'agrégats stables mesurés sont toujours supérieurs aux taux calculés, même si l'argile est continue dans la phase résiduelle "a (L+s)..". Cela provient du fait que, dans cette série, les calculs de taux d'argent stable de la phase résiduelle "a (L+s)..", sont faits à partir des échantillons binaires  $a_L$  et  $a_s$ . Cela peut entraîner une baisse systématique de ces taux d'agrégats calculés, si on admet que, dans la phase résiduelle "a (L+s)..", il y a eu une augmentation relative de stabilité due à un arrangement plus favorable (dans la phase résiduelle la gamme de variation de diamètre des fractions associée à l'argile, est plus grande que celle de  $a_L$  et  $a_s$  pris séparément). Nous avons déjà montré à plusieurs occasions que la taille des particules associées à l'argile et la gamme de sa variation, peuvent intervenir dans leur arrangement plus ou moins serré, et par là, dans la stabilité structurale. L'augmentation relative de stabilité dans la phase résiduelle "a(L+1)..", est un argument de plus à cet égard.

On voit que l'arrangement des particules, et la continuité plus ou moins grande de la phase argileuse prend une importance, de plus en plus grande, dans l'étude de stabilité des sols.

o

o o

Nous avons déjà fait une comparaison des teneurs en argile, qui correspondent à l'apparition de la stabilité dans les séries binaires, d'une part, et dans les séries ternaires et quaternaires, d'autre part. Nous avons montré que ces teneurs sont beaucoup plus faibles dans certains échantillons ternaires et quaternaires que dans les séries binaires correspondantes.

Nous nous proposons maintenant une étude comparée des séries binaires et des séries complexes, en ce qui concerne les variations de stabilité. Le but de cette comparaison est, surtout, l'étude de variations de stabilité lorsqu'on passe des échantillons à deux fractions (binaires) aux échantillons complexes dans lesquels la gamme de variations de particules associées au ciment argileux se trouve élargie.

Pour effectuer une telle étude, nous allons, dans le chapitre IV prendre en considération les résultats de tous les échantillons des séries binaires, ternaires et quaternaires.

o  
o o

## C H A P I T R E    I V

### MECANISMES GENERAUX DE STABILITE.

#### I.- DEFINITION DES COURBES ISOSTABLES.

Pour avoir une vue d'ensemble des résultats de stabilité de tous les mélanges, nous avons cherché un mode de présentation convenable des résultats.

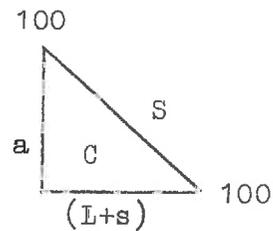
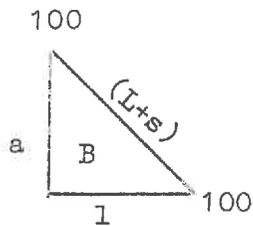
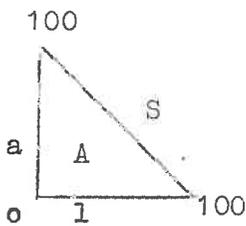
Nous n'avons pas pu utiliser le diagramme triangulaire de texture, à partir duquel nous avons choisi les échantillons ternaires et quaternaires. En effet, comme le tableau 25 en montre quelques exemples, les points représentatifs de certains sols, de stabilité différente, apparaissent superposés sur le diagramme. Cela provient du fait que, comme nous l'avons montré, les fractions complémentaires  $l$ ,  $(L+S)$ , et,  $S.g.$ ; montrent, chacune de leur part, un comportement particulier, vis-à-vis du test de stabilité. Pour éviter cet inconvénient, nous avons cherché un mode de présentation tel que chaque fraction élémentaire  $a$ ,  $l$ ,  $(L + s)$  et  $S$  soit prise en considération séparément. C'est pourquoi, nous avons eu recours à une série de diagrammes triangulaires correspondant aux différentes séries des échantillons. En continuant à confondre le  $L.g.$  +  $s.f.$

TABLEAU 25

Comparaison de la stabilité des échantillons qui sont représentés par un seul point dans la diagramme de texture classique

Désignation de textures	(L + l) %	(S + s) %	Taux d'ag.st. à l'eau
a - l S 15 30 55	30	55	8
a (L + s) S 15 60 25	"	"	1
a l S 15 15 70	15	70	9
a (L + s) S 15 30 55	"	"	1
a l S 35 50 15	50	15	38
a l (L + s) S 35 35 30	"	"	21

en une seule fraction granulométrique nous avons pu nous limiter aux trois types de diagrammes triangulaires de texture A, B et C : (graphiques 7, 8, 9).



Le diagramme A représente les séries a l , a S et a l S.

" " B " " " a l , a L et a s , a l (L+S).

" " C " " " a L et a s , a S , a (L+S) S.

Dans de tels diagrammes les points représentatifs des échantillons binaires se trouvent sur les côtés du triangle et les séries ternaires et quaternaires se situent à l'intérieur.

Nous désignerons chaque diagramme par le nom de la série complexe qu'il présente.

Dans un premier temps nous avons utilisé les  $Ag_e$  pour les raisons déjà données.

Nous avons établi les courbes reliant les points présentant la même stabilité. Ces courbes dites "isostables", ont été tracées correspondantes aux taux d' $Ag_e$  1, 5, 10, 20, etc... Ainsi, chaque diagramme s'est trouvé divisé en zones de stabilités différentes et en étudiant les courbes isostables, on a pu avoir une vue d'ensemble sur la stabilité des échantillons de toutes les séries :

- Dans chaque triangle pour une teneur donnée en argile, on peut étudier la variation de stabilité lorsqu'on passe des échantillons binaires aux échantillons ternaires ou quaternaires.

- En outre à l'intérieur de chaque triangle, on peut étudier, pour une teneur donnée en argile, la variation de stabilité en fonction des teneurs relatives des fractions complémentaires.

- Enfin, par comparaison des triangles, deux à deux, on peut étudier, pour une teneur donnée en argile, l'influence du remplacement total d'une fraction, par une autre.

C'est dans ces buts principaux que nous allons examiner l'allure des courbes isostables dans les diagrammes divers.

## II.- CARACTERISATION DES COURBES ISOSTABLES.

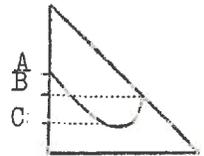
Pour étudier et interpréter ces courbes isostables nous avons utilisé les critères suivants :

### - Concavité des courbes isostables :

La concavité plus ou moins prononcée des courbes isostables traduit lorsqu'elle est tournée vers les taux d'argiles croissants l'augmentation relative de stabilité qui intervient lorsqu'on passe des échantillons binaires aux échantillons ternaires ou quaternaires.

Cette augmentation représente en quelque sorte, le "pouvoir stabilisateur" d'une fraction introduite au sein d'un échantillon binaire pour donner des échantillons complexes.

Nous avons exprimé cette concavité par la différence  $\frac{A + B}{2} - C$ ; A et B figurant les teneurs en argile des deux échantillons situés aux extrémités d'une courbe isostable.



C figurant la teneur en argile de l'échantillon le moins argileux situé sur la même courbe.

### - Pente des courbes isostables :

La pente d'une courbe isostable, dans une section donnée, traduit les variations de la stabilité dans cette section. On peut ainsi étudier l'influence de la nature et de la teneur relative des fractions associées à l'argile.

### - Distance moyenne des courbes isostables jusqu'à la base de triangles :

Pour une courbe isostable donnée dans deux diagrammes la distance moyenne jusqu'à la base de triangle est d'autant plus petite

que les fractions associées à l'argile sont plus favorables. En effet pour le même taux d'agrégats stables, la teneur en argile est plus faible dans le diagramme où la courbe isostable montre une distance moyenne plus petite.

- La ligne imaginaire qui joint les points minima des courbes isostables :

Dans chaque diagramme cette ligne représente la zone où les compositions granulométriques sont les plus favorables. C'est, en effet, pour les échantillons situés sur cette ligne que l'argile a une efficacité maxima.

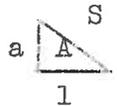
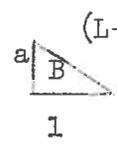
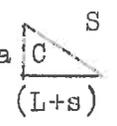
Nous allons, maintenant, étudier les variations de stabilité dans ces divers diagrammes :

On constate, d'abord, qu'indépendamment de la classe granulométrique des fractions associées à l'argile, les courbes isostables tournent dans tous les diagrammes, une concavité vers le haut. Prenons comme exemple les échantillons contenant 25 % d'argile et suivons les variations de taux d'agrégat stable sur les diagrammes. Les résultats rassemblés dans le tableau 26 montrent que la stabilité augmente lorsqu'on passe des mélanges à deux fractions aux mélanges à trois ou quatre fractions.

On constate, d'autre part, que dans tous les triangles pour les fortes teneurs en argile (supérieur à 60 %) et par suite de la fissuration des agrégats les courbes correspondant à la stabilité maximum, dans chaque diagramme, s'éloignent de la zone fortement argileuse.

TABLEAU 26

Variation de la stabilité en fonction du nombre et des proportions des fractions associées à l'argile

	mélanges binaires		mélanges ternaires et quaternaires				mélange binaire
	$a_{25} S_{75}$		$a_{25} L_{15} S_{60}$	$a_{25} L_{35} S_{40}$	$a_{25} L_{60} S_{15}$	$a_{25} L_{75}$	
Age	13		26	29	18	1	
	$a_{25} L_{75}$	$a_{25} S_{75}$	$a_{25} L_{15} (L+s)_{60}$	$a_{25} L_{35} (L+s)_{40}$	$a_{25} L_{60} (L+s)_{15}$	$a_{25} L_{75}$	
Age	0	1	3	9	14	8	
	$a_{25} S_{75}$		$a_{25} (L+s)_{15} S_{60}$	$a_{25} (L+s)_{35} S_{40}$	$a_{25} (L+s)_{60} S_{15}$	$a_{25} L_{75}$   $a_{25} S_{75}$	
Age	13		17	7	2	0   1	

Nous allons maintenant examiner quelle est l'influence des fractions diverses et de leur teneur relative dans l'allure des courbes isostables, en comparant les diagrammes de texture pris deux par deux.

III - INTERPRETATIONS

Comparaison de l'influence de s.g. et (L+s) :

La concavité des courbes isostables dans les deux diagramme a l S (graphique 7) et a l (L+s) (graphique 8) montre que, jusqu'à la courbe isostable 10 la concavité est plus forte dans le diagramme a l (L+s) que a l S. (Tableau N° 27).

TABLEAU 27

Concavité des courbes isostables dans les diagrammes a l S, a l (L+ )  
a (L+s) S

Diagramme Ag <sub>e</sub> % de texture	1	5*	10	20	30	40	50	60
a l S	13,5	14	13	15,5	18	18,5	15	22
a l (L+s)	18,5	17	19	13,5	12	13	15	16
a (L+s) S	13	11,5	13	14,5	17,5	19	10,5	13

Cela veut dire que le "pouvoir stabilisateur" de (L+s) dans la série a l (L+s) est supérieur à celui des S.g. dans la série a l S, et cela jusqu'à Ag<sub>e</sub>% = 10. Inversement cette valeur est plus grande pour le

---

\* Par exemple, pour une stabilité correspondant à Ag<sub>e</sub>% = 5, on constate que la concavité est beaucoup plus prononcée dans le cas de a l (L+s) (=17) que dans le cas a l S ou a (L+s) S. Ceci indique qu'à ce niveau la composition en fraction complémentaire des mélanges de type a l (L+s) est plus importante que dans le cas des deux autres séries.

S.g. que pour le (L+s) dans les courbes isostables supérieur à 10. Autrement dit, lorsqu'on part d'échantillon binaire a<sub>5</sub> l'introducton de l.f. augmente moins la stabilité que si on part d'échantillon a<sub>L</sub> ou a<sub>S</sub>.

La courbe isostable 10, dans le diagramme a l (L+s) se situe dans une zone où la teneur en argile est inférieure à 40 %. C'est pourquoi, l'action de l'arrangement et l'influence de fractions associées à l'argile, et de leurs teneurs relatives est plus marquée dans cette gamme où la phase du ciment argileux n'est pas toujours continue.

- Dans le triangle a l S les courbes isostables inférieures et égales à 50 sont plus proches de la base du triangle que celles du diagramme a l (L+s) et cela est inverse pour les couches isostables supérieures à 50. Comme les teneurs en argile correspondant aux courbes inférieures ou égales à 50 sont inférieures à 70 %, on peut en déduire que dans cette gamme pour une teneur donnée, en argile, et une teneur donnée en l.f, le s.g. est plus favorable pour la stabilité que le (L+s).

- Dans le diagramme a l S; les points minimum des courbes isostables se situent sur une ligne presque droite qui va de a<sub>5</sub> l<sub>15</sub> S<sub>80</sub> à a<sub>60</sub> l<sub>40</sub>. Dans le diagramme a l (L+s), cette ligne va de a<sub>10</sub> l<sub>70</sub> (L+s)<sub>20</sub> à a<sub>60</sub> l<sub>40</sub>. On voit que les échantillons les plus efficaces dans le diagramme a l S, ont de fortes teneurs en S.g. et que dans le diagramme a l (L+s) ils ont de faibles teneurs en (L+s).

- Dans le diagramme a l (L+s), lorsqu'on passe des échantillons binaires a l aux échantillons complexes, les courbes isostables inférieures et égales à 20 ont une pente beaucoup plus forte que celles des courbes correspondantes du diagramme a l S. Dans le diagramme a l (L+s) ces courbes sont même repliées sur elles-mêmes.

Cette allure des courbes traduit une augmentation remarquable de la stabilité dans les passages des échantillons à deux fractions aux échantillons à quatre fractions les plus proches. On peut y voir un grand pouvoir stabilisateur de fraction (L+s) lorsqu'elle est présente en petite quantité. En effet cette fraction peut s'associer à a l pour augmenter la stabilité d'une manière brutale et discontinue. De ce point de vue, l'action favorable de (L+s) est telle que son addition pour remplacer, poids pour poids, de l'argile, conduit au même taux d'agrégat stable, et même à un taux plus élevé : par exemple dans l'échantillon binaire a<sub>30</sub>l<sub>70</sub>, si on remplace 5 % argile par 5 % ( L+s) la stabilité augmente de 2 Age à 8 Age. Ce phénomène qui se manifeste d'ailleurs pour les teneurs en argile inférieures à 40 %, peut s'expliquer en faisant intervenir les possibilités accrues ainsi offertes pour un arrangement très serré de particules associées à l'argile. Dans le diagramme a l S, au contraire, les courbes ont une pente très faible. Il n'y a donc jamais augmentation brusque de stabilité en passant des échantillons a l ou a S à a l S.

- Dans les deux diagrammes pour les courbes isostables inférieures ou égales à 20 (teneurs en argile inférieures à 40 %), lorsqu'on passe de la série a l aux séries complexes, la stabilité augmente plus vite que si l'on passe des autres séries binaires (aL, as, ou aS) aux séries complexes. Cela est inverse pour les courbes isostables supérieures à 20 (teneur en argile supérieure à 40 %). On voit par là qu'à partir du niveau où la phase argileuse est continue, les échantillons ayant de fortes teneurs en l.f. sont les plus stables et les moins sensibles à des modifications d'arrangement.

Comparaison de l.f. et (L+s) :

- La concavité des courbes isostables est plus marquée dans le diagramme a l S que dans le diagramme a (L+s) S (Tableau 27). Cela traduit le fait que l'augmentation relative de stabilité des échantil-

lons complexes par rapport aux séries binaires correspondantes, est plus marquée en présence de l.f. que (L+s).

- En général, lorsqu'on passe des séries binaires aux séries complexes, la pente des courbes isostables est plus forte dans le diagramme a l S que a (L+s) S. C'est-à-dire qu'en présence de S.g. l'augmentation de stabilité dans ces passages est plus grande en présence de l.f. que (L+s).

La pente des courbes isostables dans le diagramme a (L+s) S montre que pour les teneurs en argile inférieures à 70 % la stabilité diminue lorsque la teneur de (L+s) passe au-dessus de 15 %. Tandis que pour les teneurs en argile supérieures à 70 %, la stabilité augmente toujours au fur et à mesure que (L+s) remplace les s.g.

La pente des courbes montre, aussi, que dans le diagramme a (L+s) S lorsqu'on passe des séries a L et a s, à la série complexe, l'augmentation relative de stabilité est plus grande que lorsqu'on passe de aS à la série complexe.

- Dans le diagramme a l S, les courbes isostables sont beaucoup plus proches de la base de diagramme que celle de a (L+s) S. On voit que pour une teneur donnée en argile et une teneur donnée en S.g. la stabilité augmente toujours si on remplace (L+s) par l.f.

- Dans le diagramme a l S la ligne qui joint les points minimum des courbes isostables passe de  $a_5 l_{15} S_{80}$  à  $a_{60} l_{40}$  et, dans le diagramme a (L+s) S, elle passe de  $a_5 (L+s)_{15} S_{80}$  à  $a_{80} L_{20}$  ou  $a_{80} S_{20}$ . On voit que, pour les faibles teneurs en argile, les échantillons les plus stables contiennent de faibles quantités de l.f. ou de (L+s). Tandis que, pour les teneurs en argile de plus en plus élevées, les échantillons les plus stables contiennent des quantités de l.f. de plus en plus fortes et au contraire, elles contiennent des quantités de plus en plus faibles de (L+s).

Comparaison de l.f. et s.g.\*

- La concavité des courbes isostables inférieures ou égales à 10 est plus marquée dans le diagramme a (L+s) 1 que dans le diagramme a (L+s) S et inversement pour les courbes isostables supérieures à 10 (Tableau 27). Cela traduit le fait que, pour les teneurs en argile inférieures à 40 %, l'augmentation relative de stabilité, par comparaison aux échantillons binaires correspondants, est plus grande en présence de l.f. qu'en présence de S.g., et, inversement pour les teneurs en argile supérieures à 40 %.

- Dans les deux triangles, la pente des courbes montre que jusqu'à une teneur en argile de 40 %, la stabilité augmente lorsqu'on passe des séries binaires aux séries quaternaires. Cette augmentation pour les faibles teneurs en (L+s) est plus marquée dans le diagramme a (L+s) 1 que a (L+s) S. C'est-à-dire que l'augmentation relative de stabilité est plus forte en passant de a 1 à a (L+s) 1 qu'en passant de aS à a (L+s) S.

La pente des courbes isostables vers les fortes teneurs en (L+s), montre que l'augmentation relative de stabilité est plus marquée en passant de la série aL ou a S à a (L+s) S que lorsqu'on passe de la série a 1 à a (L+s) 1.

- La ligne qui joint les points minimum des courbes isostables va de  $a_5 (L+s)_{15} S_{80}$  à  $a_{80} L_{20}$  ou  $a_{80} S_{20}$  dans le diagramme a (L+s) S. Elle passe de  $a_{10} (L+s)_{20} l_{70}$  à  $a_{60} l_{40}$  dans le diagramme a (L+s) 1 : on voit que les échantillons les plus efficaces, pour les faibles teneurs en argile, se trouvent dans la zone riche en l.f. ou riche en S.g.. Au contraire, pour les fortes teneurs en argile, les échantillons les plus stables ont de fortes teneurs en l.f. et de faibles teneurs en s.g.

---

\* Pour comparer les courbes isostables dans ces deux diagrammes, nous avons porté L+s en abscisse dans le diagramme a 1 (L+s). (Graphique n° 8 bis).

#### IV.- ETUDE DES ECHANTILLONS A 5 FRACTIONS.

Il est bien évident que l'étude en soi de la stabilité d'un échantillon est moins importante que celle de l'influence des fractions élémentaires de leur teneur et de leur interaction. Ces différents points ont précisément fait l'objet des recherches que nous venons de présenter.

En étudiant des échantillons à 5 fractions, nous avons cherché à savoir si les grandes lignes des conclusions générales décrites au sujet des échantillons plus simples, binaires, ternaires et quaternaires, restaient valables pour des échantillons encore plus complexes.

Nous nous sommes bornés, pour cela, à étudier un petit nombre d'échantillons artificiels particuliers. Leur composition a été choisie de telle sorte qu'elle autorise des comparaisons faciles et précises. Ainsi nous avons remplacé dans la série a 1 S 50 % du s.g. par du (L+s).

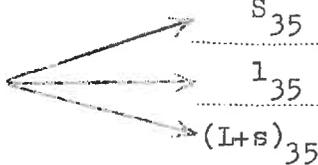
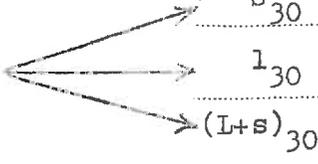
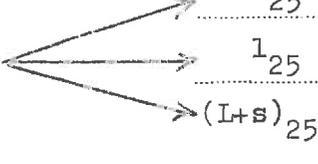
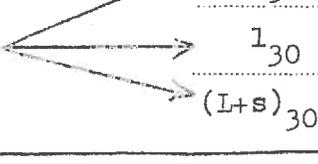
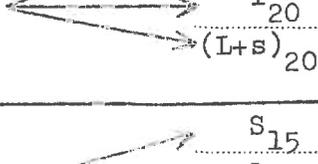
Nous avons rassemblé les résultats de taux d'agrégat stable à l'eau des échantillons à 5 fractions, dans le tableau n° 28. Nous y avons joint les taux d'agrégats stables de certains mélanges ternaires et quaternaires ( $Ag_e$ ) afin de faciliter la comparaison des résultats : ainsi pour une teneur donnée en argile, en l.f. et en S.g., on peut comparer l'influence du remplacement des fractions complémentaires l.f. ou S.g. ou (L+s), l'une par l'autre).

On voit d'abord que le remplacement de 50 % de S.g. dans la série a 1 S par (L+s) diminue la stabilité.

On constate que, d'une manière générale, la stabilité augmente lorsque le S.g. remplace le l.f. et que le l.f. remplace le (L+s).

TABLEAU 28

Résultats du test de stabilité des mélanges à V fractions ( $Ag_e$ ) et leur comparaison avec les mélanges IIIaires et IVaires

Désignation de textures	Teneur en argile		
	15	25	35
$l_{15} S_{35} + ou$ 	9 3 <sup>#</sup> 1		
$l_{15} S_{30} + ou$ 		26 25 <sup>#</sup> 1	
$l_{15} S_{25} + ou$ 			39 43 <sup>#</sup> 14
$l_{30} S_{25} + ou$ 	8 1 1		
$l_{35} S_{20} + ou$ 		29 20 <sup>#</sup> 2	
$l_{35} S_{15} + ou$ 			46 38 21

Toutefois, il faut tenir compte de la différenciation des phases, seule responsable de variation de stabilité en présence de s.g. et pour les teneurs en argile inférieures à 40 %.

CONCLUSION :

Les résultats obtenus sur les échantillons à 3 ou 4 ou 5 fractions sont dans leurs grandes lignes en accord avec ceux de l'étude des mélanges binaires. Mais ils permettent, de plus, de constater que les fractions associées à l'argile interviennent non seulement par leur taille, mais aussi, dans une large mesure, par leurs proportions relatives. Cela n'est qu'une confirmation supplémentaire de l'influence du mode d'arrangement des particules du sol sur leur stabilité structurale. Cette influence est particulièrement marquée pour les teneurs en argile inférieures à 40 %. Elle est alors telle qu'elle va "jusqu'à masquer la validité de certaines des règles générales" que nous avons décrites au sujet du rôle des fractions limoneuses et sableuses. Par exemple, on a vu que le limon fin n'était pas toujours un constituant plus favorable que le limon grossier ou le sable fin, si on considère leur influence respective lorsqu'on passe de l'échantillon à deux fractions à des échantillons plus complexes. Il se produit alors des variations en quelque sorte discontinues de stabilité.

L'augmentation du nombre des fractions associées à l'argile en présence de sables grossiers modifie largement les conséquences qui découlent de la différenciation des phases.

---

C H A P I T R E    V

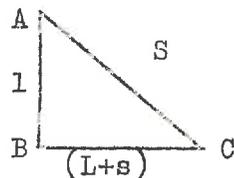
COMPARAISON GENERALE DES RESULTATS DU TEST DE STABILITE

I.- COMPARAISON DE l.f., (L+s) et S.g.

Pour comparer l'influence de la taille de fractions associées à l'argile et de leurs teneurs relatives, nous avons cherché un mode de présentation, donnant une vue d'ensemble sur tous les résultats des séries à 2, 3, 4 et 5 fractions : Nous avons présenté tous les échantillons, ayant la même teneur en argile, dans un diagramme triangulaire, en considérant toujours (L+s), comme parties d'une même fraction. Ainsi il ne nous reste que trois fractions l.f., (L+s), S.g. à présenter sur le diagramme triangulaire qui porte le l.f. sur le côté vertical, le (L+s) sur le côté horizontal; la teneur en argile est obtenue par différence.

Les mélanges binaires se situent aux sommets du triangle et les échantillons ternaires et quaternaires sur les côtés :

Soit le diagramme :



A représente la série binaire a l  
B " " " " a S  
C " " " " aL et as

Sur AB se situe la série de type ternaire a l S  
- BC - - - quaternaire a (L+s) S  
- AC - - - - a l (L+s).

Les échantillons à 5 fractions se situent à l'intérieur du diagramme.

Dans les diagrammes ainsi définis, nous avons porté les résultats de taux d'agrégat stable à l'eau et, ensuite, nous avons établi les courbes isostables.

Comme dans chaque diagramme la teneur en argile reste constante, on peut étudier plus facilement l'influence propre des fractions complémentaires. En outre, on peut avoir une vue d'ensemble sur tous les résultats.

Nous avons choisi les 5 teneurs en argile que nous avons retenues pour l'étude des séries complexes à savoir 15, 25, 35, 50 et 65 %. (Graphiques n° 10, 11, 12, 13, 14) Ainsi, seuls les résultats des séries binaires sont obtenus par l'intrapolation.

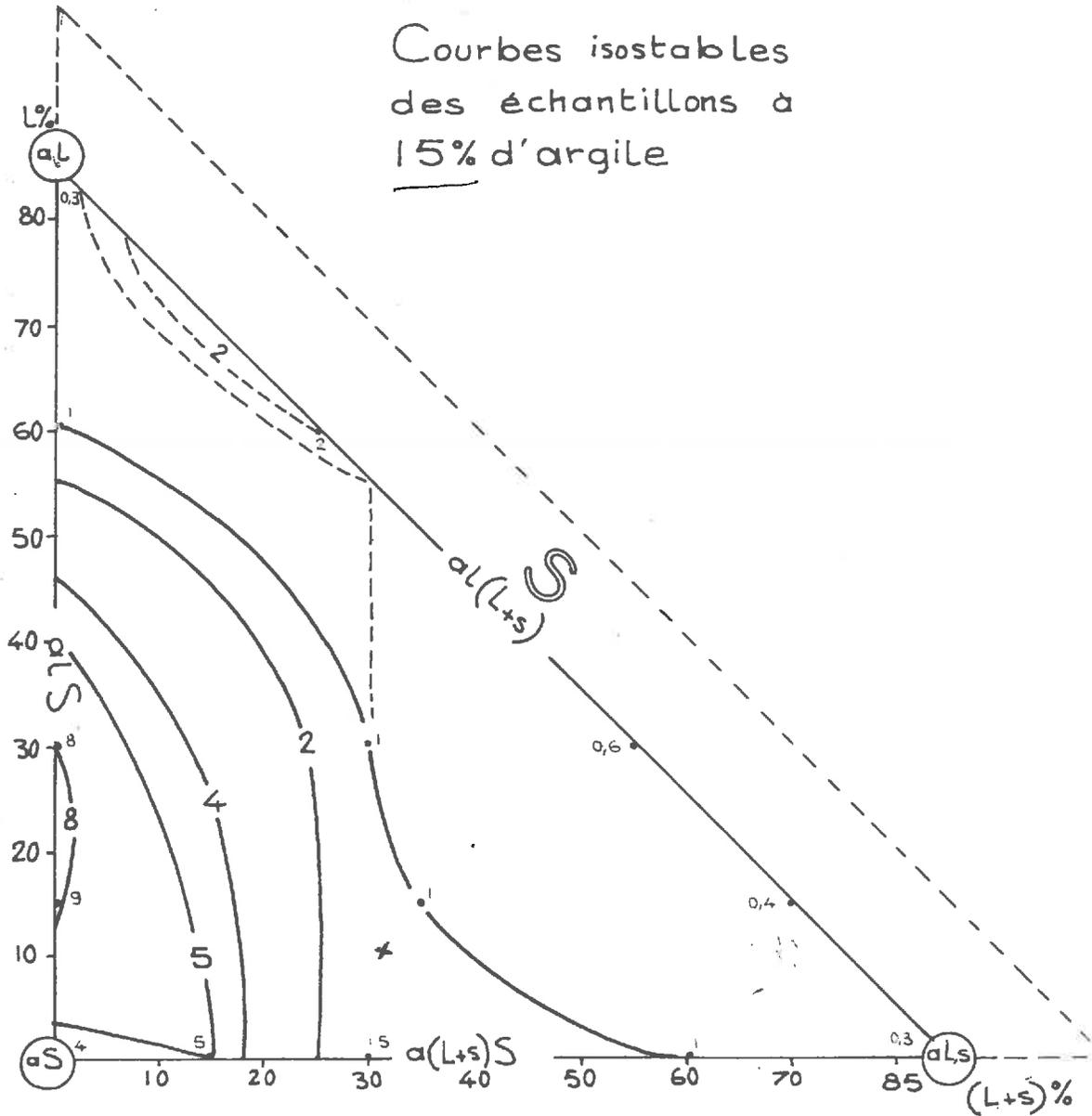
Nous allons étudier, maintenant, l'allure générale des courbes isostables dans les deux gammes de teneurs en argile : inférieures et supérieures à 40 %.

Comparaison de  $l, (L+s)$  et S pour les teneurs en argile inférieures à 40 %

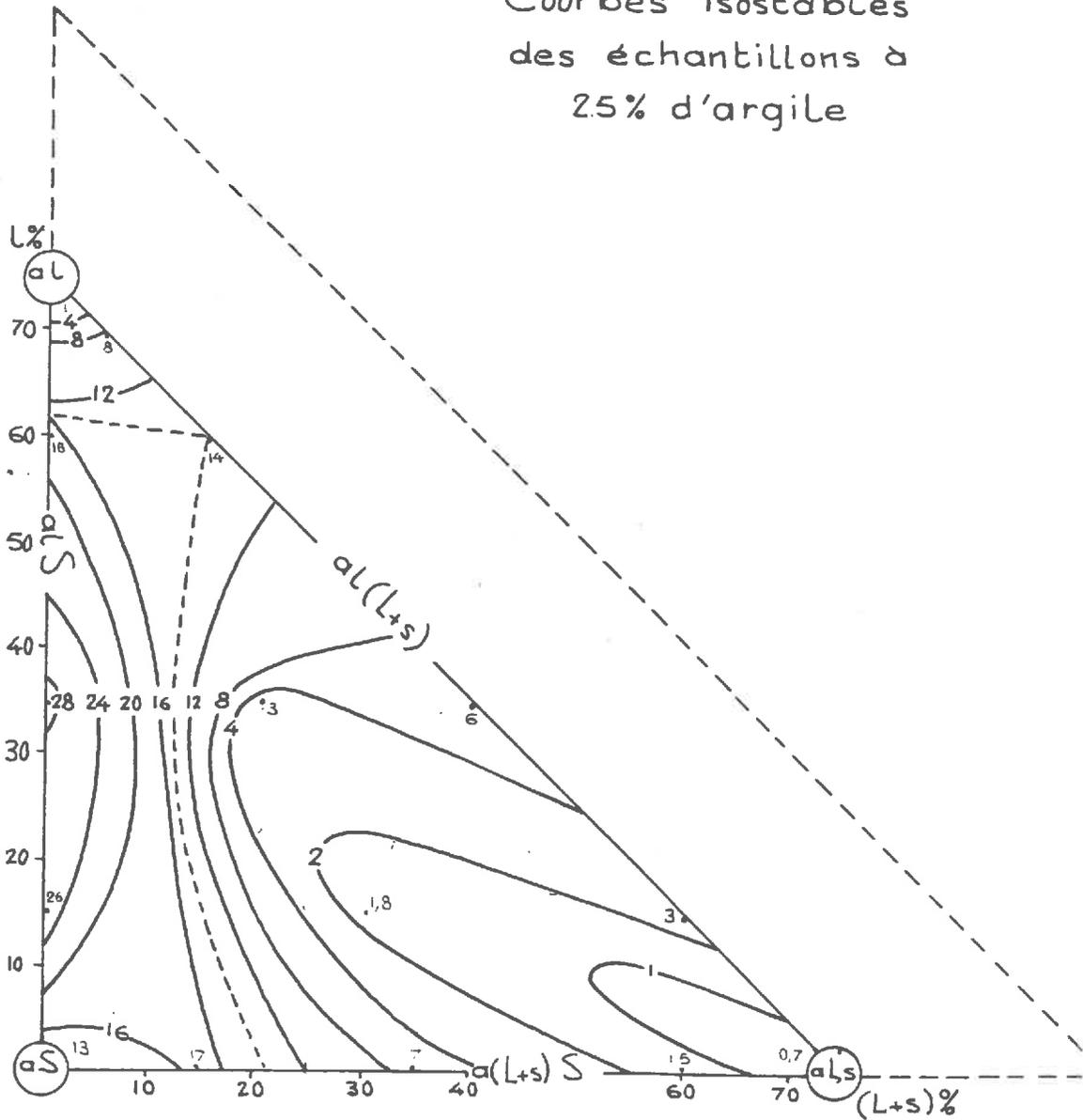
- Dans chaque diagramme le taux d'agrégats stables le plus faible se trouve au sommet C, c'est-à-dire pour les échantillons binaires aL et as. Le taux le plus élevé, lui, se situe sur le côté AB, c'est-à-dire pour les échantillons ternaires a l S.

n° 10

Courbes isostables  
des échantillons à  
15% d'argile

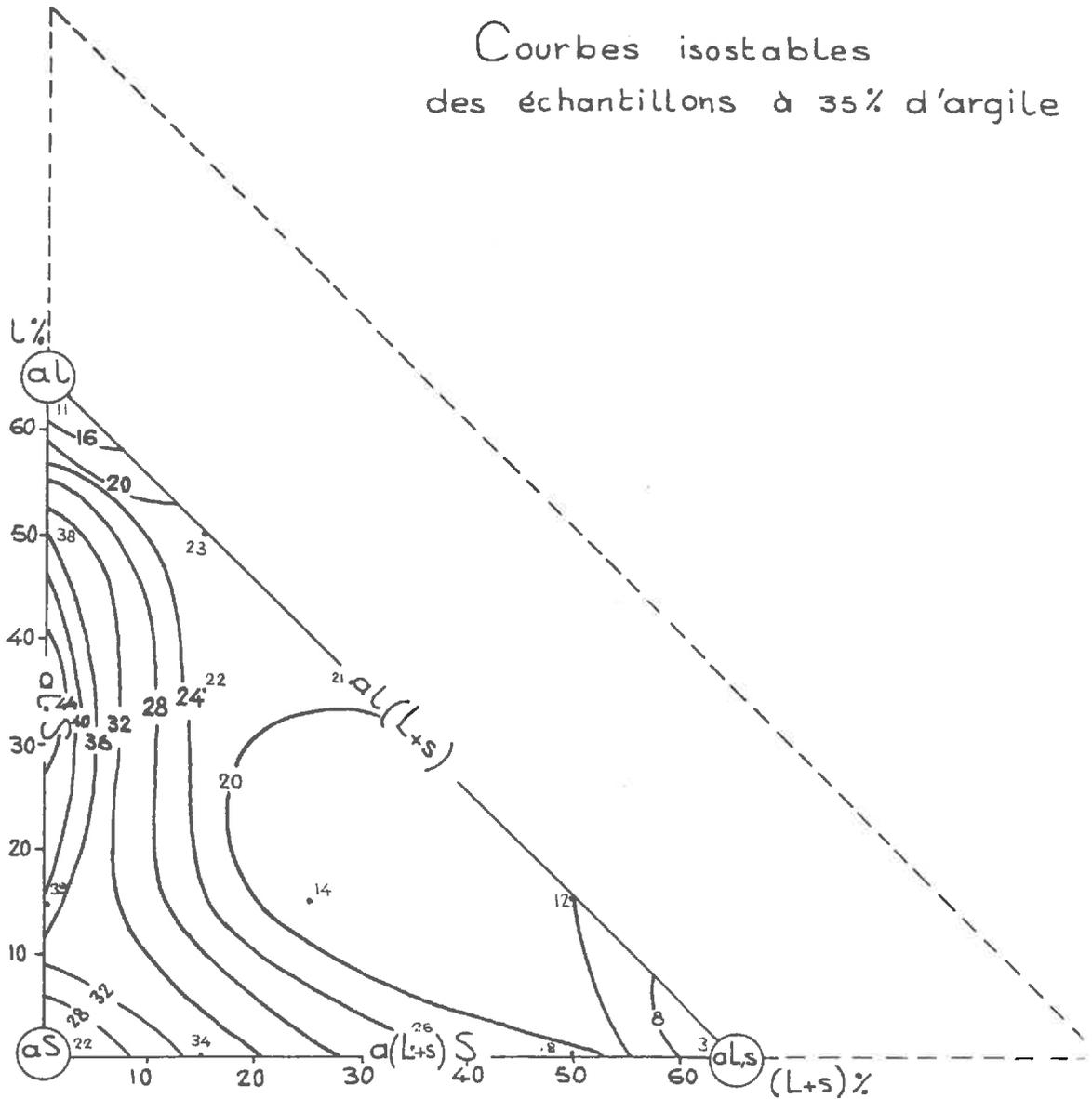


n° 11  
 Courbes isostables  
 des échantillons à  
 25% d'argile



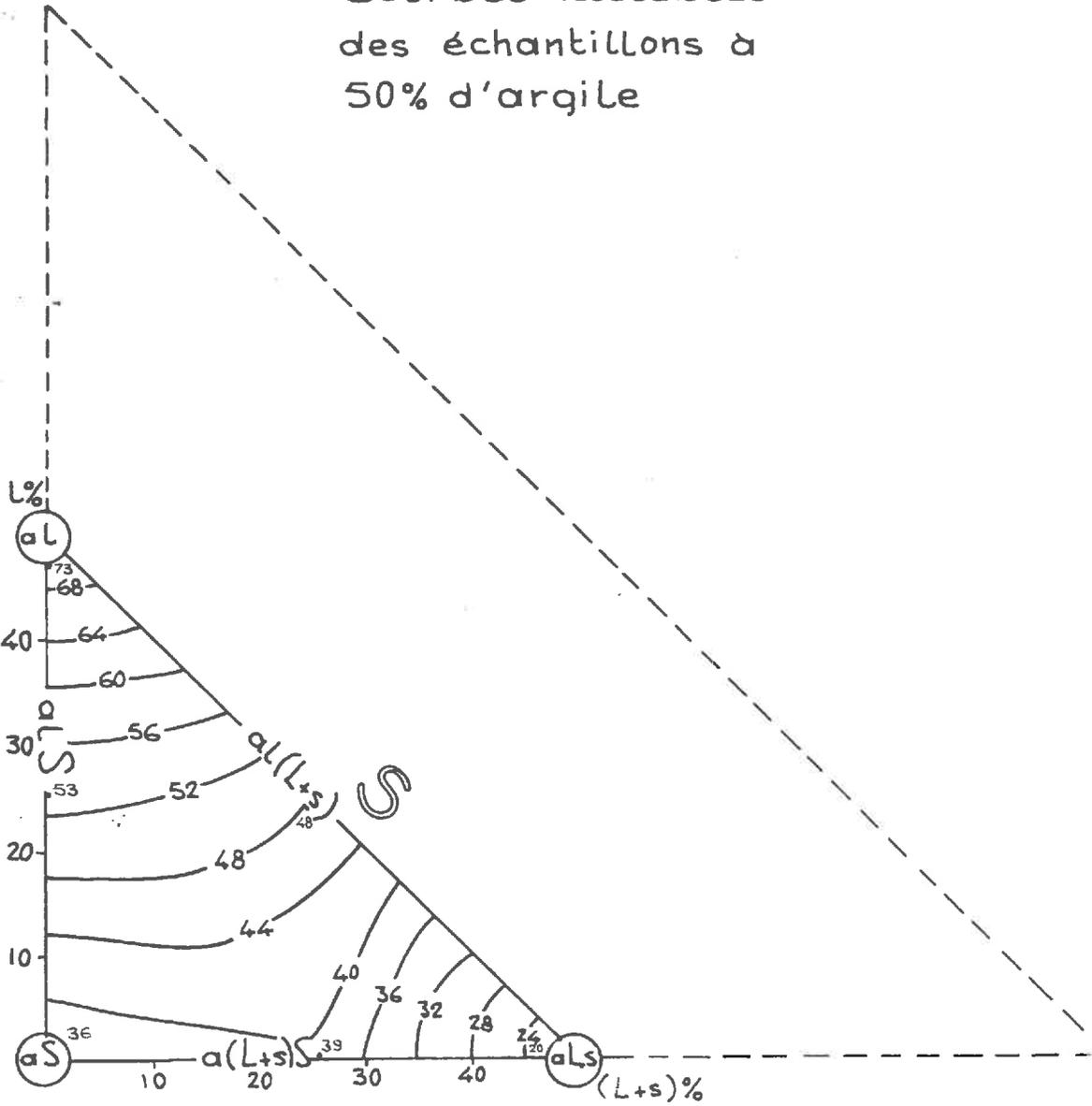
n° 12

Courbes isostables  
des échantillons à 35% d'argile



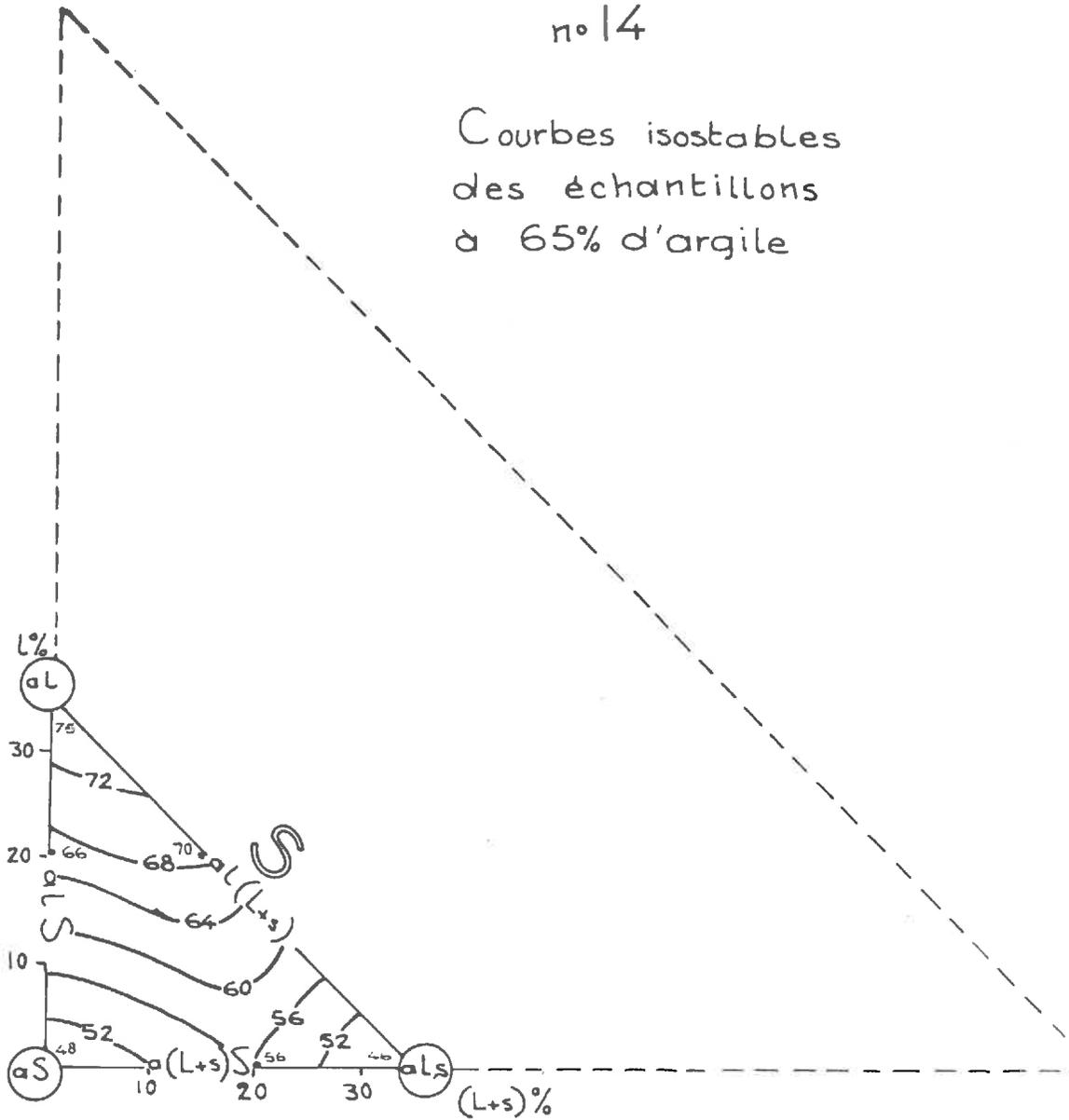
n° 13

Courbes isostables  
des échantillons à  
50% d'argile



n° 14

Courbes isostables  
des échantillons  
à 65% d'argile



- Dans un diagramme donné, les taux d'agrégats stables situés sur les sommets sont de plus en plus élevés lorsqu'on passe de C à A et puis à B, c'est-à-dire en passant de aL, as à a1 et puis à aS.

- Sur chaque côté du triangle il y a un certain point ayant la stabilité maximum, par rapport aux sommets correspondants. C'est-à-dire que les échantillons ternaires et quaternaires sont plus stables que binaires. La valeur relative de trois taux maximum, situés sur trois côtés de diagramme est de plus en plus grande lorsqu'on passe de BC à AC et puis à AB, c'est-à-dire en passant de a (L+s) S à a1 (L+s) et puis à a 1 S.

- Sur le côté BC "a (L+s) S" la stabilité atteint son maximum pour les teneurs en (L+s) inférieures et égales à 15 % et la gamme de variation de stabilité sur ces côtés, est assez remarquable et elle est plus grande que sur les autres côtés.

Comparaison de l, (L +s) et S pour les teneurs en argiles supérieures  
à 40 %

- Le taux le plus faible se situe toujours au sommet C, c'est-à-dire pour les échantillons binaires aL et as. Mais le taux le plus élevé se déplace sur le côté AB (a 1 S) vers les teneurs en l.f. de plus en plus fortes, c'est-à-dire vers le sommet A, (a 1).

- Dans les diagrammes ayant les teneurs en argile 50 et 65 %, le taux d'agrégat le plus élevé se situe sur le sommet A (a 1).

- Dans chaque diagramme, il y a un certain point sur le côté BC, "a (L+s) S", qui a une stabilité plus forte que les deux

extrémités de ce côté, c'est-à-dire les échantillons binaires correspondants a S, a L et a s. Ce point se déplace vers les teneurs en (L+s) de plus en plus fortes, au fur et à mesure que la teneur en argile augmente. Dans les diagrammes ayant des teneurs en argile 50 et 65 % ce point se situe pour les teneurs en (L+s) de 25 %. On voit que pour les teneurs en argile 50 et 65 %, dans deux diagrammes, seul le passage d'échantillons binaires a L, a s et a S aux échantillons quaternaires a (L+s) S, est marqué par une augmentation de stabilité.

Sur le côté BC "a (L+s) S" la gamme de variation de stabilité est moins grande que dans le cas des teneurs en argile inférieures à 40 %.

o°o

On voit que le ~~ré~~ rôle stabilisateur de l'argile varie en fonction des fractions associées et leurs teneurs relatives.

Nous allons, maintenant, examiner cet aspect plus en détail.

## II.- EFFICACITE DE L'ARGILE.

Le taux d'agrégat stable à l'eau ne varie à l'intérieur de chaque diagramme qu'en fonction de la taille et des teneurs relatives des fractions complémentaires. Ces variations sont en effet indépendantes de la teneur en argile, puisque, dans un diagramme donné, la teneur en argile pour tous les échantillons est la même.

Dans chaque diagramme, on peut donc étudier l'influence des fractions associées à l'argile et leur teneur sur la stabilité en étudiant les variations de taux d'agrégat stable.

Toutefois les courbes isostables ne sont pas comparables dans deux diagrammes donnés en ce qui concerne l'influence des fractions complémentaires sur la stabilité. C'est pourquoi, pour pouvoir comparer entre elles toutes les courbes isostables de tous les diagrammes, nous avons calculé pour chaque échantillon donné le rapport de  $\frac{Age}{a\%}$  que nous appellerons le "coefficient d'efficacité de l'argile". Ce coefficient montre le taux d'agrégat stable qu'on peut obtenir rapporté à 1 % d'argile.

Ce coefficient d'efficacité de l'argile, varie dans chaque diagramme en fonction de fractions qui lui sont associées et en fonction de teneurs relatives de celles-ci. C'est pourquoi la gamme de variations plus ou moins grande de ce coefficient traduit l'importance plus ou moins grande des fractions complémentaires et leurs arrangements sur la stabilité.

La gamme de variation de coefficient d'efficacité de l'argile varie aussi en fonction de teneur en argile des échantillons, d'un diagramme à l'autre. C'est-à-dire l'influence de fractions complémentaires et leurs teneurs relatives ne reste pas toujours la même à tous les niveaux de teneurs en argile. Donc, en étudiant la gamme de variations de coefficient d'efficacité de

l'argile dans tous les diagrammes, et, en les comparant, on peut avoir une image plus précise du rôle des fractions complémentaires et de leurs teneurs relatives, dans la stabilité à tous les niveaux de teneurs en ciment argileux.

Cette étude qui tient compte de tous les résultats de stabilité, et qui donne un schéma général sur celle-ci mérite d'être précisée. Dans un tel but, nous avons calculé, pour chaque diagramme, la gamme de variation de coefficient d'efficacité de l'argile, c'est-à-dire "C.E. maximum - C.E. minimum". Cette différence et ses variations traduisent l'influence et l'importance de l'arrangement des fractions associées à l'argile dans la stabilité.

Nous avons établi, ensuite, une courbe en portant en abscisse la teneur en argile, et en ordonnée la différence de "C.E. maximum - C.E. minimum" (graphique N° 15).

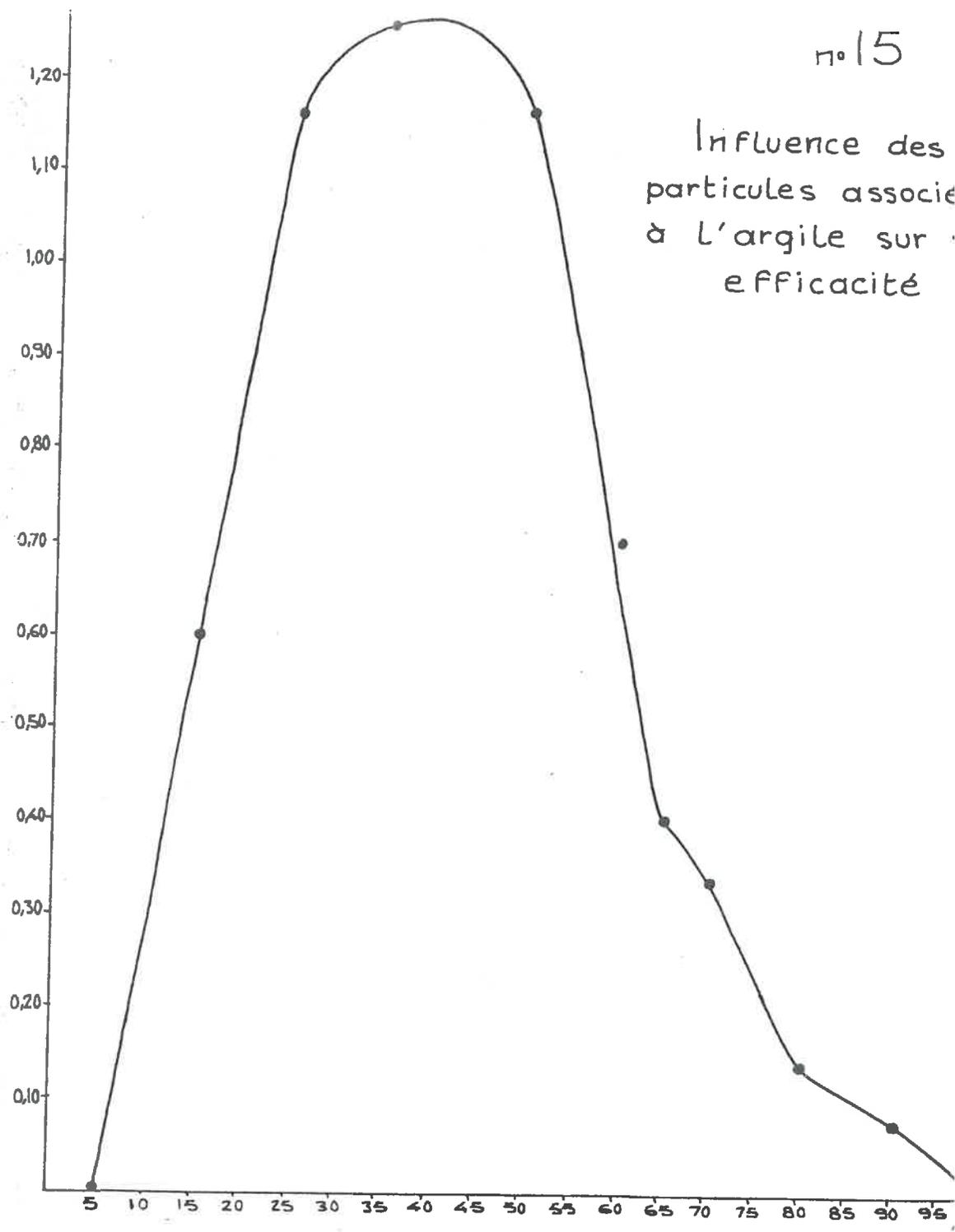
On voit que la valeur du C.E. maximum - C.E. minimum, qui reflète l'importance des fractions associées à l'argile dans la stabilité, étant nulle jusqu'à teneur en argile 5 %, augmente au fur et à mesure que la teneur en argile augmente. Elle atteint son maximum à argile 40% et à partir de ce niveau elle descend et elle devient nulle pour les teneurs en argile > 90 %.

La première conclusion porte sur ce fait que le rôle des fractions associé à l'argile et leurs teneurs, est le plus marqué dans les mélanges où la phase argileuse n'est pas toujours continue. Et inversement, l'influence des fractions, dans la stabilité, diminue au fur et à mesure que la phase argileuse devient de plus en plus continue.

La deuxième constatation est que, pour les teneurs en argile < 25 % d'une part, et supérieures à 50 % d'autre part, les variations de C.E. maximum - C.E. minimum (la montée et la descente de courbe) sont beaucoup plus grandes que pour les teneurs en argile de 25 - 50 %.

n°15

Influence des  
particules associées  
à l'argile sur  
l'efficacité



Cela veut dire que les fractions associées à l'argile n'interviennent pas directement dans la stabilité par leur arrangement plus ou moins serré, mais elles interviennent indirectement dans la continuité de la phase argileuse. C'est pourquoi, pour les teneurs en argile inférieures à 25 où quelles que soient les fractions associées, il n'y a presque jamais la continuité dans la phase argileuse l'influence des fractions est beaucoup moins importante que pour les teneurs en argile de 25 - 50 %.

Pour les teneurs en argile de 25 - 50 %, il y a la possibilité de la continuité de la phase argileuse. Comme la continuité de cette phase cause une augmentation brutale de stabilité, c'est pourquoi, pour une teneur donnée en argile dans cette gamme, on obtient des stabilités très différentes des mélanges en fonction des fractions associées et leur mode d'arrangement.

Pour les teneurs en argile supérieures à 50 %, où la continuité de la phase argileuse est toujours assurée, l'influence de fractions associées diminue considérablement. L'action des fractions associées devient nulle pour les teneurs en argile supérieures à 90 %.

Si on examine maintenant l'allure générale de courbes, on aperçoit que, pour les teneurs en argile, d'une part inférieures à 25 % et d'autre part supérieures à 50 et inférieures à 65 %, les variations sont linéaires. On sait que, dans ces deux gammes de teneur en argile, la phase argileuse est d'une part, toujours discontinue, et d'autre part toujours continue. Les variations dans des gammes de teneurs en argile de 25 à 40 % et de 65 à 100 sont plus complexes. On sait que pour les teneurs en argile de 25 à 40 % la continuité de la phase argileuse est largement commandée par l'arrangement des fractions, et les facteurs qui interviennent donc dans les variations sont plus nombreuses et plus complexes. Cette complexité pour les teneurs en argile supérieures à 65 % est due à la fissuration.

## CONCLUSIONS GENERALES

Il nous reste maintenant à faire apparaître l'essentiel des enseignements que l'on peut tirer de ce travail.

Les premières conclusions concernent l'objet particulier de notre étude, c'est-à-dire l'influence de la composition granulométrique des sols sur leur stabilité structurale.

Si la fraction argileuse est apperue comme le facteur responsable de la cohésion de la terre humide, et en définitive de la stabilité structurale, on a pu constater que sa connaissance n'était à elle seule capable de prévoir que les grandes lignes du comportement de la structure vis à vis de l'eau. Nous avons, en particulier, montré que lorsque la teneur en argile est comprise entre 10 et 40 % c'est-à-dire dans une gamme où entrent la plupart des sols cultivés, la répartition granulométrique des fractions limoneuses et sableuses intervient de façon décisive.

Cette influence se manifeste de diverses façons :

- La granulométrie des particules complémentaires influence sur leurs diverses possibilités d'arrangement et assure ainsi une continuité plus ou moins étendue d'un taux déterminé de ciment argileux. Il est à noter que ces possibilités dépendent bien plus de la distribution par taille que de la taille elle-même.

- La différenciation des phases qui, par concentration de l'argile dans certaines zones permet d'obtenir une stabilité importante même lorsque le ciment est discontinu ne se manifeste sous cette forme qu'en présence de quantités suffisantes de particules grossières.

- La taille des particules limoneuses et sableuses définit leur surface spécifique et, par conséquent, influe sur l'intimité de leur contact avec le ciment argileux lorsque celui-ci est présent en quantité suffisante.

- Enfin, le phénomène de fissuration, responsable nous l'avons vu, de baisses apparentes de stabilité, intervient au-delà de teneurs en argile qui dépendent de la taille des particules qui lui sont associées.

o

o o

Une deuxième série de conclusions portent sur la notion de stabilité structurale.

Lors du tamisage sous l'eau d'échantillons de sols naturels, on a longtemps pu concevoir qu'on procédait ainsi à l'extraction d'un certain nombre d'"agrégats" de propriétés structurales privilégiées préexistant dans le sol. Une telle conception est à l'origine de l'appellation "analyse d'agrégats" donnée aux méthodes de tamisage sous l'eau - d'ailleurs regroupées sous le titre "Méthodes internationales B d'analyse mécanique".

Les résultats que nous avons présentés et l'interprétation qu'ils autorisent nous conduisent, après d'autres chercheurs, à mettre en doute l'existence de tels "agrégats" et, par là même à renoncer aux méthodes d'études qui la postulent. Le comportement comparé aux différents prétraitements (taux d'agrégats stables et taille de ces particules terreuses) d'un même échantillon, l'allure des variations de stabilité en fonction des différentes possibilités d'arrangement des constituants et de leur probabilité, amènent plutôt à penser à une hétérogénéité de la masse du sol.

Cette hétérogénéité se manifeste par l'existence de zones plus ou moins cohérentes. La fréquence des volumes élémentaires présentant une cohésion interne supérieure à celle qui est nécessaire pour résister au tamisage standard pratiqué dépend de la probabilité qu'apparaissent des assemblages tels que cette cohésion minima puisse se manifester. Leur taille dépend en outre de l'intensité de l'agression par l'eau (action des prétraitements). Si nous pouvons conserver le terme "agrégat" en raison de sa commodité, il ne correspond pas en fait à la représentation immédiate qu'il suggère.

Nous avons été conduits, par ailleurs, à examiner les différents aspects du comportement de la structure tels qu'ils sont traduits par l'indice S.

Le premier point concerne la limite inférieure fixée à 200  $\mu$  pour la taille des "agrégats" stables. Le comportement des terres argileuses qui, par suite de leur fissuration, fournissent des agrégats stables de dimension moyenne plus faible, souligne évidemment le caractère conventionnel de cette limite. Toutefois, l'accord entre les indices établis sur cette base et la stabilité appréciée par l'observation directe au champ suffit à valider cette convention dans la majorité des cas; d'autant que la prise en considération dans l'indice global du taux d'argile + limon dispersé permet de tenir compte indirectement des particules stables d'une taille inférieure à 200 .

Soulignons également le fait que cette quantité d'éléments fins dispersés introduit dans l'indice, en plus d'un élément de jugement sur la fragilité de l'édifice structural, une appréciation implicite de l'état structural résultant de la dégradation. Par exemple, les échantillons  $a_{10} l_{90}$  et  $a_{10} L_{90}$  sont aussi instables l'un que l'autre, mais le test effectué sur le premier conduira à un indice S nécessairement plus élevé qui traduit

l'état physique plus défavorable d'une terre riche en éléments fins lorsque sa structure est dégradée.

o  
o o

Les dernières conclusions ont trait à la notion de texture dont nous pensons avoir contribué à préciser le contenu.

Les facteurs intervenant dans les relations : composition granulométrique - stabilité structurale : pouvoir ciment de l'argile, mode d'arrangement des particules limoneuses et sableuses, conduisent à penser que la nature minéralogique de l'argile et sa garniture ionique, l'allure de la courbe de distribution par taille à l'intérieur de chacune des classes granulométriques classiques, la forme des particules, sont des éléments complémentaires de caractérisation de la texture qu'il conviendrait de prendre en considération pour préciser et parfois même pour comprendre le comportement de certains sols.

Il ne ressort pas moins de ce travail que la seule connaissance des granulométries permet, lorsque les autres facteurs en cause sont analogues, de prévoir dans une assez large mesure l'un des comportements les plus importants des sols.

---

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BAVIER (L.D.) (1956) Soil physics, Wiley, New-York, 1 vol., 489 p.
- BETREMIEUX (R.) (1965) La représentation de la granulométrie des terres, un procédé géométrique. C. R. Acad. Agric. Fr. 51, 61, 347 - 351.
- CAILLEUX (A.) et VERGER (F.) (1961) Graphiques granulométriques T. P., Centre doc. univ., 44 p.
- CASTANY (G.) (1965) Cours de géologie appliquée, tome II hydrogéologie. Editions scientifiques Richer, 271 p.
- COMBEAU (A.) et MONNIER (G.) (1961) Méthode d'étude de la stabilité structurale, application aux sols tropicaux. Sols Africains, vol. VI, n°1, 5 - 32
- DEMELON (A.) (1952) Principe d'agronomie - Dynamique du sol Dunod, Paris vol. I, 520 p.
- DUCHAUFFOUR (P.) (1960) Précis de pédologie. Masson et Cie Paris.
- FEODOROFF (A.) (1958) Un appareil pour le tamisage de la terre sous l'eau. Ann. Agron. n°4, 537 - 548.
- GRAS (R.) (1957) Relation entre l'humidité équivalente et la granulométrie du sol. Rapport non publié.
- GRAS (R.) et MONNIER (G.) (1962) Contribution des cailloux à la capacité de réserve en eau du sol. Science, 254, 3 422 - 3 424.

- HENIN (S.) Note sur la description et la classification des éléments structuraux. Non publié.
- HENIN (S.) (1938) Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres. Thèse, Paris.
- HENIN (S.) (1948) Essai d'une théorie de la stabilité de la structure des sols. Plant and soil, 1, n°2, 167 - 178.
- HENIN (S.) et MONNIER (G.) (1956) Evaluation de la stabilité de la structure du sol. C. R. 6e congrès inter. Science du sol, Paris. Vol. I 49 - 52.
- HENIN (S.), MONNIER (G.) et COMBEAU (A.) (1958) Méthode pour l'étude de la stabilité structurale des sols. Ann. Agron. n°1, 73 - 92.
- HENIN (S.), FEODOROFF (A.), GRAS (R.) et MONNIER (G.) (1960) Le profil cultural - Principes de physique du sol. Société d'Edition des ingénieurs agricoles, Paris.
- HENIN (S.) et CONCARET (J.) (1965) Sur une propriété déterminant la stabilité structurale des terres : la cohésion à l'état humide. C. R. Acad. Sc., Paris, 261, 2 734 - 2 737 (4 octobre 1965).
- HENIN (S.) et MUTTER (W.) (1964) Essai sur le gonflement comme mécanisme de la stabilité structurale des sols. Science du sol, n°2.
- HENIN (S.) et BOSQUET (1964) Relation entre le comportement des sols (effritement - fissuration) et leur texture. C. R. Acad. Agric. Fr., 842 - 846.
- KEEN (B. A.) and CAUTTS (J. R. H.) (1928) Single values soil properties. A study of the significance of certain soil constants. Agri. Sci., 18, 740 - 765.
- KEEN (B. A.) (1931) Physical properties of the soil. Longmans Londres, vol. 1, 380 p.

KOZENY (J.) (1932) Der Kulturtechniker, 35, 478 p.

LEGENDI (V.) (1964) Die physikalischen Eigenschaften von Böden, ihre methodische Erfassung und ihre Veränderung durch verschiedene Faktoren, dargestellt und Modellsubstanzen. Berlin, 159 p. + 29, tableau h. t.

MAHDAVI ARDABILI (M.) (1952-1954) Statistique et probabilité. Université de Téhéran, tome 1, 312 p., tome II.

MARGULIS (H.) (1963) Pédologie générale Gauthier - Villars, Paris, 117 p.

MERIAUX (Mme S.) (1958) Stabilité structurale et composition des sols. C. R. Acad. Agric., Séance du 19-11.

MONNIER (G.) (1965) Thèse, Paris.

PAOLI (R.) (1961) Généralités et matériaux de construction, vol. I Editions scientifiques RIBER, 116 p.

PELTIER (R.) (1959) Manuel du laboratoire Routier, 2e édition. DUNOD, Paris, 291 p.

ROUSSEAU (J.) (1965) Sur une loi d'association des faciès granulométriques des fractions grossières et fines d'un sédiment sableux. C. R. Acad. Sci., Paris, 261, 18, 3 653 - 3 656.

ROUSSEAU (J.) (1965) Sur la possibilité d'étendre la notion d'indices granulométriques de A. Riocene au domaine de la morphométrie dans le cas des sables. C. R. Acad. Sci., 261, 18, 3 853 - 3 855.

RUSSEL (J. C.) (1928) Variations in the B horizon. Amer Soil Surriey, An. Bul, n°9.

SCHLOESING (Th.) (1885) Chimie agricole. Encyclopédie Fremy, Dunod, Paris 10, 64 p.

YODER (A.) (1936) Direct method of agregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. Amer. Soc. Agron., 28, 337-351.