

JH L3

MINISTÈRE DE L'ÉDUCATION
— L. N. S. A. —
BUREAU DE JOURNÉE DE SOL
Domaine Saint-Paul
LA TERRE MONTFAVET

ulp

U.R.E. DES SCIENCES DE LA VIE ET DE LA TERRE
INSTITUT DE GEOLOGIE
STRASBOURG

GF1

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE LOUIS PASTEUR

pour obtenir le grade de

DOCTEUR ES SCIENCES NATURELLES

par

jean claude FIES

Porosité du sol : étude de son origine texturale

Soutenu publiquement le 21/03/78 devant la Commission d'Examen:

- MM. G. MILLOT, Président
- G. BOCQUIER
- J. CHAUSSIDON
- S. HENIN
- J. LUCAS

LISTE DES PROFESSEURS, MAITRES DE CONFÉRENCES
DIRECTEURS ET MAITRES DE RECHERCHES CNRS ET INSERM

Président : Professeur P.KARLI
Vice-Présidents : Professeur Fr.MARCOUX
Professeur J.H.WEIL
Président Honoraire : Professeur G.OURISSON
Secrétaire Général : Monsieur G.KIEHL

E.R. DE SCIENCES EXACTES

E.R. de Mathématiques
E.R. de Sciences Physiques et Chimiques
E.R. de Sciences de la Matière
E.R. de Sciences de la Vie et de la Terre
E.R. de Sciences du Comportement et de l'Environnement
E.R. de l'École d'Application des Hauts Polymères
E.R. de l'École Nationale Supérieure de Chimie
E.R. de l'Observatoire
E.R. de Physique du Globe

Directeur : Jacques FARAUT
Directeur : Jean DEHAND
Directeur : Jean José FRIED
Directeur : Yves BOULANGER
Directeur : Michel TARDY
Directeur : Constant WIPPLER
Directeur : Marc DAIRE
Directeur : Alphonse FLORSCH
Directeur : Alexandre ROCHE

MEMBRES HONORAIRES : P.LACROUTE - J.H.VIVIEN - G.MILLOT.

PROFESSEURS HONORAIRES : L.BOISSELET - J.BYE - H.CARTAN - G.CERF - C.CHABAUTY - A.CHRETIEN - J.DENY - Ch.EHRESMANN -
S.GILLET - S.GOLDSZTAUB - R.HOCART - P.LACROUTE - G.LEMEE - P.L'HERITIER - A.LICHNEROWICZ - A.MAILLARD - L.NEEL -
P.ARROD - R.ROHMER - J.P.ROTHE - L.SACKMANN - Ch.SADRON - H.SAUCIER - H.VILLAT - H.WEISS - Et.WOLFF - J.YVON.

MEMBRE DE CONFÉRENCES HONORAIRE : R.WEIL.

PROFESSEURS

ADLOFF	Chimie Nucléaire	E. FOLLENIUS	Zoologie	G. MONSONEGO	Physique Théorique
ARMBRUSTER	Physique	J.J. FRIED	Méc. des Fluides	B. MORIN	Mathématiques I
AVANISSIAN	Analyse supérieure	D. FROELICH	Chim. Gén. Chim. Phys.	G. OURISSON	Chimie
BECKER	Physique Mathématique	A. FUCHS	Mécanique rationnelle	J.P. RAMIS	Mathématiques Générales
BENEZRA	Dermato-Chimie	A. GAGNIEU	Botanique	G. REEB	Topologie
BENOIT	Physicochim. macromol.	A. GALLMANN	Physique	Ph. RICHARD	Physiologie Animale
BENVENISTE	Physiologie Végétale	F. GAULT	Chimie Organique	J.J. RIEHL	Chimie
BERNARD	Méth. Math. de la Phys.	F. GAUTIER	Physique	Cl. ROBERT	Physique
BERNIER	Chimie Générale	R. GERARD	Mathématiques	A. ROCHE	Physique du Globe
BOULANGER	Chimie Biologique	G. GLAESER	Mathématiques	Ph. ROPARTZ	Psycho-Physiologie
BRENET	Electrochimie	Q. GOBILLON	Mathématiques	J. ROUX	Botanique
BRINI	Chimie	S. GORODETZKY	Phys. Gén. et Phys. Nucl.	Fr. SCHALLER	Biologie Générale
BROSSAS	Chimie Macromol.	M. GOUNOT	Botanique	G. SCHIFFMANN	Mathématiques
CERF	Physique générale	M. GROSS	Chimie	J.P. SCHWING	Chimie
CHEVALLIER	Physique	M. GROSSMANN	Physique	M.J. SCHWING	Chimie Physique
CLAUSS	Chimie	L. HIRTH	Microbiologie	M. SIESKIND	Physique
COCHE	Physique Nucléaire	P. JOLY	Biologie Générale	G. SOLLADIE	Chimie Organique
DAIRE	Chim. Phys. Ind. Sc. des Mat.	J.P. JOUANLOU	Mathématiques	J. SOMMER	Chimie Appliquée
DANAN	Phys. Atom. et Phys. du Solide	T. JUTEAU	Minéral. et Pétrographie	F. STUTINSKY	Physiologie Générale
DANIEL	Physique Expérimentale	R. KIRSCH	Zoologie	G. SUTTER	Physique Electronique
DAUNE	Biophysique	F. LACROUTE	Biologie Végétale	Ch. TANELIAN	Chimie
DEHAND	Chimie Minérale	R. LECOLAZET	Physique du Globe	J.J. THIEBOLD	Biologie Animale
JELUZARCHE	Chimie	J.M. LEHN	Chimie	D. VIAUD	Mathématiques
JUNOYER de	Géologie	J. LEITE-LOPES	Phys. Nucl. et Corpuscul.	J.H. VIVIEN	Zool. et Embryol. Expérim.
SEGONZAC	Botanique	M. LEROY	Chimie	R. VOLTZ	Physique Théorique
DURANTON	Chimie Biologique	J. LUCAS	Géologie	J.H. WEIL	Chimie Biologique
EBEL	Minéralogie	D. MAGNAC	Physique	G. WEILL	Physique
EBERHART	Mathématiques	J. MARTINET	Mathématiques	R. WEISS	Chimie
ERBAUT	Chimie	P. MIALHE	Physiologie Animale	P.L. WENDEL	Physique
EDERLIN	Mathématiques	A. MICHARD	Géologie	C. WIPPLER	Physicochim. des Hts Polym. Inclus.
ERNIQUE	Mathématiques	M. MIGNOTTE	Informatique	J. WUCHER	Physique
FOATA (dét.)	Mathématiques	G. MILLOT	Géologie et Paléontologie	B. WURTZ	Chimie Biologique

PROFESSEURS ASSOCIÉS

ANDREOTTI	Mathématiques	V. ERN	Physique	C. JASCHEK	Astronomie
ANDERET	E.A.H.P.	G.L. HALLER	Chimie	J. OSBORN	Chimie Minérale
OURROUILH	Géophysique	T. HIRAI	Mathématiques	J. SMID	Physique
GAERTER	Physique				

PROFESSEURS CONVENTIONNÉS ULR : P. BOUVEROT (Physiol. Respiratoire) – P. DEJOURS (Physiol. Respiratoire).

MAITRES DE CONFÉRENCES :

J. Fr. BOUTOT	Mathématiques	T. JUTEAU	Minéralogie
Ch. BURGGRAF	Minéralogie	J. Cl. LAFON	Informat. Appliquée
H. BURNAGE	Mécan. des Fluides		

ASTRONOME ADJOINT : A. FLORSCH (Astronomie).

MAITRE DE CONFÉRENCES ADJOINT : J. SITTLER (Géologie).

MAITRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS : C. DADE (Mathématiques) – Y. NAKATANI (Chimie) – H. UMEMURA (Mathématiques).

DIRECTEURS DE RECHERCHE C.N.R.S.

J.F. BIELLMANN	Chimie	J. MARCHAL	Physicochim. Macromolécul.	A. PORTE	Biologie Cellulaire
P. BOUVEROT	Physiol. Respiratoire	P. MEYER	Mathématiques	P. REMPP	Physicochim. Macromol.
P. DEJOURS	Physiol. Respiratoire	A. J. P. MEYER	Physique	A. SKOULIOS	Physicochim. Macromol.
A. KNIPPER	Phys. Nucl. et Corpusc.	J. MEYER	Botanique	A. VEILLARD	Chimie Moléculaire
A. KOVACS	Physicochim. Macromol.	C. MIALHE	Physiologie	A. ZUKER	Physique Théorique

MAITRES DE RECHERCHE C.N.R.S.

J. Ch. ABBE	Physicochim. atomique et ionique	B. LOTZ	Physicochimie Macromoléculaire
P. ALBRÉCHT	chimie nucléaire	G. MAIRE	Chimie
F. BECK	Chimie	A. MALAN	Physiologie Respiratoire
G. BECK	Physique Nucléaire	E. MARCHAL	Physicochim. Moléculaire et Macromoléculaire
J.P. BECK	Biochimie	R. MORAND	Physique Nucléaire
R. BERTINI	Physiologie	Th. MULLER	Physique
M. BONHOMME	Physique Nucléaire	G. MUNSCHY	Physique
H. BRAUN	Géologie	M. NAUCIEL-BLOCH	Physique des Solides
M.C. CADEVILLE	Physique Corpusculaire	A. NICOLAIEFF	Virologie Végétale
H. CALLOT	Physique des Solides	M. PATY	Physique Corpusculaire
S. CANDAU	Chimie	R. PFIRSCH	Botanique
M. CHAMPAGNE	Physique	Cl. PICOT	Physicochimie Macromoléculaire
M. CHOUDHURY	Biophysique	P. POIX	Chimie
J.P. COFFIN	Physique du Globe	J. POUYET	Biophysique
A. CORET	Phys. Nucléaire et Corpusculaire	B. REES	Chimie
M. CROISSIAUX	Physique	P. REMY	Biochimie
Cl. DELLACHERIE	Physique Nucléaire	J. RINGEISSEN	Physique
D. DISDIER	Mathématiques	J.P. ROTH (ex-Directeur de l'Inst.)	Physicochimie Macromoléculaire
J. DOUBINGER	Physique Nucléaire	F. SCHEIBLING	Spectrométrie Nucléaire
S. EL KOMOSS	Géologie	N. SCHULZ	Physique Nucléaire
M. FRANCK-NEUMANN	Physique	C. SCHWAB	Physique
E. FRANTA	Chimie Organique	R. SELTZ	Physique Nucléaire
J.M. FRIEDT	Physicochimie Moléculaire	P. SIFFERT	Physique des Rayon. et Electronique Nucléaire
A. FRIDMANN	Physicochim. atomique et ionique	Cl. SITTLER	Géologie
Y. GALLOT	Physique Corpusculaire	Cl. STRAZIELLE	Physicochimie Macromoléculaire
Ph. GRAMAIN	Physicochimie Macromoléculaire	M. SUFFERT	Basses Energies
J.B. GRUN	Physicochimie Macromoléculaire	K. TRAORE	Physicochimie atomique et ionique
J. HERZ	Physique	R. VAROQUI	Physicochimie Macromoléculaire
J. HOFFMANN	Physicochimie Macromoléculaire	G. WALTER	Physique Nucléaire
G. KAUFMANN	Biologie Animale	Fr. WEBER	Géologie Nucléaire
B. KOCH	Chimie	J.P. WENIGER	Zéologie
P. LAURENT	Physiologie	J. WITZ	Biologie Cellulaire
Cl. LERAY	Physiol. comparée des régulations	R. WOLFF	Chimie
A. LLORET	Physiol. comparée des régulations	R. ZANA	Physicochimie Macromoléculaire
	Physique Corpusculaire	J.P. ZILLINGER	Physique

LISTE DES PROFESSEURS, MAITRES DE CONFÉRENCES
DIRECTEURS ET MAITRES DE RECHERCHES CNRS ET INSERM

Président : Professeur P.KARLI
Vice-Présidents : Professeur Fr.MARCOUX
Professeur J.H.WEIL
Président Honoraire : Professeur G.OURISSON
Secrétaire Général : Monsieur G.KIEHL

U.E.R. DES SCIENCES MÉDICALES

U.E.R. des Sciences Médicales : Directeur : Marc DORNER

U.E.R. des Sciences Biomédicales : Directeur : Guy VINCENDON

DOYENS HONORAIRES : A.CALLOT - J.CLAVERT - R.FONTAINE - Fr.ISCH.

PROFESSEURS HONORAIRES : J.BENOIT - J.CALLOT - R.FONTAINE - A.JUNG - Ch.KAYSER - H.METZGER - J.NORDMANN - F.SCHMID - E.SCHNEEGANS - J.SÉROR - J.STAHL - J.VEDRINE - P.VINTEMBERGER - A.WEISS - G.WINCKLER.

PROFESSEURS :

J. APROSIO	Anatomie normale	J. GRENIER	Chir.Gén.-Serv.de Consultat.	G. MAYER	Hématologie
L. ARON	Histologie	Ch. GROS	Ext.et d'Investig.Chir.	S. MAYER	Hématologie
L. ASCH	Rhumatologie	L. HOLLENDER	Electro-Radiologie	J. MEHL	Médecine du Travail
A. BASSET	Clin.Derm.et Syphiligr.	Fr. ISCH	Chir.Digest.et Gle.Srv.Chir.Gle. II	B. METZ	Physiologie appliquée
A. BATZENSCHLAGER	Anat.Pathologique	L. ISRAEL	Réed.Fonct.et Electromyographie	R. MINCK	Bactér.Virol.Immunol.Général
L. BEYER	Clin.Pédiat.et Puéricul. I	H. JAFFR	Clin.Psychiatrique	P. MULLER	Clin.Gynécol.et Obstétr. II
L. BLOCH	Pharmacologie	J. JULI	Néphrologie et Hémodialyse	R. RENAUD	Gynécologie
L. BOCKEL	Clin.Médicale B	Th. KAMMERER	Pédiat.et Puériculture	E. ROEGEL	Pneumo-Phthisiologie
L. BOLLACK	Chir.Urol.(Pav.Chir.A)	P. KARLI	Clin.Psychiatrique	A. ROHMER	Service de Pédiatrie II
L. BRINI	Clin.Ophthalmologique	B. KELLER	Neurophysiologie	Fr. ROHMER	Clin.Neurologie
L. BRONNER	Clin.Ophthalmologique	J. KEMPF	Gyn.et Obstétrique II	J. RUCH	Biologie Médicale
L. BUCK	Clin.Chir.des Enfants	R. KIENY	Orth.et Traumatologie	Y. RUMPLEN	Embryologie
L. BURGHARD	Pneumo-Phthisiologie	A. KIRN	Pathol.Clin.Séméol.Chirurgicales	G. SCHAFF	Physiologie
L. CHAMBRON	Chimie biologique	J.G.KORITKE	Virologie	E. SCHVINGT	Orthopéd.et Traumatologie
L. CHAMPY	Physique biologique	M. KREMER	Anatomie normale	J. SCHWARTZ	Pharm.et Méd.Expérim.
L. CHAUMONT	Stom.et Chir.Max.Faciale	J. LAVILLAUREIX	Parasit.et Pathol.Tropicale	A. SIBILLY	Urgence et Polyclinique
L. CLAVERT	Méd.Légale et Sociale	Y. LE GAL	Méd.Prév.et Hygiène	L. SINGER	Clin. Psychiatrique
L. DORNER	Embr.et Morph.Expér.	J.M.LEVY	Anatomie Pathologique	Fr. STEPHAN	Pathol.Gén.et Expérim.
L. EBTINGER	Clin. Méd. B	P. MANDEL	Institut de Puériculture	G. VINCENDON	Chimie biologique
L. FORSTER	Clin. Psychiatrique	J.M.MANTZ	Chimie biologique	R. VOEGTLIN	Thérapeutique (cardiologie)
L. FORSTER	Clin. Chir. Gén. A	Fr. MARCOUX	Réanimation Médicale	J. WARTER	Clin. Médicale A
L. GANDAR	Clin.Gynécol.et Obstétr. I	J. MARESCAUX	Médecine du Travail	P. WARTER	Electro-Radiologie
L. GAUTHIER-LAFAYE	Anesthésiologie	Ch. MARX	Histologie	J.P. WEILL	Hydrof.Thérapeut.et Climatol.
L. GREINER	Clin.Oto-Rhino-Laryngol.		Physiologie	J.P. WITZ	Chirurgie Thoracique

PROFESSEUR ASSOCIÉ : V. HOENIG Médecine Interne (Clinique Médicale B)

MAITRES DE CONFÉRENCES ASSOCIÉS

A. ADLOFF	Chirurgie générale	J. HERAN	Pathol. Expérimentale	J.C. OÏTENI	Anesthésiologie
L. BABIN	Orthopédie et Traumat. I	J.L. IMBS	Pharmacologie	E. PHILIPPE	Anatomie Pathologique
L. BLOCH	Electro-Radiologie	M. IMLER	Clinique Médicale B	P. REVILLE	Endocrin.Métabol.et Nutrition
B. BRECHENMACHER	Cardiologie	A. JAEGER	Réanimation Médicale	P. REYS	Chirurgie Générale
M. BROGARD	Clin. Médicale B	M. JESEL	Réeduc. Fonctionnelle	J. RITTER	Clin.Gynécol.et Obstétr. I
L. BUCHHEIT	Neurochirurgie	P. KEHR	Orthop. et Traumatologie	M. ROOS	Embryologie
L. COLLARD	Neurologie	R. KEILING	Cancérologie	A. SACREZ	Cardiologie
L. CONRAUX	Clin.Oto-Rhino-Laryngol.	F. KEMPF	Electro-Radiologie	P. SAUVAGE	Clin.Chirurgie.des Enfants
L. DAUCHEL	Serv.Consult.Ext.et d'Invest. Q	J. KEMPF	Chimie Biologique	G. SAVA	Chirurgie Générale II
L. DELLENBACH	Clin. Gynécologique II	T. KIEN TRUONG	Parasitologie	G. SCHLAEDER	Gynécol.et Obstétr. I
L. EISENMANN	Chir. Cardio-Vasculaire	F. KUNTZMANN	Médecine Interne	H. SICK	Anatomie Normale
L. FABRE	Histologie	D. KURTZ	Clin. Neurologique	C. STOLL	Inst.de Puériculture
L. FINCKER	Clin. Médicale B	G. LANG	Orthop. et Traumatologie	D. STORCK	Clinique Médicale A
L. GEISERT	Pédiatrie et Puéricult. III	J. MARK	Chimie Biologique	J.D. TEMPE	Réanimation Médicale
L. GERHARD	Clin. Ophthalmologique	G. METHLIN	Physique Biologique	J. TONGIO	Electro-Radiologie
L. GROSSHANS	Clin. Dermatologique	C. MEYER	Chirurgie Générale III	A. WACKENHEIM	Electro-Radiologie
L. HABEREY	Physiologie	G. MORAND	Chirurgie Thoracique	J.P. WALTER	Electro-Radiologie
L. HEALY	Physique Biologique	C. NAUCIEL	Bactériologie	D. WILLARD	Serv.de Pédiatrie IV
		F. OBERLING	Clin.des Maladies du Sang		

RECTEUR DE RECHERCHE - Professeur Conventionné ULP : A. PETROVIC * Physiologie

MAITRES DE RECHERCHE

R. ELOY *	Endocrinologie	M. JACOB*	Neurochimie	J.J. VOGT*	Thermophysiology
G. GOMBOS*	Biologie	R. RECHENMANN*	Biophysique des Rayonnements	A. WAKSMANN*	Neurochimie
H. HAFFEN-STENGER*	Endocrinologie	M. SENSENBRENNER*	Neurochimie		

U.E.R. D' ODONTOLOGIE

Directeur Robert FRANK

PROFESSEURS DE GRADE EXCEPTIONNEL

M. DOCQ Dentisterie Opératoire | R. FRANK Biol et Matières fondamentales | P. KLEWANSKY Parodontologie

PROFESSEURS DE PREMIER GRADE

M. BASTIAN Prothèse | J.L. LACOSTE Orthopédie dento-faciale | J. LITZLER Prothèse
A. COMTE Dentisterie Opératoire | M. LANGER Prothèse | P. NICOLAS Pathol. et Thérap. Den
R. HAAG Pathol. et Thérap. Dentaires

PROFESSEURS DE DEUXIEME GRADE

C. ALLEMANN Dentisterie opératoire | J.P. CHARLIER Orthopédie dento-faciale | J.J. ROTH Parodontologie
O. BOLENDER Orthopédie dento-faciale | B. KAESS Pathol. et Thérap. Dentaires | A. SCHLIENGER Prothèse
P.M. CAHEN Biol. et Matières Fondamentales | M. LEIZE Prothèse | J. SOMMERMATER Pédodontie préventive

U.E.R. DES SCIENCES PHARMACEUTIQUES

Directeur André LEDOUX

DOYENS HONORAIRES : P. DUQUENOIS - M. HASSELMANN - G. DIRHEIMER.

PROFESSEURS HONORAIRES : P. CORDIER - J.P. EBEL - G. GAZET du CHATELIER - P. JAEGER - R. SARTORY.

PROFESSEURS

G. DIRHEIMER Toxicologie | C. LAPP Chimie Générale et Minérale | Ph. POINDRON Virologie
G. FERARD Chimie biologique | G. LAUSTRIAT Physique | J. SCHREIBER Chimie Organique
M. HASSELMANN Chim. Anal. et Bromatol. | A. LEDOUX Parasitologie | A. STAHL Biochim. Pharmaceut.
L. JUNG Pharmacie Chimique | J. MALGRAS Immunologie | J.C. STOCLET Pharmacodynamie
H. LAMI Mathématiques | C. MATHIS Pharmacie Galénique | C.G. WERMUTH Chimie Organique
P. LAUGEL Chimie Analytique | P. METAIS Biochimie

MAITRES DE CONFÉRENCES AGRÉGÉS

R. ANTON Pharmacognosie | A. GAIRARD Physiologie | A. STAMM Pharmacie Galénique
R. CARBIENER Botanique | Y. LANDRY Pharmacologie | D. VIDOM Bactériologie

MAITRE DE RECHERCHES I.N.S.E.R.M. : J. BIETH (Enzymologie).

U.E.R. DE SCIENCES HUMAINES

U.E.R. de Géographie : Directeur : Henri NONN

U.E.R. des Sciences du Comportement et de l'Environnement : Directeur : Michel TARDY

PROFESSEUR HONORAIRE : Et. JUILLARD

PROFESSEURS

P. MICHEL Géographie | H. NONN Géographie | Ph. ROPARTZ Psycho-physiologie
A. MOLES Psychologie sociale | R. RAYNAL Géographie | J. TRICART Géographie

MAITRES DE CONFÉRENCES : H. REYMOND Géographie | M. TARDY Psycho-pédagogie
A. TABOURET-KELLER Psychologie | H. VOGT Géographie

MAITRES DE CONFÉRENCES CONVENTIONNÉS ULP : P. CAHN (Psychologie).

MAITRE DE RECHERCHE C.N.R.S. : S. RIMBERT (Géographie).

U.E.R. DE SCIENCES ÉCONOMIQUES

Directeur : Rodolphe DOS SANTOS FERREIRA

DOYEN HONORAIRE : J.P. FITOUSSI.

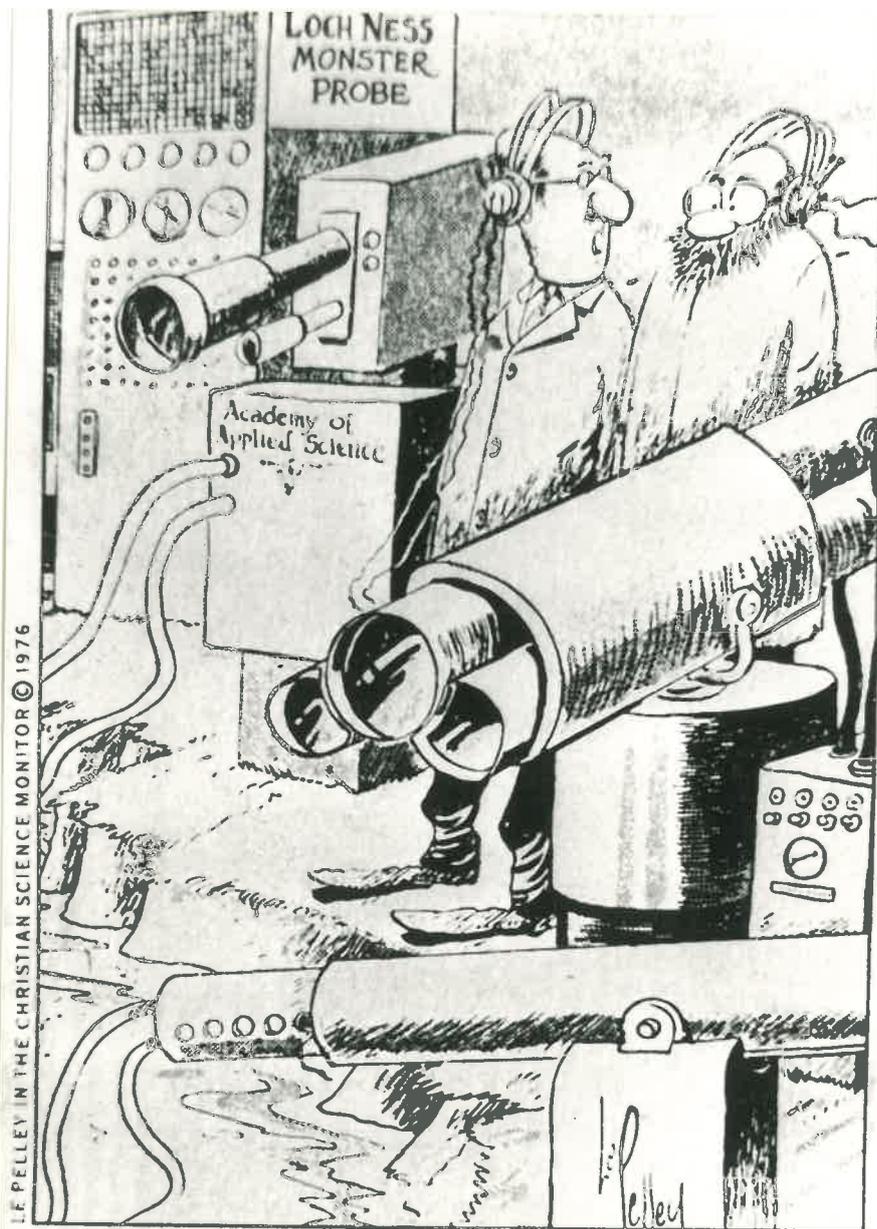
PROFESSEURS

Ph. ARTZNER Mathématiques | P. CHAMLEY Sciences Economiques | P.L. REYNAUD Sciences Economiques
Fr. BILGER Sciences Economiques | J.P. FITOUSSI Sciences Economiques | D. VITRY Sciences Economiques
A. CHABERT Sciences Economiques | J.J. OBRECHT Gestion

PROFESSEUR ASSOCIÉ : N. GEORGESCU-ROEGEN (Sciences Economiques).

MAITRES DE CONFÉRENCES AGRÉGÉS : R. DOS SANTOS FERREIRA (Sciences Economiques) - J.P. POLLIN (Sciences Econ.)

CHARGÉ DE COURS : J.L. GAFFARD (Sciences Economiques).



"I don't care what we prove.
I still believe in the monster . . ."

à Charles et Maryse

à Amélie FIES

" grâce a qui je sais tout...."

AVANT-PROPOS

C'est à Gérard MONNIER que je dois mon ouverture à ce domaine de la connaissance qu'est la recherche, grâce à son enthousiasme quotidien pour le travail que j'ébauchais alors, à son soutien constant devant les difficultés que je rencontrais.

Ses incitations clairvoyantes à prendre du recul, à envisager les limites mais aussi les différentes facettes de mon thème de recherche m'ont permis à tout moment de cheminer dans un climat de sérénité et de liberté.

Pour tout ce qu'il m'a offert et qui déborde largement le seul plan scientifique, je le remercie..

Le mémoire que je présente ici est composé d'un ensemble d'éléments dégagés sur une période de dix ans. J'exprime ma chaleureuse reconnaissance à tous ceux qui ont nourri ma réflexion :

Monsieur le Professeur HENIN, pour les heures décisives passées sur les lois d'association de particules et qui a ainsi donné l'impulsion première à ce travail;

Alain FAURE, pour son apport essentiel dans l'interprétation géométrique de ces lois et les longs calculs qu'il a effectués

Pierre STENGEL, avec qui j'ai pu poser les bases d'un modèle de retrait des matériaux terreux au cours de séances de travail passionnantes.

Je n'oublierai pas non plus la flegmatique dextérité de Claude JEANDET qui a réalisé toutes les mesures, l'efficacité de Michel BOUPLET et de l'équipe des travaux extérieurs de la station de Science du Sol dans l'organisation du prélèvement des échantillons naturels, ni l'aide du S.E.S de Montpellier pour la localisation des sites.

Je remercie également tous ceux qui m'ont aidé à Versailles d'abord, puis à Avignon, en particulier Nicole SOUTY, Jérôme GUERIF, Roger GUENNELON, Bernard CABIBRI et toute l'équipe du secrétariat.

Enfin, j'espère que l'heureuse collaboration commencée avec Jean SERRA dans le domaine de l'analyse d'image, se développera dans les années à venir

Monsieur le Doyen G. MILLOT a bien voulu m'offrir l'hospitalité en acceptant que ce mémoire soit présenté à l'Université Louis Pasteur de Strasbourg : Je lui adresse l'expression de ma profonde gratitude. Qu'il soit également remercié de l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le Jury de ma thèse.

Monsieur le Professeur HENIN et Monsieur J. CHAUSSIDON Chef du Département de Science du Sol à l'Institut National de la Recherche Agronomique ont bien voulu relire mon texte et l'enrichir de leurs critiques. Je les remercie de cette aide précieuse et efficace.

Monsieur G. BOCQUIER Professeur à l'Université de Paris VII a accepté de faire partie du Jury. Je le remercie pour l'intérêt qu'il a porté à mes travaux. Que Monsieur le Professeur J. LUCAS soit aussi remercié d'avoir bien voulu s'intéresser à ce travail.

L'accueil attentif que nous avons toujours trouvé auprès de G. MILLOT et de son équipe, l'efficacité d'Hélène PAQUET à régler les problèmes administratifs sont les gages sûrs d'une collaboration que je souhaite très longue avec l'Institut de Géologie de Strasbourg.

LISTE DES SYMBOLES

A	Teneur pondérale en argile (en %).
B, b	Respectivement volume de solide de grosses et de petites particules dans un mélange encombrant 1 cm^3 .
B', b'	Volumes chassés d'un mélange.
B _o	Volume de solide de grosses particules encombrant 1 cm^3 .
b _o	Volume de solide de petites particules encombrant 1 cm^3 .
d	Epaisseur d'argile (modèle de retrait).
D _e	Diamètre équivalent d'une classe de particules, en microns.
D ₂ , D ₁	Ouvertures de tamis.
E	Taux de participation de la phase argileuse à l'enrobage des particules du squelette.
G	Teneur pondérale en grosses particules, (pour 1 gramme).
g	Teneur pondérale en petites particules (pour 1 gramme).
n, p, q,	Nombres entiers (modèle géométrique)
I	Gain de solide, par rapport à l'additivité, résultant spécifiquement du mélange de particules.
i _{ad} , i _{rs}	Différences relatives de porosité par rapport à la loi d'additivité, aux lois de remplissage-substitution.
L	Distance entre les centres de deux sphères (modèle de retrait).
l	Largeur de fissure (modèle de retrait).
m	Paramètre du modèle numérique.
N	Nombre de particules.
Π	Porosité

$n_{ad, re, su, rs}$	Porosité calculée (additivité, remplissage, substitution ou remplissage-substitution).
R, r	Rayons.
f	Retrait.
S	Teneur pondérale en squelette en %.
t	Rapport du diamètre équivalent de grosses particules ou diamètre équivalent de petites particules.
T	Taux d'encombrement par l'argile du volume non occupé par le squelette dans un mélange, en %.
U	Paramètre du modèle numérique.
V	Volume de solide total encombrant 1 cm^3 .
V_{ad}, V_{re}, V_{su}	Volume de solide calculé (additivité, remplissage, substitution).
V_*	Volume de solide calculé avec le modèle numérique.
v_s	Volume de solide dans un volume élémentaire donné
v	Volume encombré par la phase argileuse, (enrobage), ou volume élémentaire (retrait).
W	Teneur pondérale en eau, en %.
W_i	Teneur pondérale en eau à laquelle apparaît une phase lacunaire, en %.
W^a	Teneur pondérale en eau, de la phase argileuse, en %.
v^e	Volume encombré par la phase argileuse en enrobage.
v_e^s	Volume des sphères enrobées.
$\alpha \beta$	Coefficients de perturbation (substitution, remplissage).
$\bar{\gamma}_d$	Densité d'un assemblage de particules, d'un massif terreux.
$\bar{\gamma}_d^{Bo}, \bar{\gamma}_d^{bo}$	Densités caractéristiques d'un assemblage de grosses ou de petites particules.
$\bar{\gamma}_d^a$	Densité de la phase argileuse

$\bar{\gamma}_s$ Densité de solide

$\bar{\gamma}_s^s, \bar{\gamma}_s^a$ Densités de solide de squelette ; d'argile.

ρ_s, ρ_d Masses volumiques de solide, d'assemblage de particules, en kilogramme par mètre cube.

ρ_w Masse volumique de l'eau.

U Volume massique.

P L A N

Introduction

I <u>Etude expérimentale de la porosité de mélanges de particules inertes.</u>	1	à 76
Introduction	1	
1 <u>Réalisation de modèles expérimentaux.</u>	2	à 3
1.1. Caractéristiques des particules.	2	
1.1.1. Diamètre équivalent.	3	
1.1.2. Degré de calibrage	3	
1.1.3. Densité de solide.	3	
1.2. Caractéristiques des mélanges binaires	3	
2 <u>Méthode d'étude</u>	4	à 8
2.1. Porosité d'arrangement	4	
2.2. Détermination de la densité sur des matériaux meubles.	5	
2.2.1. Mode de remplissage du volume de mesure.	5	à 6
2.2.2. Volume du récipient de mesure.	7	
2.2.3. Homogénéité du mélange	8	
3 <u>Présentation des résultats.</u>	9	à 11
4 <u>Recherche des lois d'association de particules.</u>	11	à 22
4.1. Loi d'additivité	12	à 14
4.1.1. Analyse des résultats expérimentaux par différence relative de porosité par rapport à l'additivité.	15	à 16
4.2. Lois complémentaires de substitution et de remplissage	17	
4.2.1. Lois de remplissage.	17	à 18

4.2.2. Loi de substitution	19 à 21
4.2.3. Analyse des résultats expérimentaux par différence relative de porosité par rapport aux lois de substitution et de remplissage.	21
4.2.4. Cas d'un mélange à valeur élevée de t	22
5 <u>Conclusions</u>	23
6 <u>Modèles de prévision de la porosité de mélanges</u>	24 à 39
6.1. Modèles de substitution et de remplissage avec perturbation	24 à 27
6.2. Modèle numérique continu	27
6.2.1. Expression du terme interaction.	28
6.2.2. Etude de la fonction proposée.	29
6.2.3. Détermination des paramètres.	30
6.2.4. Application aux mélanges binaires de particules.	31 à 32
6.2.5. Relation entre les paramètres du modèle numérique et le rapport de taille.	33 à 34
6.3. Discussion des approches réalisées par différents auteurs.	34 à 39
7 <u>Conclusions</u>	39 à 40
8 <u>Interprétation géométrique des lois d'association de particules</u>	41 à 76
8.1. Présentation du problème	41
8.2. Principe de la démarche.	42 à 46
8.3. Domaine de substitution.	46
8.3.1. Etude d'un premier cas de figure	46
8.3.1.1. Axes de référence et coordonnées des centres des sphères.	46 à 48

8.3.1.2. Conditions de coexistence des sphères.	48
8.3.1.3. Volume élémentaire	49 à 51
8.3.1.4. Porosité du volume élémentaire et sa variation .	51 à 54
8.3.2. Données obtenues	54
8.3.2.1. Cas général.	55 à 59
8.3.2.2. Cas particulier du calibrage	59 à 61
8.3.3. Porosité du volume élémentaire et position de la sphère R.	62 à 64
8.3.4. Conclusions.	64
8.4. Domaine de transition.	65
8.4.1. Définition du modèle dans le domaine de transition	65 à 68
8.4.2. Etude d'un cas de mélange.	68
8.4.3. Conclusions.	69
8.5. Domaine de remplissage	69
8.6. Application à quelques images de massifs de micro- billes	70 à 73
8.7. Conclusions.	73 à 76

II	<u>Etude expérimentale de mélanges de particules contenant une phase active.</u>	77 à 136
	Introduction.	77 à 78
1	<u>Matériel expérimental</u>	79 à 80
1.1.	Les squelettes.	79
1.2.	La fraction argileuse	80
2	<u>Méthode d'étude</u>	80 à 89
2.1.	Protocole de préparation des mélanges	80 à 81
2.2.	Critères d'homogénéité.	82
2.3.	Mesure de la densité texturale des échantillons	83
2.3.1.	Mesure de volume.	83
2.3.2.	Estimation de la réalisation d'une structure continue.	84
2.3.3.	Limites propres à la technique de mesure.	85 à 88
2.4.	Conclusions	89
3	<u>Présentation des résultats</u>	89 à 97
3.1.	Les porosités texturales.	89 à 92
3.2.	Comparaison des courbes de porosité	92
3.2.1.	Valeurs comparées des différences relatives de porosité entre les valeurs observées et les valeurs calculées sur la base de la loi d'additivité.	92
3.2.2.	Valeurs comparées des différences relatives de porosité entre les valeurs observées et les valeurs calculées sur la base des lois complémentaires de remplissage et de substitution.	93

3.2.3. Discussion.	94
3.2.4. Densité après malaxage.	95 à 96
3.3. Conclusions	97
<u>4 Description de l'organisation des phases argile- squelette.</u>	<u>98 à 106</u>
4.1. Commentaire sur les manifestations de la perturba- tion dans les mélanges argile-squelette	98 à 99
4.2. Recherche d'un modèle de disposition relative de la phase argileuse et du squelette.	100
4.2.1. Méthode de calcul	101 à 102
4.2.2. Application aux mélanges.	103
4.3. Etude qualitative sur lame mince.	104 à 105
4.4. Etude quantitative sur lame mince	106
<u>5 Etude des facteurs de l'organisation des constituants dans les mélanges.</u>	<u>107 à 127</u>
5.1. Mode opératoire	107
5.2. Résultats	108
5.3. Interprétation.	109
5.3.1. Modèle de fissuration	109 à 111
5.3.2. Remarques	112
5.4. Courbes théoriques de retrait avec fissuration. . .	113
5.4.1. Position du problème.	113
5.4.2. Principe du calcul du volume massique dans le modèle de retrait avec fissuration.	114 à 118
5.4.3. Etude de trois cas de figure pour l'arrangement des grains du squelette dans la pâte argileuse. .	118
5.4.3.1. Organisation cubique.	118 à 119

5.4.3.2. Organisation orthorhombique	120 à 121
5.4.3.3. Organisation rhomboédrique	122 à 123
5.4.3.4. Expression du volume massique	124
5.4.4. Confrontation aux résultats expérimentaux	125
5.4.5. Conclusions	126 à 127
6 <u>Généralisation de la notion de porosité texturale.</u>	127 à 135
6.1. Méthode d'étude	129
6.1.1. Choix des matériaux	129
6.1.2. Estimation de la densité texturale des échan- tillons naturels	129
6.1.3. Protocoles de préparation des éprouvettes de terre	130
6.2. Résultats et discussion	131
6.2.1. Echantillons soumis au ressuyage standard	132 à 134
6.2.2. Echantillons soumis au ressuyage modulé	135
6.3. Conclusions	136
<u>Conclusions générales</u>	137 à 139

GLOSSAIRE.

Densité : -notée $\bar{\gamma}_s$ quand il s'agit de la densité de solide, elle dépend de la nature minéralogique des constituants du sol.

-notée $\bar{\gamma}_d$ quand il s'agit de la densité résultant de l'assemblage des constituants ou d'ensembles des constituants des sols.

Dans le présent travail, on parlera de densité texturale, les mesures effectuées visant à prendre en compte le seul niveau d'assemblage dépendant des constituants eux mêmes et à éliminer les niveaux d'assemblage appartenant au domaine de la structure du sol.

La densité est un nombre sans dimension. C'est la valeur du rapport d'une masse volumique à la masse volumique de l'eau, soit :

$$\gamma_s = \frac{\rho_s}{\rho_w} \quad ; \quad \gamma_d = \frac{\rho_d}{\rho_w}$$

où ρ_s = masse volumique de solide, ρ_d = masse volumique d'un assemblage., ρ_w = masse volumique de l'eau.

Porosité : - Un assemblage de particules solides présente généralement un espace poral ménagé entre les particules. En conséquence, le volume de l'assemblage, ou volume encombré, est supérieur à la somme des volumes propres à chaque particules, c'est à dire au volume occupé par la phase solide. La porosité , notée Π , permet de caractériser quantitativement l'espace poral d'un matériau et s'exprime par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{\text{volume encombré} - \text{volume occupé}}{\text{volume encombré}}$$

soit, en termes de densité :

$$\eta = 1 - \frac{\bar{\gamma}_d}{\gamma_s}$$

Si $\bar{\gamma}_d$ représente la densité texturale, la porosité correspondante sera appelée porosité texturale.

INTRODUCTION GENERALE

Tous les efforts de mise au point de l'analyse granulométrique ont visé à disposer de références objectives pour caractériser les matériaux terreux.

Il est apparu, par la suite, que la prévision des comportements du sol n'était pas toujours possible avec ces seules références, en particulier quand les relations utilisées supposaient la proportionnalité entre le niveau d'une propriété et la teneur ou la surface d'une ou de plusieurs classes de composants.

En fait, il existe des comportements qui relèvent d'un effet global dû à l'association de particules de tailles différentes. Cet effet, les agronomes et les physiciens du sol l'appellent "effet texture", ce terme exprimant qu'il s'agit d'un effet lié à la manière dont les constituants d'un ensemble sont associés.

"Il apparaît en effet que l'assemblage d'un ensemble de particules de tailles très variées ne s'effectue pas toujours de la même façon : à une composition granulométrique donnée correspond un certain mode de disposition relative des constituants et quand on passe à une autre composition un nouveau mode de disposition peut apparaître compte tenu au moins des relations stériques s'établissant entre les particules".

Ces conclusions de HENIN (1967) tirées des travaux de MONNIER et KHEYRABI montrent que l'on peut en effet rapprocher les notions de composition granulométrique et de texture.

L'étude qui est présentée ici a pour objet d'établir précisément les relations entre ces deux notions. Les conséquences de l'effet texture sont multiples. Nous avons choisi pour les étudier de situer notre travail au niveau de l'espace poral du sol.

En effet, les propriétés physiques qui commandent les conditions de température, d'aération, de circulation et de stockage de l'eau, d'implantation et de fonctionnement du système racinaire des végétaux se rattachent plus ou moins directement aux caractéristiques de l'espace poral.

Pour caractériser cet espace poral nous avons retenu comme paramètre la porosité. C'est à travers la variation de ce paramètre en fonction de la granulométrie que nous envisagerons les manifestations de l'effet texture.

Ce paramètre est certes très global et relativement aveugle vis à vis des aspects de l'organisation mais il n'est pas lié à la mesure d'une propriété particulière pour laquelle en outre la fraction de la porosité prise en compte risque de varier en fonction de la granulométrie du matériau.

Pour répondre au caractère nécessairement global d'un tel paramètre, le choix des conditions expérimentales a visé à ne prendre en compte que des systèmes homogènes répondant au critère de structure continue des pédologues. Nous avons donné à la porosité mesurée à ce niveau le nom de porosité texturale en ce sens qu'elle ne dépend que de l'assemblage des constituants du sol.

Nous avons cherché à dégager sur des systèmes simples les relations entre porosité et composition granulométrique. Ces systèmes sont d'une part constitués de particules dites "inertes", d'autre part de mélanges contenant une phase "active" correspondant à des phyllites.

Pour l'analyse des relations dégagées expérimentalement, des modèles d'organisation ont été utilisées. Nous avons envisagé dans quelle mesure les résultats obtenus avec ces modèles s'appliquaient à des systèmes artificiels de plus en plus complexes et enfin à des sols naturels.

I - ETUDE EXPERIMENTALE DE LA POROSITE DE MELANGES DE PARTICULES INERTES

INTRODUCTION

Pour préciser les relations entre la granulométrie des particules et leur assemblage, le cas idéal eut été de disposer de particules isodimensionnelles, ces dimensions se répartissant suivant la gamme rencontrée dans la granulométrie des sols.

Par ailleurs, il était indispensable que leur forme soit la même pour empêcher toute particularité de ce facteur.

En pratique, nous avons réalisé des classes où la taille des particules varie dans un intervalle donné. Par ailleurs, nous avons principalement utilisé des microbilles de verre dont la forme, proche de la sphère, et la qualité de surface, relativement lisse, se sont avérées à l'observation tout à fait comparables d'une dimension à l'autre. Ces particules étaient de plus disponibles pour des tailles allant de celle des limons grossiers à celle des sables grossiers. Pour situer ce groupe de constituants par rapport aux matériaux naturels, nous avons également utilisé des particules d'origine naturelle dont les formes sont beaucoup plus variées.

A partir des classes de particules, nous avons réalisé par mélange, des massifs poreux meubles dont les constituants présentent une certaine distribution dimensionnelle. Pour permettre l'analyse de ces systèmes, nous nous sommes limité au cas d'une distribution bimodale et nous avons fait varier dans chaque mélange binaire la quantité relative de chaque constituant.

Après avoir présenté les caractéristiques des matériaux utilisés, nous envisagerons les problèmes liés au protocole de préparation des massifs poreux et à la mesure de leur volume, nécessaire au calcul de la porosité.

1 - REALISATION DE MODELES EXPERIMENTAUX

Les matériaux utilisés seront caractérisés du point de vue de leur dimension, de leur étalement granulométrique et de leurs densités.

1.1. Caractéristiques des particules

Les constituants retenus se situent dans une gamme de taille supérieure à 20 microns, les séparations par classes de taille ont toutes été réalisées par tamisage.

Au tableau (1) sont présentées les valeurs des paramètres dont nous allons donner les définitions.

1.1.1. Diamètre équivalent

Il s'agit ici d'une donnée synthétique calculée permettant de caractériser, par un chiffre, une population de particules.

Pour son évaluation, nous avons admis que la répartition pondérale de particules par unité de diamètre est constante dans l'intervalle considéré. Il est évident que cette hypothèse de distribution a d'autant plus de chance d'être vérifiée que l'intervalle D_2, D_1 choisi sera étroit. Elle conduit à la relation suivante, (OSTY in HENIN 1976) :

$$De = \frac{D_2 - D_1}{\text{Log} \frac{D_2}{D_1}}$$

Dans cette relation D_2 et D_1 représentent respectivement la limite supérieure et inférieure des ouvertures de tamis.

1.1.2. Degré de calibrage

Nous appellerons le rapport D_2/D_1 le degré de calibrage. Afin de juger de l'influence de l'imprécision de la distribution propre à chaque classe de particules, deux niveaux de calibrage ont été retenus, caractérisés respectivement par une valeur moyenne du rapport, voisine de 1,13 correspondant à un calibrage serré et de 4 correspondant à un calibrage plus lâche.

1.1.3. Densité de solide

Nous appellerons volume de solide le volume occupé par une ou plusieurs particules (Figure 1). Le rapport du poids sec de particules à leur volume de solide représente la masse volumique de solide ρ_s . La densité de solide, $\bar{\gamma}_s$, est donnée par le rapport de γ_s à la masse volumique de l'eau, soit :

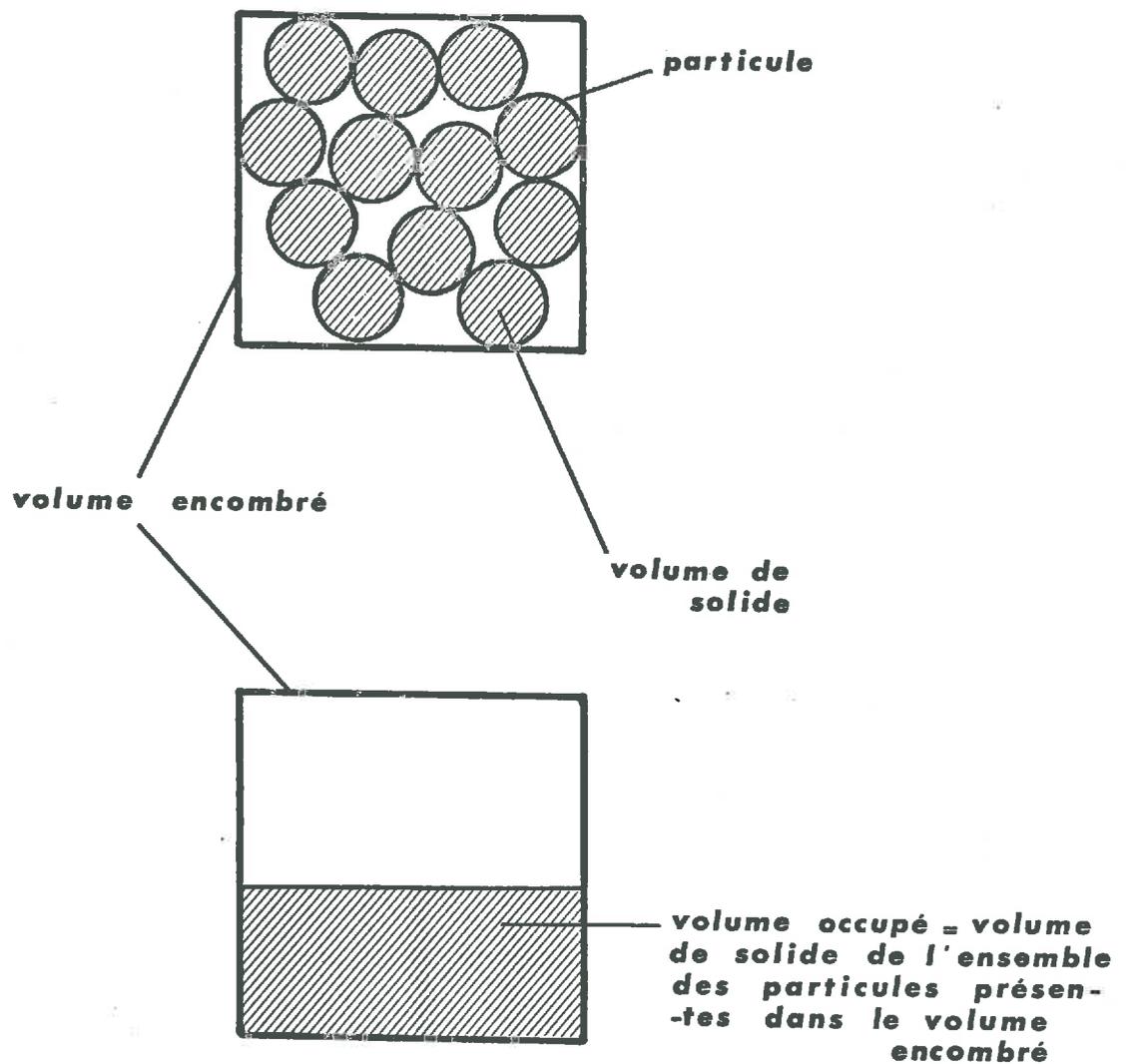
$$\bar{\gamma}_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

Pour les matériaux d'origine naturelle, ici essentiellement constitués de quartz, les valeurs de $\bar{\gamma}_s$ présentent une variation relativement faible autour d'une valeur moyenne de 2,66. Par contre, les variations mesurées sur les microbilles se révèlent importantes, les valeurs extrêmes étant respectivement voisines de 2,3 et 2,8. Ces variations peuvent, pour une part, être dues à des compositions différentes des verres dont sont issues ces microbilles. En ce qui concerne les plus petites tailles, les valeurs très faibles de $\bar{\gamma}_s$ ont pu être reliées à la présence d'inclusions gazeuses visibles à la binoculaire dans ces microbilles.

1.2. Caractéristiques des mélanges binaires

Chaque série de mélanges binaires est caractérisée par la valeur t du rapport des diamètres équivalents des classes en présence, le diamètre équivalent le plus fort étant placé en numérateur (D_e/d_e).

Une représentation des populations participant aux mélanges (figure 2) montre qu'il n'y a en pratique jamais recouvrement des granulométries propres à chacune des deux classes.



① REPRESENTATION DES VOLUMES RESULTANT D'UNE PART DE L'ARRANGEMENT DES PARTICULES (VOLUME ENCOMBRE), D'AUTRE PART DU VOLUME DE SOLIDE DES PARTICULES (VOLUME OCCUPE).

2 - METHODE D'ETUDE

2.1. Porosité d'arrangement

La caractérisation, en terme de porosité, de chacun des mélanges dans chaque série implique, comme nous allons le voir, que soit mesuré le volume encombré par les particules mélangées.

Nous appellerons volume encombré (Figure 1) le volume qui circonscrit un ensemble de particules. Ce volume est lié au mode d'arrangement des particules. La masse volumique d'un ensemble de particules, ρ_d est définie par le rapport du poids sec de particules au volume qu'elles occupent.

La densité $\bar{\gamma}_d$ est comme précédemment définie par rapport à la masse volumique de l'eau :

$$\bar{\gamma}_d = \frac{\rho_d}{\rho_w}$$

Le rapport de la masse volumique ρ_d des particules à leur masse de solide ρ_s représente la fraction du volume encombré unitaire qui est occupée par la phase solide.

La porosité, Π , de cet ensemble de particules correspond alors au complément à 1 de la valeur de ce rapport. Exprimée en p. cent, cette relation s'écrit :

$$\Pi = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s}\right) \cdot 100$$

ou encore :

$$\Pi = \left(1 - \frac{\bar{\gamma}_d}{\bar{\gamma}_s}\right) \cdot 100$$

On remarquera que dans ces expressions, la densité de solide est celle d'un mélange de particules dont les densités de solide respectives peuvent être différentes.

La densité du mélange va donc varier selon la proportion des constituants.

Soit G la teneur pondérale en particules de densité $\bar{\gamma}_{s1}$.

$$G = \frac{\text{poids des particules considérées}}{\text{poids total de particules dans le mélange}}$$

La teneur g en particules de densité $\bar{\gamma}_{s2}$ est donc égale à

$$g = 1 - G$$

En écrivant que le volume de solide total est la somme des volumes de solide de chaque classe de particules, l'expression de la densité de solide d'un mélange est, après simplification, :

$$\bar{\gamma}_s = \frac{\bar{\gamma}_{s1} \cdot \bar{\gamma}_{s2}}{G \cdot \bar{\gamma}_{s2} + g \cdot \bar{\gamma}_{s1}}$$

2.2. Détermination de la densité sur des matériaux meubles

Le principe de la détermination de la densité est simple. Il suffit de mesurer le poids d'un matériau donné encombrant un récipient de volume connu.

La réalisation de cette mesure soulève cependant quelques questions, en particulier celle du mode du remplissage du récipient, celle du choix du volume de mesure et celle de l'homogénéité du mélange.

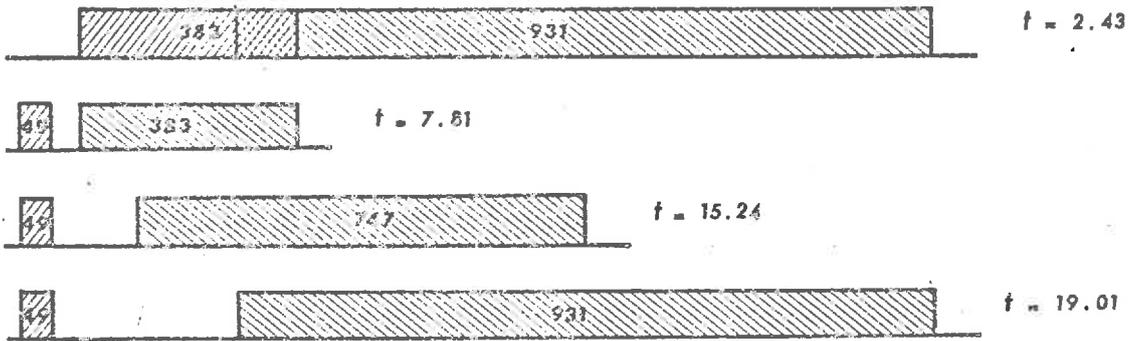
2.2.1. Mode de remplissage du volume de mesure.

Dans la mesure où nous désirons mettre en évidence des effets d'interactions stériques entre particules, il est nécessaire de minimiser dans l'échantillon toute porosité liée au seul mode de dépôt, en

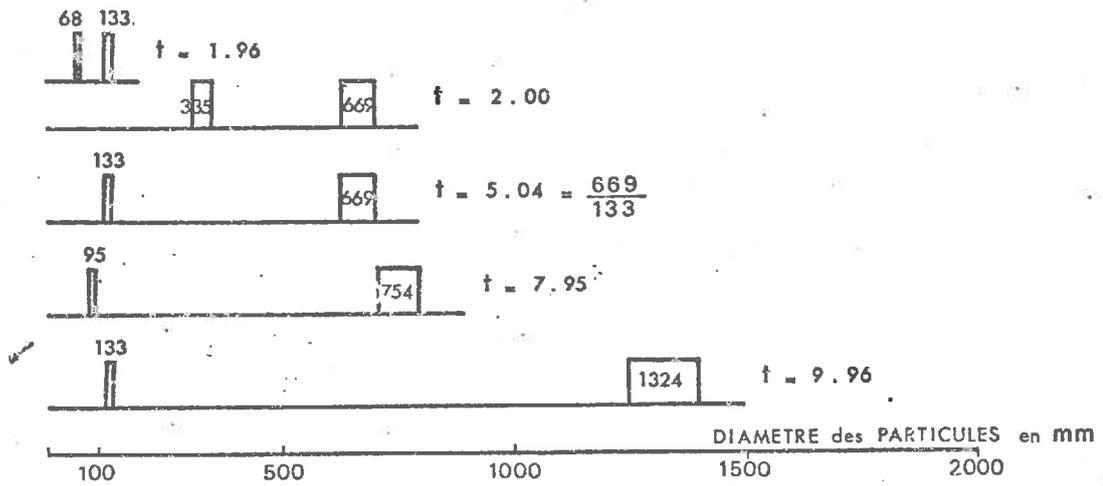
	D_2, D_1 intervalle de tamisage en microns	Degré de calibrage D_2/D_1	D_e , diamètre équivalent,	Densité de solide $\bar{\gamma}_s$
Microbilles de verre	73 - 63	1,16	68	2,299
	100 - 90	1,11	95	2,584
	141 - 125	1,13	133	2,631
	355 - 315	1,13	335	2,696
	710 - 630	1,13	669	2,529
	800 - 710	1,13	754	2,690
	1400 - 1250	1,12	1324	2,640
	2000 - 500	4,00	931	2,680
	1250 - 280	4,46	747	2,780
	630 - 160	3,94	383	2,690
100 - 30	3,33	49	2,440	
Matériaux naturels (quartz)	2000 - 1250	1,33	1738	2,669
	620 - 500	1,24	558	2,660
	180 - 160	1,13	170	2,659
	63 - 50	1,26	56	2,667

Tableau 1 CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES DANS LES MELANGES
BINAIRES

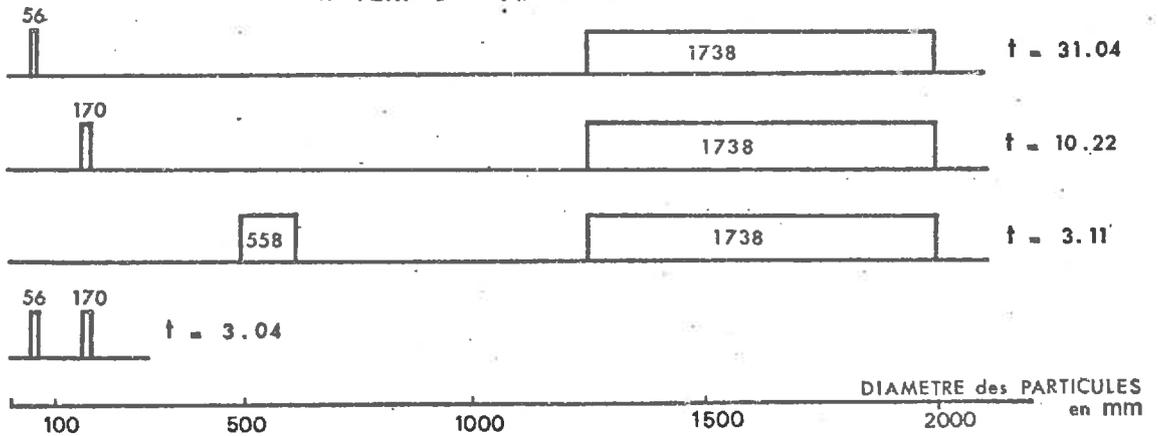
MICROBILLES - SERIE ETALEE



MICROBILLES - SERIE CALIBREE



MATERIAUX NATURELS



② PLAGES GRANULOMETRIQUES, DIAMETRES EQUIVALENTS ET RAPPORT DE DIMENSION (t), DES CONSTITUANTS DES MELANGES BINAIRES

soumettant cet échantillon à un traitement susceptible de détruire des équilibres fragiles réalisés localement entre particules.

La porosité d'un matériau meuble est, en effet, fonction des modalités présidant à sa mise en place. Ainsi, CHRETIEN (1971) a comparé la porosité de différents sables avant et après l'action d'un vibreur. Comme le montre le tableau (2), le traitement utilisé a diminué dans tous les cas la porosité des matériaux. Par ailleurs, la porosité obtenue après vibration correspond à un état d'équilibre puisque sa valeur n'est pas modifiée par la poursuite du même traitement. Cependant, cet équilibre peut être encore déplacé vers des états de moindre porosité en mettant en jeu des énergies plus élevées. Mais l'utilisation de techniques empruntées au test Proctor (TERZAGHI et PECK 1961) risque d'entraîner, par fracture des particules, une modification de la granulométrie du matériau lui-même. (JOHNSON et al 1962).

L'ensemble de ces remarques nous a permis de définir un protocole de remplissage simple. Les mélanges, préalablement préparés dans une série de capsules, sont introduits dans un récipient de mesure. Après remplissage, la partie supérieure du récipient est arrasée et l'ensemble est alors pesé. Le fond du récipient est alors frappé une vingtaine de fois à petits coups sur la paillasse. Une fraction du mélange est alors rajoutée dans l'espace vide que le tassement a ménagé dans la partie supérieure du récipient. Le récipient, après un nouveau tassement, est arrasé, puis pesé. Au bout d'un certain nombre de séquences, il y a répétition de la mesure. Le tableau (3) donne un exemple des résultats obtenus pour un matériau constitué d'un mélange de sable 160 - 200 μ et de sable fin 50 - 63 μ .

matériau	intervalle de tamisage, μ .	Porosité %	
		état initial	après vibration
Billes de verre	160 - 200	38,92	33,71
sable de Fontainebleau	" "	49,90	37,44
sable du Morvan	" "	60,44	51,27

TABLEAU 2. EVOLUTION DE LA POROSITE DE MATERIAUX MEUBLES PAR VIBRATION, D'APRES CHRETIEN (1971).

séquence	1	2	3	4	5	6	7	8	9
poids de matériau en grammes	82,53	83,55	84,25	85,00	84,95	85,22	86,08	85,90	85,95

TABLEAU 3 EXEMPLE DE VARIATION DU POIDS DE SABLE ENCOMBRANT UN VOLUME
DONNE, EN FONCTION DES SEQUENCES DE REMPLISSAGE.

diamètre des particules en cm	Volume du récipient en cm ³
1	65.500
0,5	8.200
0,2	530
0,1	65

TABLEAU 4. TAILLE MINIMUM DU RECIPIENT SUPRIMANT LES EFFETS DE PAROIS
POUR DES PARTICULES D'UN DIAMETRE DONNE.

2.2.2. Volume du récipient de mesure

Le choix du volume du récipient est dicté par la nécessité de rendre négligeable l'effet de parois. Cet effet de parois concerne aussi bien le contact matériau - parois du récipient - que l'organisation induite par la forme de la paroi, qui peut encore persister jusqu'à une certaine distance à l'intérieur du récipient.

Ces aspects du problème ont été notamment illustrés par l'étude de GRATON et FRASER (1935) sur l'arrangement de monocouches de billes de verre en fonction de la forme du récipient et plus récemment par les travaux de SCOTT (1960) et Mc GEARY (1961).

Ce dernier montre que toutes choses égales par ailleurs, la porosité d'un massif de microbilles mesurée dans un cylindre diminue quand augmente le rapport entre le diamètre du cylindre et le diamètre des billes.

A partir d'une valeur critique voisine de 50, la porosité garde alors une valeur constante. SCOTT, pour sa part, se base sur un calcul théorique du remplissage d'un récipient sphérique par des sphères pour extrapoler graphiquement au cas d'un massif poreux infini. Les résultats obtenus montrent que la valeur de la porosité mesurée sur une population de $6 \cdot 10^4$ billes diffère de moins de 1 p. cent, en valeur absolue, de la porosité théorique. Si l'on admet par exemple un empilement de type cubique, le côté du cube contenant N sphères de diamètre unitaire est $(N)^{1/3}$. En donnant à N la valeur $6 \cdot 10^4$, on trouve pour le diamètre de la sphère enveloppe du cube une valeur peu différente de celle du rapport critique mesuré par Mc GEARY.

Le tableau (4) donne un exemple des volumes nécessaires, en fonction de la taille des particules pour respecter une valeur de 50 dans le rapport des diamètres.

Des résultats très voisins sont obtenus par RIVIERE et al (1969). Ces auteurs établissent, pour un cube de volume C^3 rempli par des sphères isodimensionnelles R en arrangement serré ($\Pi = 25,95$), que la porosité du système est comprise entre deux valeurs limites Π_1 et Π_2 . Ces dernières correspondent respectivement à un remplissage parfait et à un remplissage avec une couche vide du cube de mesure. Les relations obtenues sont les suivantes :

$$\Pi_1 = \Pi \left(1 - 1,76 \frac{R}{C} + 1,03 \left(\frac{R}{C} \right)^2 + 2,63 \left(\frac{R}{C} \right)^3 \right)$$

$$\Pi_2 = \Pi \left(1 - 10,24 \frac{R}{C} + 35 \left(\frac{R}{C} \right)^2 - 37 \left(\frac{R}{C} \right)^3 \right)$$

Le calcul montre alors que Π_1 et Π_2 ne diffèrent pas de plus de 1 p. cent, en valeur absolue, de la valeur Π quand le rapport $\frac{C}{2R}$ est respectivement égal à 50 ou à 100.

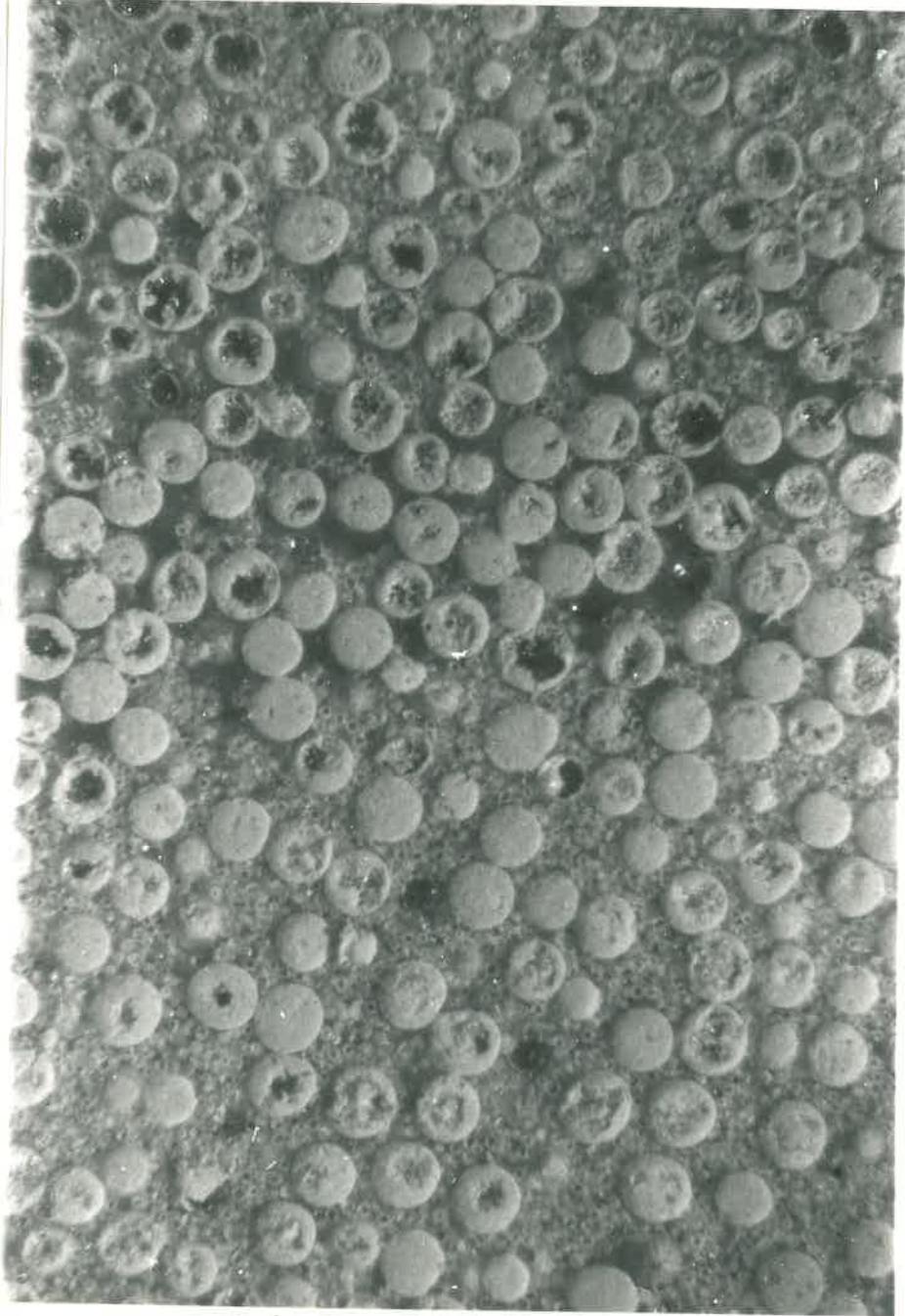
2.2.3. Homogénéité du mélange

Au moment de la préparation des mélanges, pendant le remplissage du récipient de mesure et au cours du tassement, une migration des plus petites particules peut être constatée.

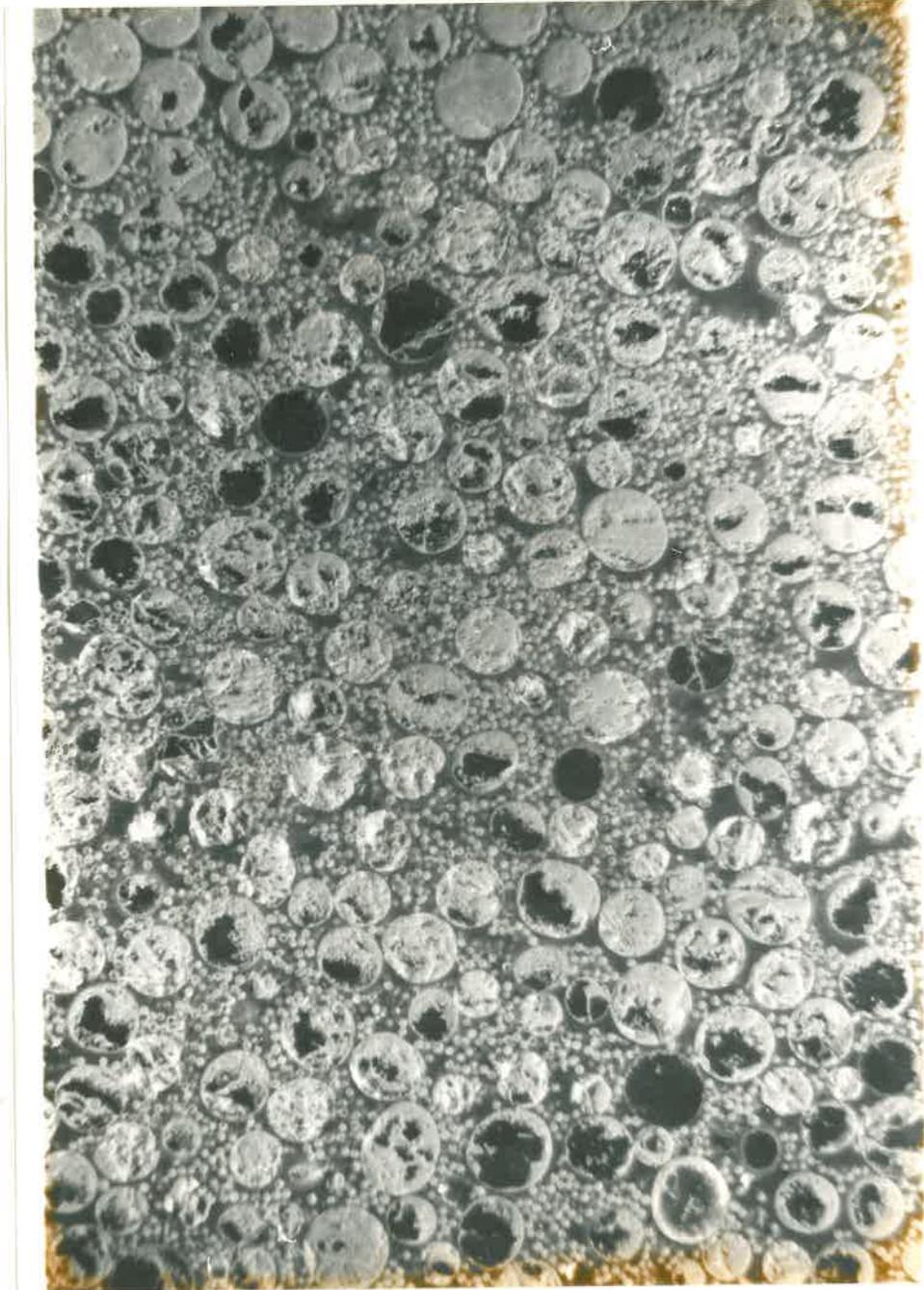
Cette migration affecte surtout les mélanges contenant moins de 25 p. cent de petites particules et se manifeste d'autant plus nettement que leur taille, en valeur relative, est petite.

Le remplissage fractionné du récipient de mesure permet en partie de remédier à cette migration.

L'examen de sections polies de quelques mélanges réalisés à cet effet suggère l'existence de plusieurs types d'hétérogénéité, les photographies suivantes en donnent quelques exemples.



1 : 68μ (80 p.cent) - 335μ (x 30).



2 : 1324 μ (90 p.cent) - 133 μ (x 10)

La photographie (1) représente une zone de répartition inégale intéressant une bande d'environ 1 cm dans un mélange de microbilles de 68 μ associées à 80 p. cent de microbilles de 335 μ .

Le document 2 met en évidence les vides ménagés par des microbilles de 133 μ à l'aplomb de microbilles de 1324 μ présentes à 90 p. cent.

Sur ce même document, on peut observer également un regroupement partiel de grosses particules.

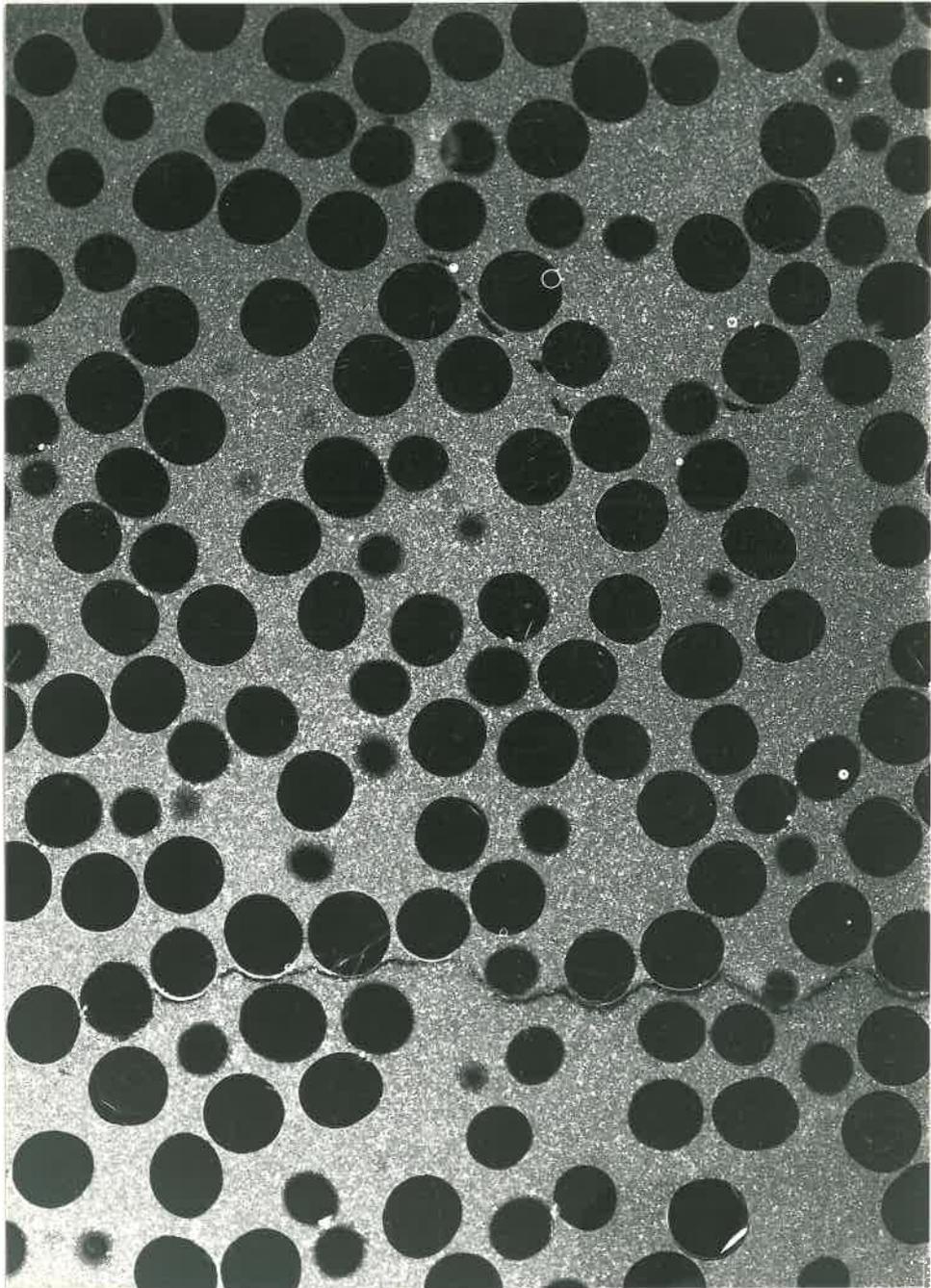
Enfin, la photographie (3) illustre, avec un mélange de microbilles de 2000 μ associées à 40 p. cent de microbilles de 49 μ , une disposition qui semble bien homogène. La fissure horizontale est un artefact lié à l'induration du massif par une résine.

3 - PRESENTATION DES RESULTATS

D'une manière générale, les résultats seront exprimés en terme de porosité p. cent en fonction de la teneur pondérale en petites particules.

Cette dernière correspond au rapport du poids de particules de petite taille au poids total de l'échantillon et est exprimé en p. cent.

L'ensemble des résultats obtenus sur les classes de particules et leurs mélanges est présenté au tableau (5).



3 : 49 μ (40 p.cent) - ~~300~~ μ (x 30)

En ce qui concerne la porosité des matériaux avant mélange, il apparaît que pour l'ensemble des microbilles, (11 classes), la moyenne des valeurs se situe au voisinage de 36,7 p. cent, les valeurs extrêmes étant respectivement de 38,1 et 34,8 p. cent. Ces valeurs sont tout à fait comparables à celles citées par ailleurs par de nombreux auteurs. (CHRETIEN 1971, BERNAL 1960, GRATON 1925, PARRISH 1961, SCOTT 1960)

Il n'apparaît pas de différence significative entre séries différant par leur degré de calibrage. Enfin, pour la série très calibrée, la valeur de la porosité tend à augmenter quand le diamètre des particules diminue. Parmi les quatre populations de sables, seule la plus grossière présente une porosité qui l'apparente aux populations de microbilles. A l'observation, ce sable apparaît émoussé. Pour les trois autres populations, la porosité se situe en moyenne au voisinage de 45 p. cent.

En ce qui concerne maintenant les mélanges eux-mêmes, les résultats montrent que le mélange de deux populations se traduit toujours par une diminution de la porosité résultante, par rapport aux porosités initialement mesurées sur chacun des constituants.

Pour une teneur en petites particules, comprise, selon les mélanges, entre 20 et 50 p. cent, un minimum de porosité apparaît.

Cependant, la comparaison des différentes séries de mélanges ne peut être effectuée de façon directe.

DIAMETRES EQUIVALENTS μ	t	POURCENTAGE PONDERAL DE PETITES PARTICULES										
		0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
MICROBILLES SERIE CALIBREE												
133/ 68	1,96	37,0	34,6	33,6	33,1	33,3	33,8	34,5	35,3	35,9	36,7	37,7
669/335	2,00	36,5	35,9	33,7	33,5	33,4	33,2	34,7	34,0	34,6	35,5	36,0
669/133	5,04	36,5	33,1	30,8	30,0	29,6	29,9	30,9	-	33,9	35,5	37,0
754/ 95	7,95	34,8	31,0	28,7	28,7	27,6	28,4	29,8	31,9	33,5	35,8	37,5
1324/133	9,96	36,0	32,5	29,0	27,8	26,7	27,5	28,6	30,8	33,0	35,1	37,0
MICROBILLES SERIE ETALEE												
931/383	2,43	38,1	36,5	35,2	34,5	33,5	33,7	-	-	-	-	36,9
383/ 49	7,81	36,9	33,3	28,8	26,7	26,8	27,7	30,0	31,4	33,5	35,3	37,0
747/ 49	15,24	36,7	31,1	26,1	23,5	23,5	25,0	26,8	29,0	31,7	34,5	37,0
931/ 49	19,01	38,1	-	25,0	21,1	22,4	-	-	-	-	-	37,0
MATERIAUX NATURELS												
170/ 56	3,04	45,4	40,8	38,0	37,5	37,5	37,9	39,8	40,9	42,1	44,4	46,2
1738/558	3,11	38,8	37,6	37,3	-	36,5	-	37,8	39,1	40,6	42,1	43,3
1738/170	10,22	38,8	35,0	34,8	33,7	34,3	35,3	36,8	39,4	42,3	43,7	45,4
1738/ 56	31,04	38,8	33,8	31,5	31,3	32,5	35,9	38,1	39,8	42,8	45,0	46,2

TABLEAU 5. POROSITE DES MELANGES BINAIRES DE MATERIAUX MEUBLES.

Comme le montre en effet la figure (3) où sont présentés quelques courbes de variation de la porosité totale en fonction de la teneur pondérale en petites particules, la confrontation des résultats est rendue imprécise par le fait que les porosités initiales n'ont pas la même valeur d'une série à l'autre.

Par ailleurs, l'interprétation des résultats expérimentaux ne peut être tentée qu'en se référant à des modèles d'association de particules permettant d'établir des lois. Nous avons alors choisi de situer les résultats expérimentaux par rapport à des données calculées avec des lois d'association. Cette démarche a le double avantage de permettre une confrontation entre les différentes courbes par rapport à une référence commune et de situer les résultats par rapport à des modèles définis d'association de particules.

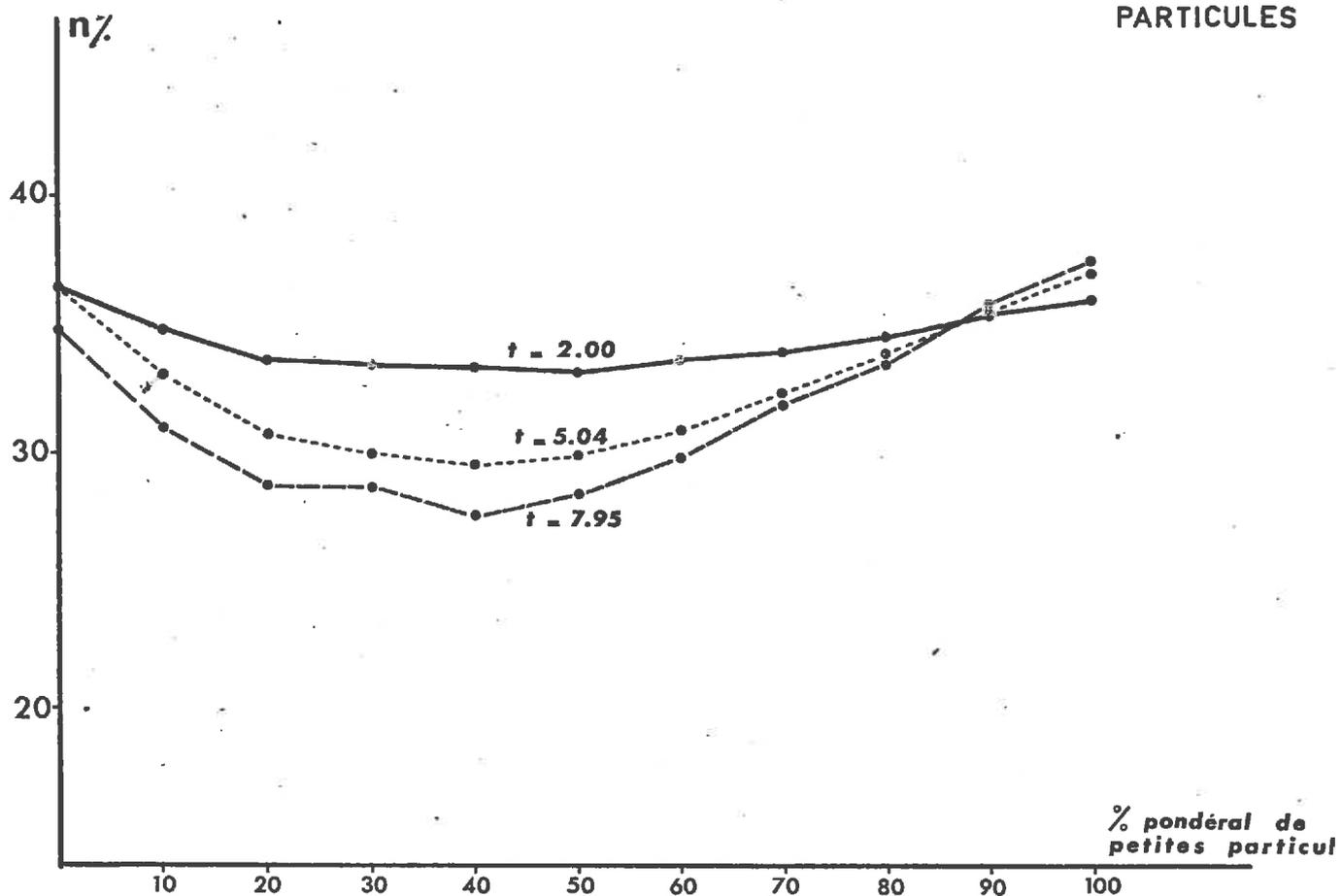
Ce sont les lois d'association que nous allons maintenant définir.

4 - RECHERCHE DE LOIS D'ASSOCIATION DE PARTICULES

Dans ce qui suit, nous considérerons les mélanges comme constitués à partir de deux classes de particules simplement qualifiées de "grossières" ou de "fines".

Nous avons vu qu'à la suite d'un tassement standard, chaque classe de particules présentait une valeur de porosité d'arrangement constante. Nous prendrons, comme caractéristique d'arrangement d'une classe de particules, le volume de solide des particules encombrant un volume unitaire.

③ EXEMPLES de VARIATION de la POROSITE de MELANGES BINAIRES de MICROBILLES en FONCTION de la TENEUR PONDERALE en PETITES PARTICULES



Dans le cas de particules grossières ou fines, nous désignerons respectivement par B_0 et b_0 ces volumes de solide.

Ces notations conduisent à l'expression suivante :

$$V = B + b$$

où V représente le volume de solide total encombrant le volume unitaire, dans le cas d'un mélange binaire. B et b correspondent, respectivement, au volume de solide de grosses et petites particules présentes dans le volume unitaire. Ces volumes sont nécessairement inférieurs ou égaux aux volumes caractéristiques B_0 et b_0 .

La porosité d'une classe de particules aura comme expression :

$$\Pi = \frac{1 - B_0}{1} \quad \text{ou} \quad \Pi = \frac{1 - b_0}{1}$$

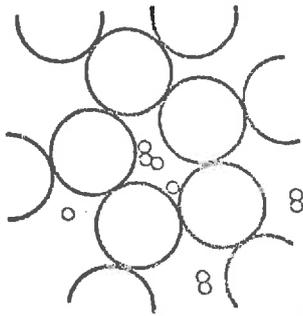
Dans le cas d'un mélange, on écrira :

$$\Pi = \frac{1 - V}{1}, \quad \text{ou encore par convention:} \quad \Pi = 1 - V$$

4.1. Loi d'additivité

Une des démarches les plus simples consiste à prendre comme modèle d'association de particules dans un mélange, la juxtaposition de volumes encombrés par l'une ou l'autre classe de particules. (Figure 4)

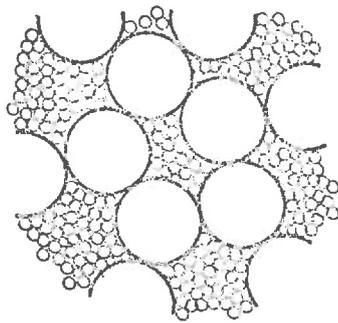
Considérons le volume unitaire encombré initialement par un volume de grosses particules B_0 . L'introduction d'un volume b de petites particules chasse un volume B' de grosses particules.



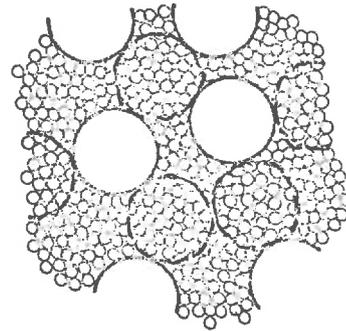
**remplissage
partiel**

modèle de remplissage

la matrice de grosses particules
n'est pas modifiée par l'apport
de petites particules

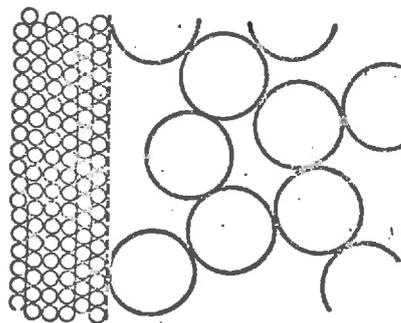


**remplissage
maximum**



**modèle de
substitution**

à des volumes de
grosses particules (cercle
pointillé) on a substitué
des volumes encombrant
équivalents de petites
particules



modèle d'additivité

juxtaposition de volumes encombrant de grosses et de petites
particules

④ **MODELES D'ASSOCIATION DE PARTICULES DANS UN
MELANGE BINAIRE**

Ce modèle d'additivité permet de définir une relation entre b et B' .

Pour qu'il y ait juxtaposition des grosses et des petites particules, chacune conservant leur caractéristique propre d'arrangement, il faut alors que le volume encombré par b soit égal au volume encombré par B' .

Par définition, b_0 encombre un volume unitaire. Le volume b encombre donc un volume égal à $b \cdot \frac{1}{b_0}$. De même B' encombre un volume égal à $B' \cdot \frac{1}{B_0}$.

La relation entre b et B' s'écrit alors :

$$\frac{b}{b_0} = \frac{B'}{B_0} \quad (1)$$

En posant que $B_0 - B' = B$, le volume b a pour expression :

$$b = (B_0 - B) \frac{b_0}{B_0}$$

Le volume de solide total encombrant le volume unitaire a alors pour expression, après simplification :

$$V_{ad} = B \cdot \frac{B_0 - b_0}{B_0} + b_0 \quad (2)$$

Pour marquer qu'il s'agit d'une loi permettant le calcul de V d'après un modèle d'additivité, nous avons appelé V_{ad} le volume total de solide ainsi calculé.

Pour exprimer V_{ad} en fonction des proportions du mélange, il est nécessaire de relier B à une teneur, par exemple à la teneur G des grosses particules.

Par définition :

$$G = \frac{\text{poids de grosses particules}}{\text{poids total des particules}}$$

Avec les conventions que nous avons fixées, ce rapport peut s'écrire :

$$G = \frac{B \cdot \bar{\gamma}_s^B}{B \cdot \bar{\gamma}_s^B + b \cdot \bar{\gamma}_s^b}$$

avec $\bar{\gamma}_s^b$, $\bar{\gamma}_s^B$, densités de solide respectives des petites et des grosses particules.

En remplaçant, dans cette dernière relation, b par son expression dans le modèle d'additivité (1), on trouve après simplification :

$$B = \frac{B_o \cdot \bar{\gamma}_d^b \cdot G}{\bar{\gamma}_d^b \cdot G + \bar{\gamma}_d^B (1 - G)} \quad (3)$$

avec $\bar{\gamma}_d^b$, $\bar{\gamma}_d^B$, densités respectives des petites et des grosses particules.

La forme de la relation (2) montre que V_{ad} varie linéairement entre b_o et B_o quand B prend les valeurs comprises entre 0 et B_o .

Nous appellerons Π_{ad} les porosités calculées par la loi d'additivité, soit :

$$\Pi_{ad} = 1 - V_{ad}$$

Un exemple de variation de η_{ad} , en fonction de la teneur en petites particules, est donné à la figure 7.

4.1.1. Analyse des résultats expérimentaux par différence relative de porosité par rapport à l'additivité

Cette analyse est conduite sur la base d'un indice représentant les différences entre la porosité calculée d'après la loi d'additivité et la porosité mesurée ; cette différence étant rapportée à la valeur de la porosité en additivité.

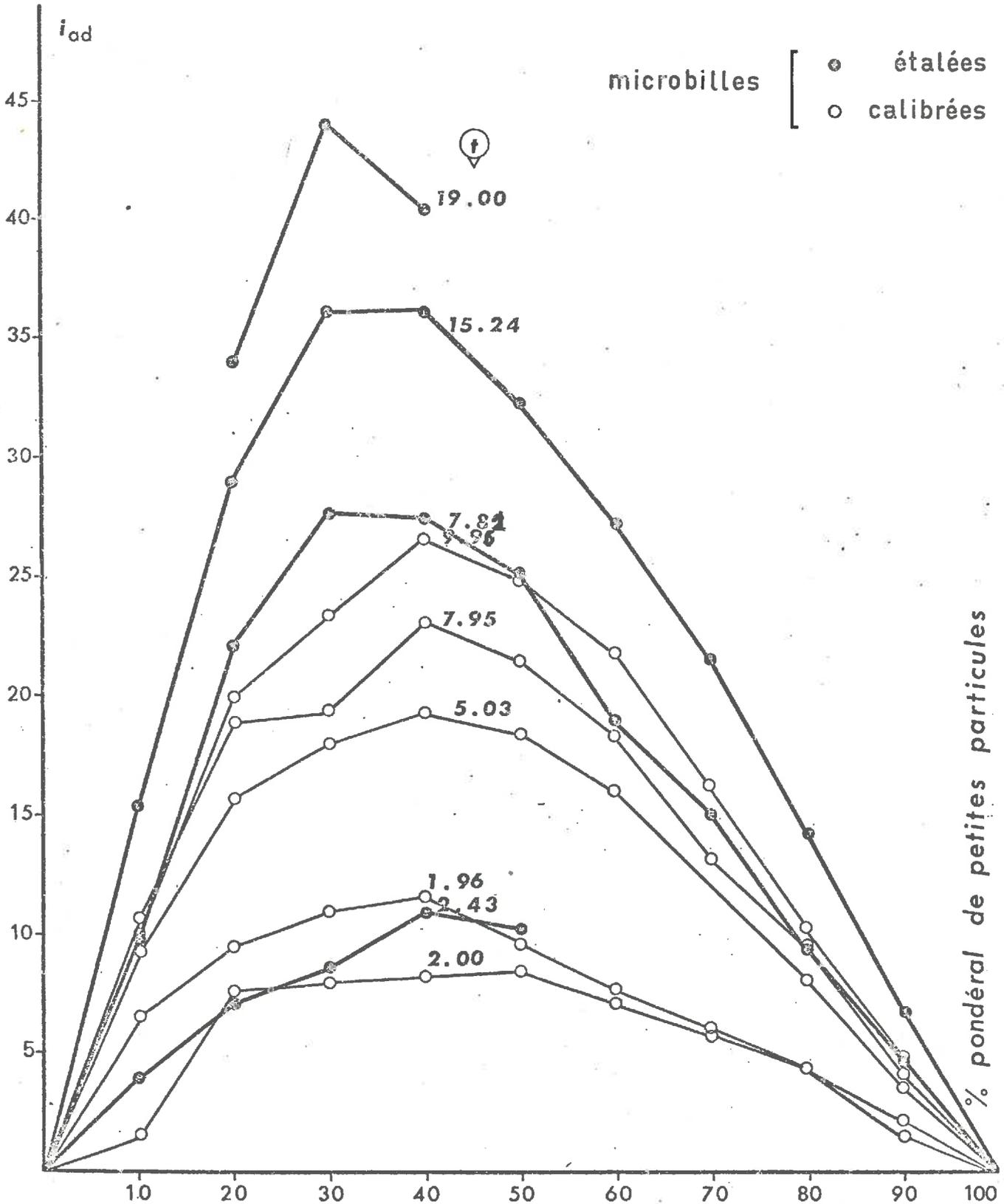
Cet indice, i_{ad} , a la forme suivante :

$$i_{ad} = \frac{\eta_{ad} - \eta}{\eta_{ad}} \cdot 100$$

Comme le montrent les figures 5 et 6, cet indice est toujours positif pour l'ensemble des mélanges. Ceci signifie que, du point de vue du modèle d'additivité, le mélange conduit toujours à une diminution de porosité du système.

Les graphiques montrent, par ailleurs, une relation certaine entre les valeurs de l'indice et le rapport de taille, les mélanges de la série pour laquelle la valeur de t est la plus élevée présentant les plus fortes valeurs de i_{ad} , toutes choses égales par ailleurs. Ce résultat est indépendant du degré de calibrage ou de la forme des particules dont l'influence est marquée par les différences observées entre valeurs de i_{ad} pour des t comparables.

⑤ VALEURS COMPAREES des DIFFERENCES RELATIVES de POROSITE entre les VALEURS OBSERVEES et les VALEURS CALCULEES sur la BASE de la LOI d'ADDITIVITE



Ainsi, on peut remarquer, dans les mélanges de microbilles, que les séries, dont les constituants ont une granulométrie étalée, présentent des valeurs de i_{ad} supérieures à celles des autres séries pour une valeur de t comparable.

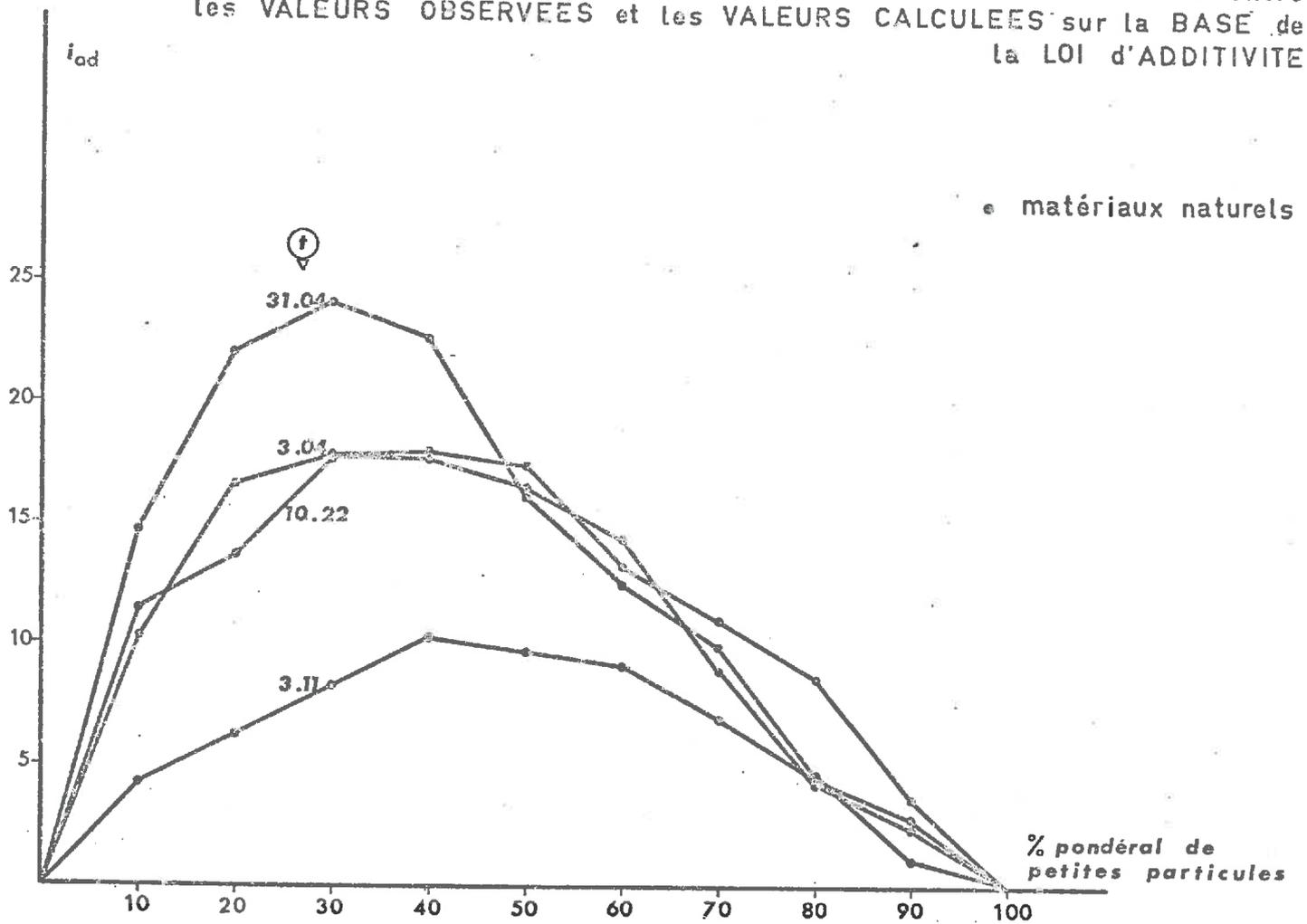
Par rapport aux sables, il semble qu'une forme sphérique avantage la réalisation de systèmes où l'arrangement des particules est plus serré et donc la porosité plus faible.

Dans la série de mélanges de matériaux naturels, l'examen des valeurs de porosité des classes utilisés en mélanges suggère que des mélanges de particules de formes différentes aboutissent à des systèmes plus poreux que si ces particules étaient de formes semblables.

En effet, dans le cas des séries, telles que $t = 3,11 - 10,2 - 31,04$, les petites particules présentent des porosités les apparentant à des matériaux plutôt anguleux. (cf. tableau 2). Elles sont associées au même squelette sableux dont la porosité est très proche de celle des microbilles, ce qui est bien en accord avec l'aspect subarrondi que ces particules présentent à la binoculaire. Par contre, pour la série où $t = 3,04$, les deux constituants présentent des porosités comparables. Il demeure que toutes choses égales par ailleurs, la porosité d'un mélange est en relation étroite avec la valeur de t et que tout mélange de particules à t supérieur à 1 va conduire à une diminution de porosité.

Nous allons maintenant envisager les conséquences d'hypothèses d'arrangement qui conduisent effectivement à une diminution de porosité et leur confronter les résultats expérimentaux afin de pouvoir juger des différents états de porosité obtenus.

⑥ VALEURS COMPAREES des DIFFERENCES RELATIVES de POROSITE entre les VALEURS OBSERVEES et les VALEURS CALCULEES sur la BASE de la LOI d'ADDITIVITE



4.2. Lois complémentaires de substitution et de remplissage

Nous postulons comme précédemment que l'arrangement propre aux particules de l'une ou de l'autre classe n'est pas modifié après mélange.

4.2.1. Loi de remplissage

Considérons un empilement de grosses particules (Figure 4 a). Une manière de concevoir une diminution de porosité à la suite d'un apport de petites particules est d'admettre que les vides ménagés par l'organisation des grosses particules vont être remplis par les petits.

Le volume total de solide, dans l'unité de volume encombré, s'écrit alors :

$$V_{re} = B_o + b \quad (4)$$

où V_{re} représente le volume total de solide dans le modèle de remplissage. Quand b augmente, le volume total de solide croît et la porosité du système diminue.

Cependant, le volume que les petites particules peuvent encombrer est limité à la quantité $1 - B_o$. Sachant que b_o encombre un volume unitaire, le volume maximum de petites particules que l'on peut introduire dans un massif de grosses particules sans perturber leur arrangement est tel que le volume encombré par les petites particules soit égal au volume disponible, soit :

$$b \cdot \frac{1}{b_o} = 1 - B_o$$

Dans la loi de remplissage, b peut donc prendre uniquement les valeurs comprises entre 0 et $b_0 (1 - B_0)$; Cette dernière valeur correspond au remplissage maximum de l'espace ménagé entre les grosses particules.

La porosité sera définie par la relation :

$$\Pi_{re} = 1 - V_{re}$$

Exprimé comme précédemment en termes de teneurs et de densités, le volume de solide b est calculé dans ce domaine à partir de l'expression de la teneur en petites particules :

$$g = \frac{b \cdot \frac{\bar{b}_0}{\gamma_s}}{b \cdot \frac{\bar{b}_0}{\gamma_s} + B_0 \cdot \frac{B_0}{\gamma_s}}$$

Après simplification, en remarquant que $B_0 \cdot \frac{B_0}{\gamma_s} = \frac{B_0}{\gamma_d}$ par définition, b a pour expression :

$$b = \frac{g \cdot \frac{\bar{B}_0}{\gamma_d}}{G \cdot \frac{\bar{b}_0}{\gamma_s}} \quad (5)$$

Au maximum de remplissage, V_{re} a pour expression :

$$V_{re} = B_0 + b_0 (1 - B_0) \quad (6)$$

Exprimé en teneur de porosité; on a :

$$\Pi_{re} = 1 - (B_0 + b_0 (1 - B_0))$$

Cette expression se ramène au produit des porosités propres à chaque constituant, soit :

$$n_{re} = (1 - B_0) (1 - b_0)$$

Comme nous le verrons, il s'agit de la porosité minimale qui puisse être réalisée dans un mélange.

Le modèle de remplissage ne permet de décrire qu'une partie des variations de porosité (Figure 7). Il est donc nécessaire d'envisager le cas de mélanges encore plus riches en petites particules que ne le permet le remplissage maximum.

4.2.2. Loi de substitution

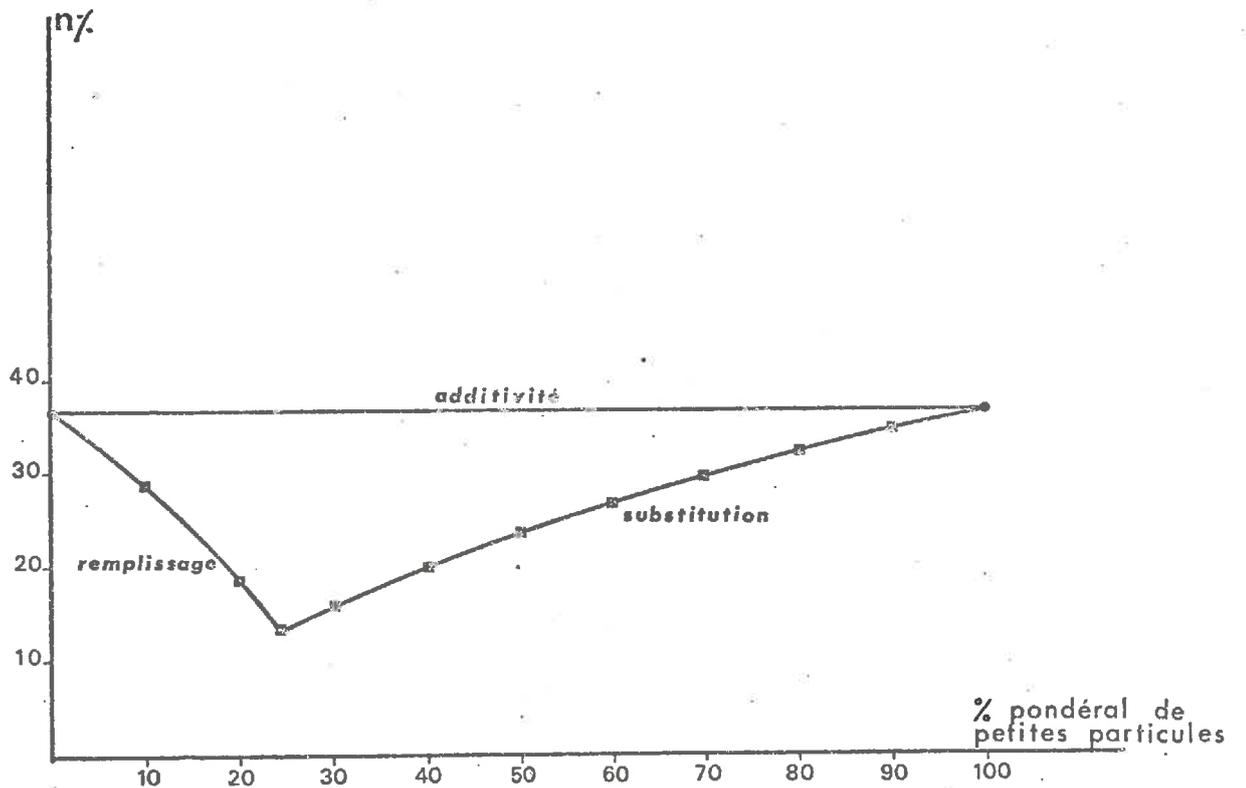
Considérons un volume unitaire initialement encombré par un volume de solide de petites particules égal à b_0 . En introduisant, dans ce volume unitaire, un volume de solide B de particules grossières, nous allons chasser un volume b' de petites particules. Nous allons admettre qu'il y a substitution d'un volume encombré de petites particules par le volume B introduit.

Si le volume encombré par b_0 est 1, le volume encombré par b' est $\frac{1}{b_0} \cdot b'$.

La substitution peut s'écrire sous la forme de l'égalité suivante :

$$b' \cdot \frac{1}{b_0} = B \quad (7)$$

⑦ EXEMPLE DE VARIATION DE POROSITE SELON LES LOIS D'ARRANGEMENT



Le volume V de solide dans le volume unitaire est diminué de b' et augmente de B , soit :

$$V = b_o - b' + B$$

En remplaçant b' par son équivalent $b_o \cdot B$ (relation 7), l'expression de V devient :

$$V = b_o - b_o B + B$$

et après simplification, nous écrirons par convention :

$$V_{su} = B + b_o (1 - B) \quad (8)$$

Au cours de cette substitution, nous remplaçons donc un volume poreux par un volume plein. Ceci entraîne une augmentation du volume de solide dans le volume unitaire et donc une diminution de porosité. La figure (7) présente un exemple de cette variation. Cependant, on ne peut, par définition, introduire un volume de solide supérieur à B_o . Pour cette valeur l'équation (8) s'écrit :

$$V_{su} = B_o + b_o (1 - B_o) \quad (9)$$

Nous retrouvons là une relation identique à la relation (6). Ceci signifie que, par remplissage ou par substitution, il est possible d'introduire une quantité maximale de volume de solide dans l'unité de volume encombré. Ce point particulier peut être atteint pour une certaine proportion entre grosses et petites particules. Il correspond au minimum de porosité.

Pour ce point particulier, on peut écrire :

$$n_{su} = n_{re} = (1 - B_o) (1 - b_o)$$

D'après l'équation (8), la teneur en grosses particules dans le domaine de substitution s'écrit :

$$G = \frac{B \cdot \bar{\gamma}_s^B}{B \bar{\gamma}_s^B + b_o (1 - B) \bar{\gamma}_s^{b_o}}$$

Après simplification, cette égalité permet d'exprimer B par la relation :

$$B = \frac{G \cdot \bar{\gamma}_s^b}{G \cdot \bar{\gamma}_s^b + (1 - G) \bar{\gamma}_s^B} \quad (10)$$

Les deux lois d'arrangement que nous venons de définir permettent, de façon complémentaire, de calculer l'ensemble des valeurs de V quand la teneur en petites particules varie de 0 à 100 p. cent.

4.2.3. Analyse des résultats expérimentaux par différence relative de porosité par rapport aux lois de substitution et de remplissage

L'indice qui est utilisé ici a la même forme que celui utilisé pour confronter les résultats expérimentaux aux valeurs fournies par la loi d'additivité, soit :

$$i_{rs} = \frac{\bar{n}_{rs} - n}{\bar{n}_{rs}} \cdot 100$$

Nous avons appelé \bar{n}_{rs} les valeurs calculées en remplissage ou substitution selon la teneur en petites particules des mélanges considérés.

La confrontation des courbes sur cette base n'apporte aucun élément supplémentaire par rapport à ceux dégagés en utilisant l'indice i_{ad} . Par contre, l'intérêt de cet indice réside dans le caractère extrême des deux hypothèses qui ont permis de l'établir.

En effet, les valeurs calculées de l'indice i_{rs} restent toujours négatives pour tous les mélanges.

Ce résultat général est illustré par la figure (8) où sont portées les valeurs de i_{rs} pour les microbilles à granulométrie étalée. Bien que les valeurs les plus faibles de i_{rs} aient été enregistrées avec ces matériaux, on constate qu'elles ne vérifient pas les hypothèses envisagées.

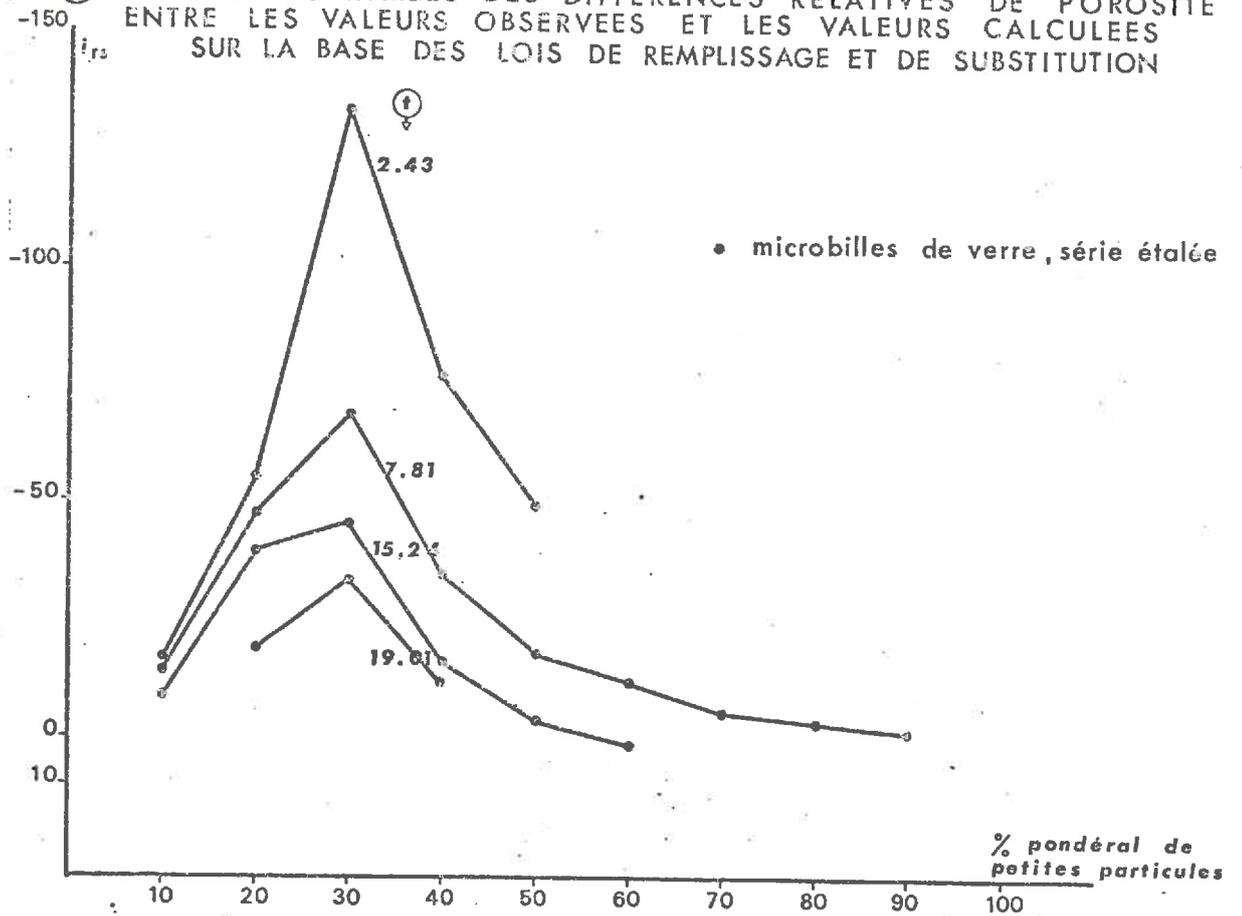
Cependant, le classement des courbes selon la valeur de t montre que les valeurs expérimentales de porosité s'approchent d'autant plus des valeurs théoriques que la valeur de t est élevé.

4.2.4. Cas d'un mélange à valeur élevée de t

Pour vérifier cette tendance, nous avons réalisé des mélanges de billes de verre d'un diamètre voisin de 2 mm et de limon 20-50 μ dont le diamètre équivalent mesuré est voisin de 21 μ (FIES 1972). Ces mélanges n'ont pu être réalisés à sec, les particules fines s'écoulant à travers le massif des plus grossières. Aussi les avons-nous effectués en présence d'acide oléique dont la viscosité (25,6 centipoises à 30°C) permet de réduire cette tendance à la séparation. Nous avons procédé en incorporant des quantités croissantes de billes à une pâte de limon et d'acide oléique dont la composition volumique initiale est la suivante :

Limon 20-50 μ	= 49,40 p. cent
Acide oléique	= 49,15 p. cent
Air	= 1,45 p. cent

⑧ VALEURS COMPAREES DES DIFFERENCES RELATIVES DE POROSITE
 ENTRE LES VALEURS OBSERVEES ET LES VALEURS CALCULEES
 SUR LA BASE DES LOIS DE REMPLISSAGE ET DE SUBSTITUTION



Comme le montre la figure (9), les porosités observées vérifient entièrement le modèle de substitution et ce indépendamment de tout effet de forme.

Dans le domaine dont rend compte le modèle de remplissage, la réalisation de mélanges homogènes a nécessité des doses croissantes d'acide oléique au fur et à mesure qu'augmentait la teneur en billes. Les différents points du graphique vérifient en fait, ici, la réalisation de la porosité minimale théorique avec des pâtes où la porosité propre au limon croît avec la teneur en acide oléique. Il reste que l'on constate un très bon accord, avec une valeur de t voisine de 100, entre valeurs calculées et observées.

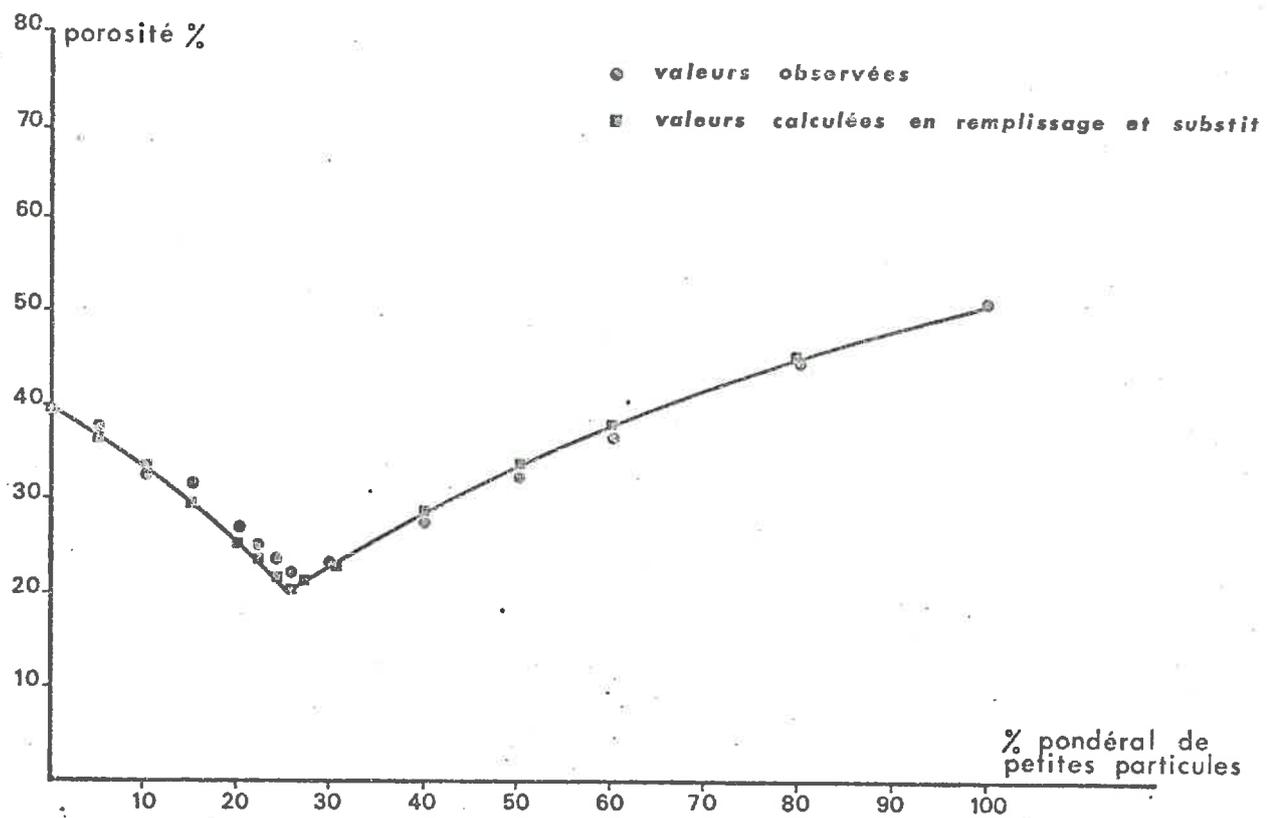
5 - CONCLUSIONS

Nous avons proposé un ensemble de trois lois d'arrangement qui permettent de définir le domaine des variations de porosité que l'on peut obtenir par mélange de particules.

A l'intérieur de ce domaine, un certain nombre de facteurs sont susceptibles de modifier l'arrangement des particules et donc leur porosité d'assemblage. Quand divers facteurs, comme ceux liés à la forme, à l'étalement granulométrique des particules, etc ..., sont maintenus à des niveaux comparables d'une série de mélanges à une autre, les porosités observées sont en relation avec le rapport de taille des particules.

Ce rapport apparaît donc comme un paramètre majeur de prévision de la porosité d'un mélange.

⑨ VARIATIONS DE POROSITES OBTENUES AVEC DES MELANGES DE BILLES 2000μ ET DE LIMON $20-50\mu$



Dans une première démarche, nous allons essayer de modifier les équations des lois d'assemblages pour obtenir un ajustement des valeurs calculées aux valeurs observées. Nous tenterons alors de relier les paramètres d'ajustement aux valeurs du rapport de taille.

Dans une seconde démarche, nous développerons l'étude des effets stériques pouvant intervenir lors du mélange de particules de tailles différentes.

Dans ces deux démarches, nous développerons la notion de perturbation des arrangements propres à chaque classe de particules quand ces classes sont mélangées.

6 - MODELES DE PREVISION DE LA POROSITE DES MELANGES

En nous plaçant du point de vue des lois d'associations de remplissage et de substitution, les porosités des mélanges que nous avons réalisés peuvent être interprétées comme traduisant la réalisation plus ou moins partielle du modèle de remplissage ou du modèle de substitution. Nous allons admettre qu'au moment de la substitution ou du remplissage, il y a soit perturbation de l'arrangement des petites particules par la grosse particule introduite, soit perturbation de l'arrangement des grosses particules par l'introduction de petites particules.

6.1. Modèles de substitution et de remplissage avec perturbation

Avec le modèle de substitution, nous avons admis l'égalité entre un volume de solide B de grosses particules et un volume encombré de petites particules défini par $\frac{b'}{b_0}$ (relation 7).

Nous allons maintenant poser comme hypothèse qu'il y a modification de l'arrangement des petites particules au contact des particules grossières. Ainsi, en présence de grosses particules, la valeur b_0 qui caractérisait l'arrangement initial des petites particules est modifiée. Cette valeur va s'écrire maintenant $\alpha \cdot b_0$, le terme α représentant un coefficient de perturbation de l'arrangement des petits éléments.

La relation (7) devient alors :

$$b' \cdot \frac{1}{\alpha b_0} = B \quad (11)$$

De cette relation, on déduit : $b' = \alpha b_0 \cdot B$

Le coefficient de perturbation α a une signification très générale. Pour α inférieur à 1, il y aurait réarrangement plus serré des petites particules au niveau des grosses. La quantité b' chassée par B serait alors inférieure à $b_0 \cdot B$. Pour α supérieur à 1, il y aurait au contraire foisonnement des petites particules au niveau des grosses, la quantité b' déplacée par B étant alors supérieure à $b_0 \cdot B$.

Dans le domaine que nous étudions, α doit être tel que :

$$1 \leq \alpha \leq \frac{1}{B_0}$$

En effet, pour $\alpha = 1$, nous retrouvons la loi de substitution. Pour $\alpha = \frac{1}{B_0}$, nous nous plaçons alors dans le domaine de la loi d'additivité où le volume encombré par b' est égal au volume encombré par B , soit :

$$\frac{b'}{b_0} = \frac{B}{B_0}$$

Dans le domaine de remplissage, le volume de solide de grosses particules était constant et égal à B_0 . On peut admettre maintenant que l'arrangement des grosses particules est modifié par la présence de petites particules.

Nous écrirons alors que le volume de solide de grosses particules présent dans le volume unitaire encombré est défini par la relation :

$$B = B_0 - \beta \cdot b \quad (12)$$

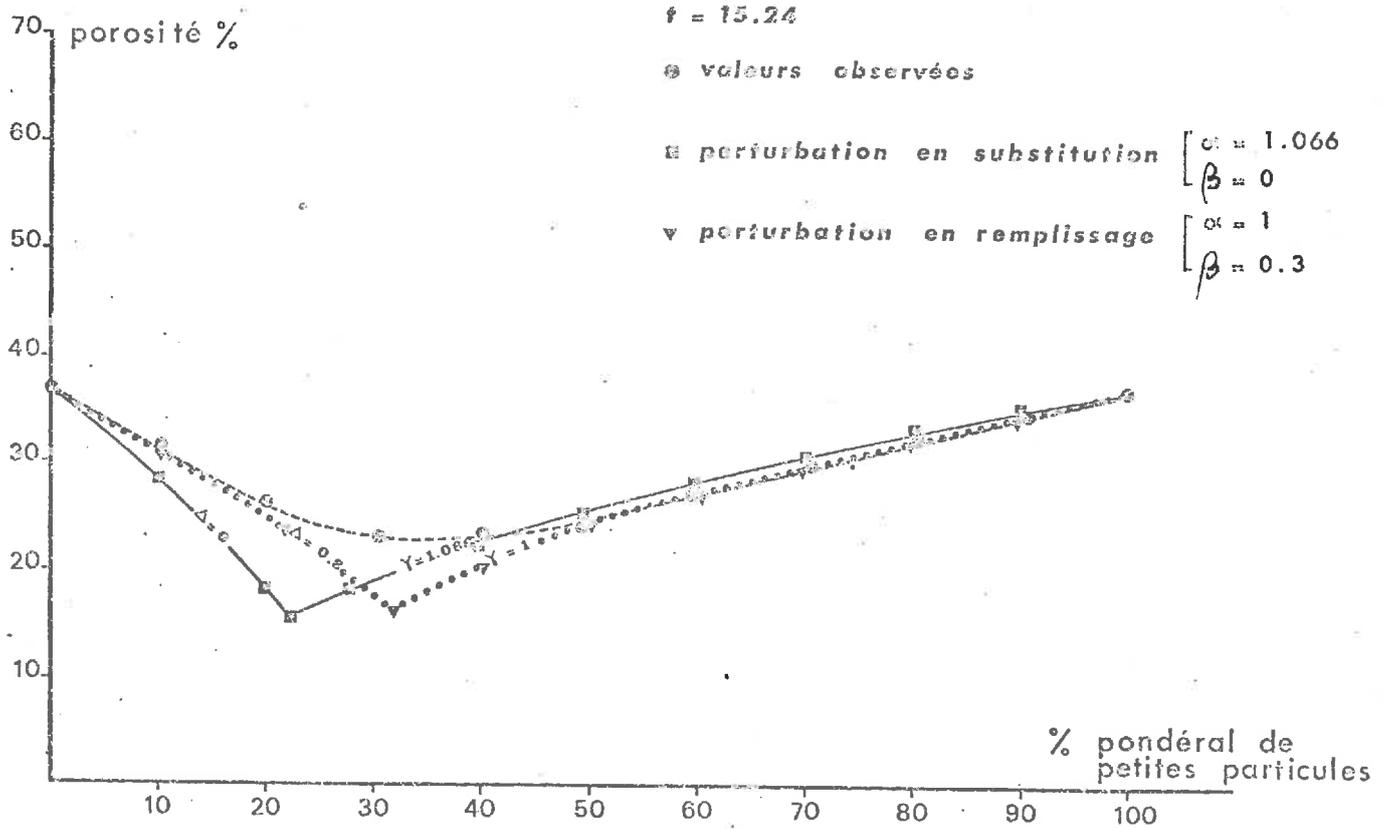
Le terme β permet ici d'exprimer que la présence de petites particules peut entraîner un réarrangement des grosses particules dans le sens d'une diminution de porosité ($\beta < 0$) ou d'un accroissement de porosité ($\beta > 0$) propre aux grosses particules.

Pour les mélanges que nous avons étudiés, les valeurs de β se situeront nécessairement entre $\beta = 0$ (loi d'additivité) et $\beta = \frac{B_0}{b_0}$ (loi de remplissage). En utilisant les expressions (11) et (12), les équations permettant le calcul des porosités s'écrivent, après simplification :

- porosité en remplissage avec perturbation = $1 - (B_0 + b(1 - \beta))$ où b est calculé avec la relation (5)
- porosité en substitution avec perturbation = $1 - (B + b_0(1 - \beta \cdot B))$ où B est calculé avec la relation (10)

Dans une étude précédente (FIES, HENIN, MONNIER 1972), nous avons utilisé ces dernières relations pour ajuster les valeurs calculées aux valeurs observées sur les mélanges. Il est apparu que

⑩ ESSAI D'AJUSTEMENT AUX VALEURS EXPERIMENTALES AVEC LES COEFFICIENTS DE PERTURBATION



l'ajustement ne pouvait être obtenu que pour les mélanges à forte teneur en grosses particules ou en petites particules, comme le montre l'exemple présenté sur la figure (10).

Pour les teneurs moyennes, il y a incompatibilité entre la forme des variations calculées et celle des variations observées. Ceci nous a conduit à rechercher une expression plus générale de porosité de mélange dans laquelle nous envisagerons, non plus une perturbation affectant l'une ou l'autre phase de constituant mais une perturbation conjointe des deux phases.

Nous utiliserons dans cette expression la loi d'additivité, qui est elle-même une fonction continue permettant le calcul de l'ensemble des valeurs de V entre B_0 et b_0 .

6.2. Modèle numérique continu

La comparaison de différentes courbes expérimentales au paragraphe 2.2. nous a montré que sur la base de la loi d'additivité il y avait toujours, à la suite du mélange, un accroissement de compacité.

Ainsi, la quantité totale de solide qui encombre, après mélange, le volume unitaire n'est que partiellement prévue par l'additivité. La part complémentaire peut être représentée par une quantité I .

Cette quantité I représente le gain, en volume de solide de particules, résultant spécifiquement du mélange des constituants.

Une relation de la forme :

$$V = V_{ad} + I$$

a l'avantage de contenir déjà un terme définissant l'ensemble des

états initiaux du système d'après la seule valeur de B calculée avec la relation (3).

Nous allons maintenant donner à I une expression conservant cette propriété.

6.2.1. Expression du terme interaction

Considérons une origine de la courbe de variation de I où la teneur en fines est de 100 p. cent. L'apport de grosses particules entraîne tout d'abord un accroissement de I puisqu'il y a échange d'un système poreux contre un système plein. I doit donc être une fonction croissante de la quantité de grosses particules. Une première expression de I peut donc être de la forme :

$$I = U \cdot \frac{B}{B_0}$$

où U est un paramètre semblable au paramètre α . Cependant, cette expression doit être pondérée par un terme rendant compte du fait que la valeur de I diminue pour les faibles teneurs en fines et doit s'annuler quand B prend la valeur B_0 . La forme retenue pour ce second terme est $1 - \frac{B}{B_0}$.

Cependant, en donnant à l'expression de I la forme d'un produit des deux termes précédent, nous avons constaté que cette fonction passait par un maximum pour une teneur en grosses particules de 50 p. cent. Pour pouvoir déplacer ce maximum vers les valeurs observées, plutôt voisines de 70 p. cent, nous avons retenu pour le second terme de I une expression de la forme

$1 - \left(\frac{B}{B_0}\right)^m$. En définitive, l'expression de V_* est alors :

$$V_* = \frac{B \cdot (B_0 - b_0)}{B_0} + b_0 + U \frac{B}{B_0} \left(1 - \left(\frac{B}{B_0}\right)^m\right) \quad (13)$$

La porosité calculée est alors définie par $1 - V_{*}$.

6.2.2. Etude de la fonction proposée

Dans la fonction proposée pour V , le dernier terme :

$$I = U \cdot \frac{B}{B_0} \cdot \left(1 - \left(\frac{B}{B_0}\right)^m\right)$$

- s'annule lorsque $U = 0$, quand $B = B_0$ ou encore quand $m = 0$
- est maximum quand m tend vers l'infini et lorsque, simultanément, U tend vers une valeur que l'on peut approcher de la manière suivante :-

I est en effet maximum quand V_{*} atteint la valeur maximale de V_{su} calculable avec la relation (9). On a alors :

$$I \text{ maximum} = V_{su} \text{ maximum} - V_{ad}$$

où V_{ad} est calculé avec la proportion du mélange qui permet de réaliser V_{su} (relations 7 et 2) au maximum.

En remarquant que si m tend vers l'infini, le terme $\left(\frac{B}{B_0}\right)^m$ est négligeable, l'on peut écrire :

$$I \text{ maximum} \neq U \text{ maximum} \cdot \frac{B}{B_0}$$

En calculant, avec la relation (3), la valeur de B pour la teneur en grosses particules correspondant à la réalisation

de V_{sub} maximum (soit $G = \frac{B_0 \bar{\gamma}_s^0}{B_0 \bar{\gamma}_s + b_0 \bar{\gamma}_s (1 - B_0)}$), on a

alors, après simplification, l'expression suivante de U maximum :

$$U \text{ maximum} = B_0 \cdot (1 - b_0) \left(1 - \frac{b_0}{B_0}\right) (2 - B_0)$$

6.2.3. Détermination des paramètres

Les valeurs numériques de U et m caractéristiques de la loi de mélange de deux classes données de particules peuvent être calculées en écrivant que la fonction (13) passe par deux points expérimentaux d'ordonnées V_1 et V_2 d'abscisses B_1 et B_2 dans un système de coordonnées exprimant V et B sous forme de fractions d'un volume apparent unitaire. Mais il s'agit là d'une méthode de résolution très laborieuse en l'absence de moyens de calcul adaptés.

Nous avons utilisé le fait que lorsque B_0 est égal ou tout au moins peu différent de b_0 l'écriture de la dérivée de I par rapport à B/B_0 est simple, soit :

$$\frac{d.I}{d.B} = U \left(1 - (m + 1) \left(\frac{B}{B_0}\right)^m\right)$$

et s'annule pour une valeur de B indépendante de U. Il est donc possible d'obtenir la valeur de m en annulant l'expression :

$$1 - (m + 1) \left(\frac{B}{B_0}\right)^m$$

dans laquelle B prend la valeur correspondant à l'abscisse du maximum expérimental : m est alors obtenu à l'intersection des courbes représentatives des deux fonctions :

$$Y_1 = \frac{1}{m + 1} \quad \text{et} \quad Y_2 = \left(\frac{B}{B_0}\right)^m$$

Le paramètre U peut alors être calculé en portant la valeur de m dans l'expression suivante tirée de la relation (13) et en remplaçant V_p par la valeur du volume de solide V maximum déterminé expérimentalement :

$$U = \frac{V \cdot B_o - b_o \cdot B_o - (B_o - b_o) B}{B \left(1 - \left(\frac{B}{B_o} \right)^m \right)}$$

L'ensemble des opérations se résume comme suit :

- intrapolation graphique de V maximum expérimental
- lecture sur graphique du G correspondant
- calcul de B par la relation d'additivité (3)
- détermination de m
- calcul de U avec la valeur de V au maximum expérimental

6.2.4. Application aux mélanges binaires de particules

Nous avons appliqué ce mode de calcul à l'ensemble des mélanges réalisés. Dans le cas des microbilles de verre, où B_o est peu différent de b_o en règle générale, l'hypothèse de la coïncidence entre le maximum de V_p et le maximum du terme interaction peut être considérée comme vérifiée. Ce n'est plus le cas, en toute rigueur, pour la majorité des mélanges sableux.

Le tableau (6) rassemble les résultats obtenus. Les valeurs de m sont toujours supérieures à 1 et les valeurs de U restent comprises dans l'intervalle zéro, U maximum correspondant à la porosité minimale en remplissage ou en substitution.

	t	$B_0 - b_0$	m	U	U maximum
Mélanges binaires de billes	19,01	- 0,011	3,300	0,324	0,327
	15,24	0,003	2,548	0,312	0,317
	9,96	0,010	2,305	0,234	0,312
	7,95	0,027	2,493	0,191	0,303
	7,81	0,001	3,173	0,213	0,318
	5,04	0,006	2,529	0,163	0,315
	2,43	- 0,012	2,500	0,095	0,327
	2,00	- 0,005	1,846	0,088	0,317
	1,96	0,007	3,290	0,086	0,319
Mélanges binaires de sables	31,04	0,074	4,800	0,176	0,319
	10,22	0,066	3,070	0,158	0,320
	3,11	0,045	2,056	0,107	0,323
	3,04	0,008	3,170	0,179	0,359

TABLEAU 6. VALEURS DES PARAMETRES U ET m DES DIFFERENTS MELANGES

Cependant, on peut remarquer que pour les deux valeurs de t les plus élevées, les valeurs calculées pour U sont déjà très proches de la valeur de U maximum. Par ailleurs, la gamme de variation des valeurs de m reste relativement restreinte.

A partir de ces données, nous avons calculé les valeurs de V_x en appliquant la relation (13) et nous les avons alors comparées à l'ensemble des valeurs expérimentales de V pour chaque série de mélange.

Dans leur ensemble, les résultats concordent de façon très satisfaisante qu'il s'agisse des microbilles ou des sables. En valeur absolue, les écarts de porosité par unité de volume apparent sont souvent inférieurs à 1 p. cent (91 p. cent des cas) compris entre 1,5 et 1 p. cent (5 p. cent des cas) et entre 1,5 et 2 p. cent pour les cas restant.

Comme le montre le tableau (7) pour chaque série de mélange, le coefficient de corrélation, toujours hautement significatif, est élevé. Les pentes des droites de régression sont très voisines de 1 et les ordonnées à l'origine peu différentes de zéro.

Si l'on considère que les variations expliquées de porosité peuvent atteindre 16 p. cent en valeur absolue, il est possible de conclure que le modèle proposé exprime valablement les variations de porosité de mélanges, en proportions variées, de deux classes de particules.

	t	r	y = V expérimental x = V _c
Mélanges binaires de microbilles	19,01	0,945	y = 1,087x - 0,069
	15,24	0,994	y = 0,994x - 0,001
	9,96	0,996	y = 0,998x - 0,003
	7,95	0,991	y = 0,991x + 0,004
	7,81	0,967	y = 0,969x + 0,015
	5,04	0,969	y = 0,983x + 0,010
	2,43	0,974	y = 0,987x + 0,005
	2,00	0,880	y = 0,893x + 0,069
1,96	0,999	y = 1,002x - 0,002	
Mélanges binaires de sables	31,04	0,999	y = 0,998x - 0,006
	10,22	0,989	y = 0,990x + 0,005
	3,11	0,921	y = 0,928x + 0,040
	3,04	0,991	y = 0,992x + 0,004

TABLEAU 7. ESTIMATION DE LA QUALITE DE L'AJUSTEMENT OBTENU AVEC LE MODELE NUMERIQUE : CHAQUE REGRESSION EST CALCULEE ENTRE L'ENSEMBLE DES VALEURS CALCULEES ET OBSERVEES POUR CHAQUE SERIE DE MELANGES.

6.2.5 Relation entre les paramètres du modèle numérique et le rapport de taille.

Compte tenu de ces résultats, nous avons cherché à tester le degré de liaison pouvant exister entre les paramètres U et m d'une part et la caractéristique t d'autre part.

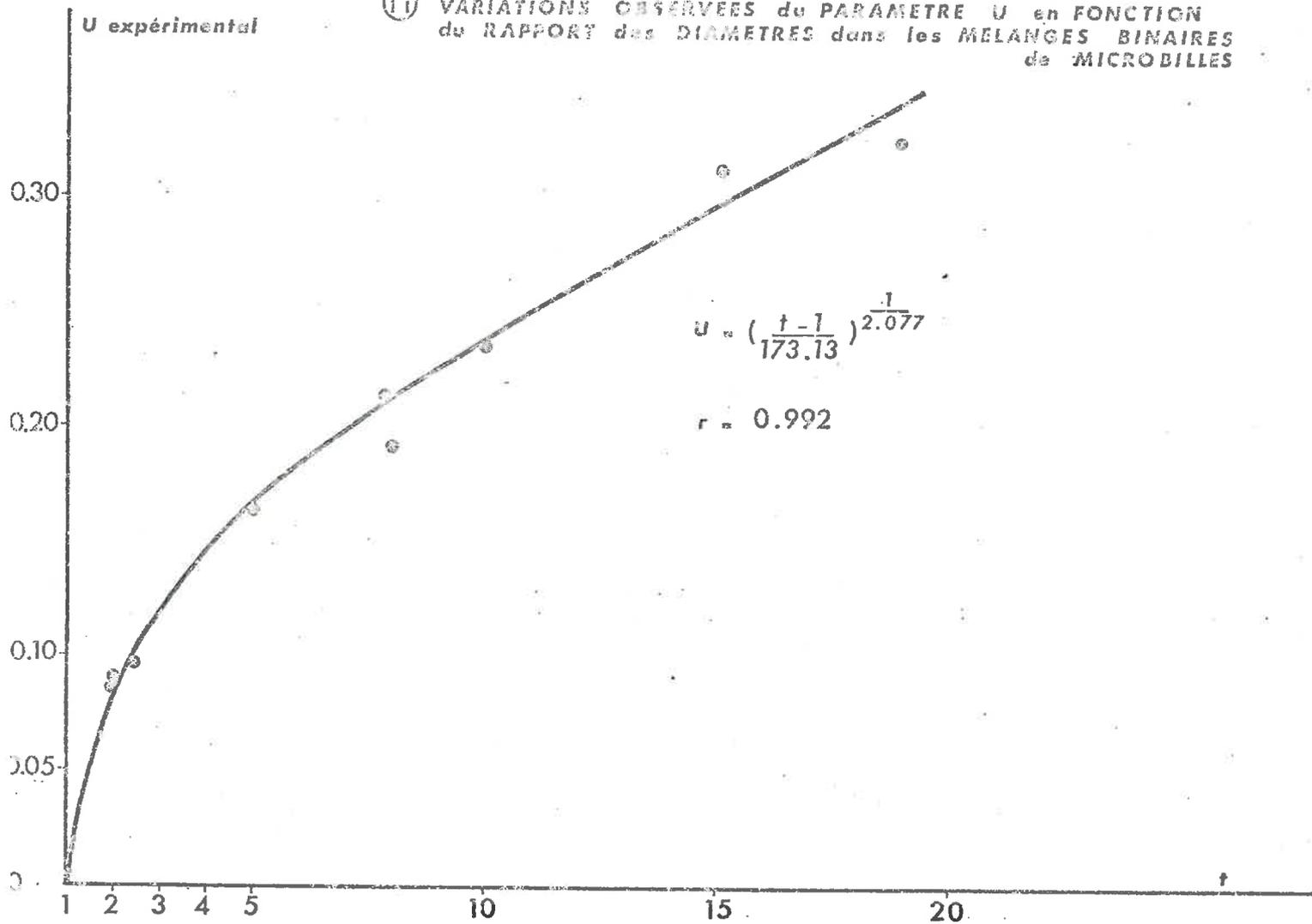
Sur les mélanges de microbilles, la représentation de valeurs de U en fonction de t montre, figure (11), qu'une liaison existe entre ces deux variables.

La recherche d'un ajustement de la forme $U = ((t - 1)/a)^{\frac{1}{2}}$ suggéré par la disposition des points et la nécessité d'annuler U quand les particules mélangées appartiennent à la même classe dimensionnelle a fourni la relation suivante, avec un coefficient de corrélation hautement significatif :

$$U = \left(\frac{t - 1}{173,13} \right)^{\frac{1}{2,077}} ; r = 0,992$$

Par contre, il n'a pu être mis en évidence de relation entre m et t . L'examen des valeurs du tableau (6) montre en effet que des valeurs semblables de m sont obtenues pour différentes valeurs de t , en particulier $t = 1,96 ; 7,81 ; 19,01$. Enfin, il n'apparaît pas de classement au niveau des sous-groupes à calibrage étroit ou large. En fait, le paramètre m a été introduit pour tenir compte de l'abscisse correspondant au minimum observé de porosité. Nous avons alors recherché s'il était possible de prévoir les valeurs de m à partir de valeurs calculées de teneurs en grosses particules dans le mélange. Cette démarche supposait qu'entre les valeurs calculées de G et les valeurs expérimentales de G_{rs} correspondant au V maximum, il y ait également une relation.

① VARIATIONS OBSERVEES du PARAMETRE U en FONCTION
de RAPPORT des DIAMETRES dans les MELANGES BINAIRES
de MICROBILLES



De fait, nous avons constaté qu'entre les valeurs de G au minimum observé de porosité et les valeurs de G_{rs} calculée avec les hypothèses de remplissage et substitution au minimum de porosité, un ajustement linéaire donnait le résultat suivant, significatif au seuil 5 p. cent, où les teneurs sont exprimées en p. cent :

$$G = 1,945 \cdot G_{rs} - 82,064 \quad ; \quad r = 0,771 \quad (14)$$

Par contre, une relation de la forme :

$$m = f(G_{rs})$$

se révèle significative seulement au seuil 20 p. cent avec un coefficient de détermination égal à 0,28.

Une telle démarche ne peut donc conduire à une prévision des valeurs de m .

En ce qui concerne les échantillons sableux, leur nombre est trop réduit pour autoriser un calcul statistique. Si l'on met à part la série particulière où $t = 3,04$, on peut toutefois constater que les valeurs de U se classent dans le même ordre que les valeurs de t . Cependant, comme pour les microbilles, les valeurs de m restent indépendantes des valeurs de t .

6.3 Discussion des approches réalisées par différents auteurs

Les résultats que nous avons obtenus et leurs limitations, quand on tente de les généraliser, même dans le cas des microbilles, font clairement apparaître la difficulté de rendre compte des porosités observées dans les mélanges à partir de données trop globales.

Cette opinion est renforcée par l'examen des relations obtenues par les chercheurs étudiant les variations de porosité des mélanges de microbilles de verre.

YERAZUNIS et ses collaborateurs (1962, 1965) ont pour leur part cherché à prévoir la porosité de mélange de microbilles dans le cas de teneurs moyennes et fortes en petites particules.

Une transcription de la relation établie par ces auteurs conduit à l'expression suivante du volume de solide total encombrant le volume unitaire :

$$V = b_0 + B \left(1 - \left(b_0 + \frac{a}{t} \right)^x \right) ; \text{ avec } a = 0,315 ; x = 0,706$$

Dans cette expression, la quantité $B \left(b_0 + \frac{a}{t} \right)^x$ représente le volume de solide de petites particules déplacées par l'introduction de B. C'est une expression équivalente à $b_0 - b$ dans la relation de substitution :

$$b_0 - b = B \cdot b_0$$

modifiée par les paramètres a et x. On remarquera aussi que plus le rapport de taille est élevé, moins cette modification interviendra. Comme le précisent les auteurs, une telle relation ne peut rendre compte de l'ensemble des variations de V quand B tend vers B_0 car, en effet, seule la limite b_0 apparaît. En pratique, cette relation ne peut être utilisée pour des teneurs en grosses particules supérieures à 40 p. cent. Par ailleurs, quand t tend vers 1 une telle relation ne correspond pas à l'hypothèse d'additivité.

On retrouve, dans le travail de STAPLE (1975), les éléments d'une démarche proche de la nôtre. Des classes de microbilles dont les granulométries ne se recoupent pratiquement pas

sont d'abord réunies en mélanges binaires. Les résultats sont exprimés par le rapport $v = \frac{\bar{Y}_s}{\bar{Y}_d}$, soit encore $v = \frac{1}{1 - \Pi}$, où Π représente la porosité. Les valeurs de v et de Π varient dans le même sens.

L'auteur retient tout d'abord les valeurs expérimentales de v correspondant à la teneur pondérale qui permet la réalisation théorique du minimum de porosité en remplissage-substitution. La valeur calculée à ce minimum constitue, par ailleurs, la base de référence v_1 . Les valeurs expérimentales de v sont considérées comme variant à l'intérieur de l'intervalle défini par ce minimum théorique d'une part et la valeur fournie par l'hypothèse d'additivité d'autre part.

La relation a ici la forme :

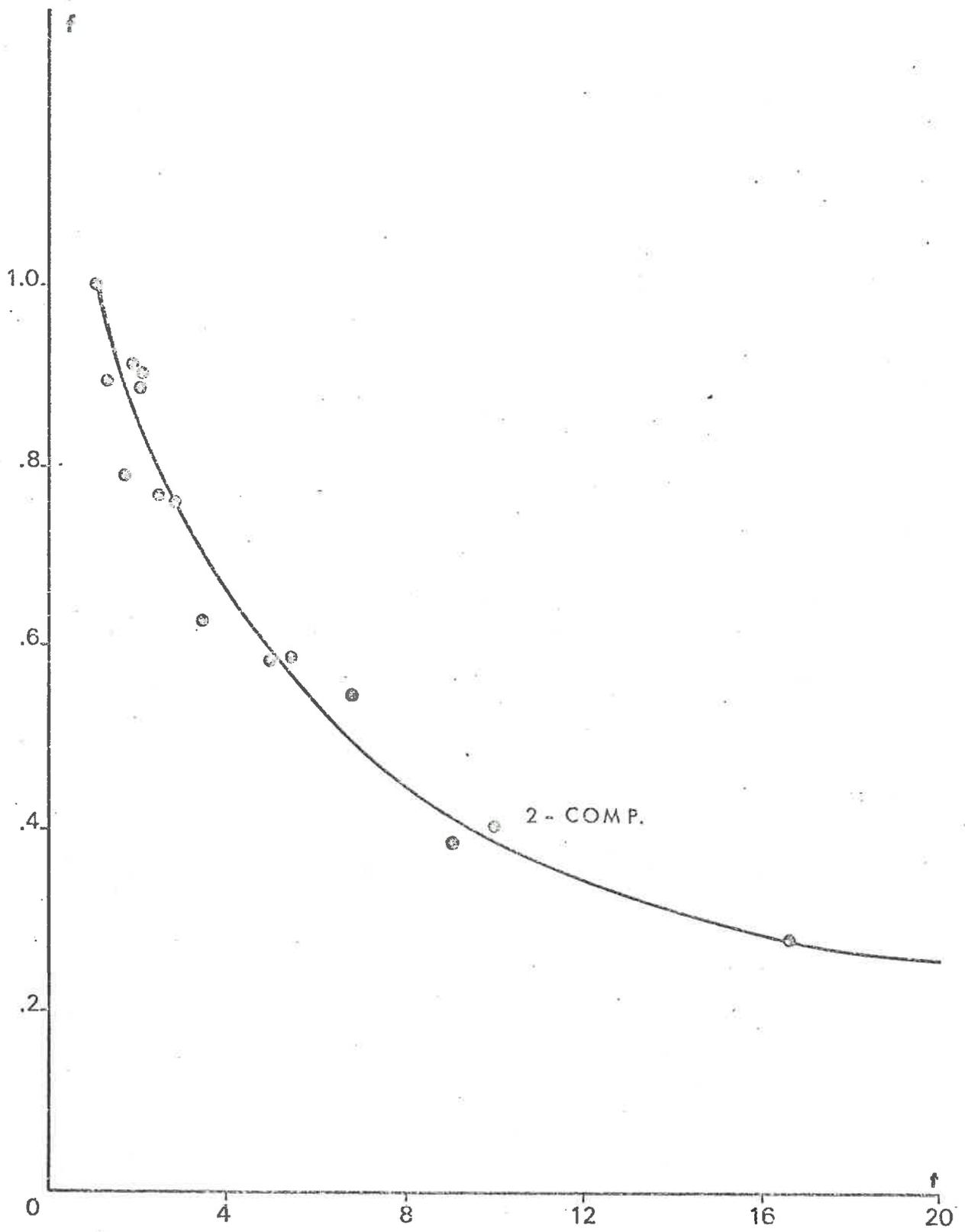
$$v = v_1 + f (V_{ad} - v_1)$$

L'auteur montre alors que les valeurs du paramètre f permettant l'ajustement sont liées aux valeurs du rapport de taille entre les particules, les valeurs de f les plus faibles correspondant ici aux valeurs de t les plus élevées (Figure 12).

Par contre, la prévision d'autres valeurs de v sur une même courbe expérimentale nécessite l'introduction d'un nouveau paramètre, minorant les valeurs de f . Ce second paramètre paraît lié à la concentration relative des particules mises en jeu.

Cette étude confirme elle aussi l'importance du rapport de taille entre particules. Mais elle reste limitée à quelques points particuliers des courbes de mélange. De plus, nous avons vu

⑫ RELATION entre le RAPPORT de TAILLES t et le PARAMETRE d'INTERACTION f d'après STAPLE (1975)



que la teneur pondérale correspondant au minimum théorique de porosité est en général bien différente de celle du minimum expérimental et surtout ne correspond pas à un point singulier sur les courbes expérimentales.

FURNAS (1931) a cherché à relier une diminution relative de porosité de mélanges, par rapport à l'additivité, au rapport de taille entre particules.

Cette diminution relative, Δv , est exprimée sous la forme suivante :

$$\Delta v = \frac{1}{\bar{\gamma}_{d_{ad}}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_d}$$

où $\bar{\gamma}_d$ représente la densité observée au minimum de porosité ; $\bar{\gamma}_{d_{ad}}$ étant calculé pour la teneur correspondant à ce minimum observé.

Pour cela, il écrit que Δv peut être défini par la relation :

$$\Delta v = k \cdot \left(\frac{1}{\bar{\gamma}_{d_{ad}}} - \frac{1}{\bar{\gamma}_{d_{rs}}} \right)$$

Dans cette relation, les densités sont calculées pour une teneur correspondant au minimum de porosité selon les lois de remplissage et de substitution.

L'auteur établit alors une relation empirique entre les valeurs de k et celles du rapport de taille, dont la forme est la suivante :

$$k = 1 - \frac{a}{t} + \frac{c}{t^2} \quad \text{avec } a = 2,62 ; c = 1,62$$

où k varie entre 0 et 1 quand t croît de 1 à des valeurs très grandes.

Cette relation fait bien apparaître l'influence particulière de t . Elle nous a, par ailleurs, suggéré une piste possible pour la prévision des valeurs de porosité dans les mélanges binaires, connaissant B_0 et b_0 :

En effet, la relation établie entre k et t permet de remonter jusqu'à la valeur de ΔV mais ne permet pas de définir celle de γ_d dans la première relation donnée par FURNAS.

Or, l'utilisation du modèle numérique continu exige la connaissance de cette valeur pour définir celle de V .

Tenant compte de l'existence de la relation (14) entre les teneurs en grosses particules correspondant respectivement au minimum observé et calculé de porosité, nous avons cherché si un ajustement était possible entre les valeurs de t et le rapport de volume de solide suivant :

$$\Delta V = \frac{V - V_{ad}}{V_{su} - V_{ad}}$$

Le numérateur correspond à la différence entre V observé au minimum expérimental de porosité et V_{ad} calculé en additivité à la teneur correspondant au minimum expérimental de porosité. Au dénominateur, la valeur de V_{su} est calculée au minimum de porosité donné par la loi de substitution. La valeur de V_{ad} est calculée pour la teneur correspondant à ce minimum théorique.

Dans les deux cas, si les porosités initiales des constituants sont peu différentes l'une de l'autre, la valeur de V_{ad} peut être assimilée à une constante.

Cet ajustement, dans le cas des mélanges de microbilles de verre, est le suivant :

$$\Delta V = 0,0315 t + 0,1195 \quad (15)$$

avec $r = 0,984$

Il apparaît alors possible, en utilisant les relations (15) et (14), d'entamer le processus de calcul défini au paragraphe 2 - 3 et de fournir une estimation des valeurs de U et de m pour une certaine catégorie de particules entrant dans les mélanges binaires.

7 - CONCLUSIONS

Nous avons confronté le résultat de mesures de porosité à des valeurs calculées à partir d'une série de modèles d'association de particules mises en mélange. Dans des cas particuliers, des lois simples sont applicables : tout se passe comme s'il y avait juxtaposition (loi d'additivité) ou comme si le remplissage ou la substitution étaient réalisés sans perturbation des arrangements propres aux particules.

Dans ces deux cas, la porosité d'un mélange binaire de composition donnée peut être calculée à partir des volumes de solide B_0 et b_0 , encombrant le volume unitaire et dont nous avons admis que les valeurs étaient des caractéristiques propres aux classes des particules utilisées.

Cette prévision quantitative s'applique à des cas limites correspondant soit au mélange de particules de deux classes identiques, soit au mélange de particules de tailles très différentes, la distribution dimensionnelle dans le mélange étant bimodale.

Leur intérêt est de fournir des références simples et générales pour l'étude de mélanges dont les caractéristiques sont plus complexes et qui présentent en général des porosités intermédiaires entre les valeurs fournies par les lois de référence.

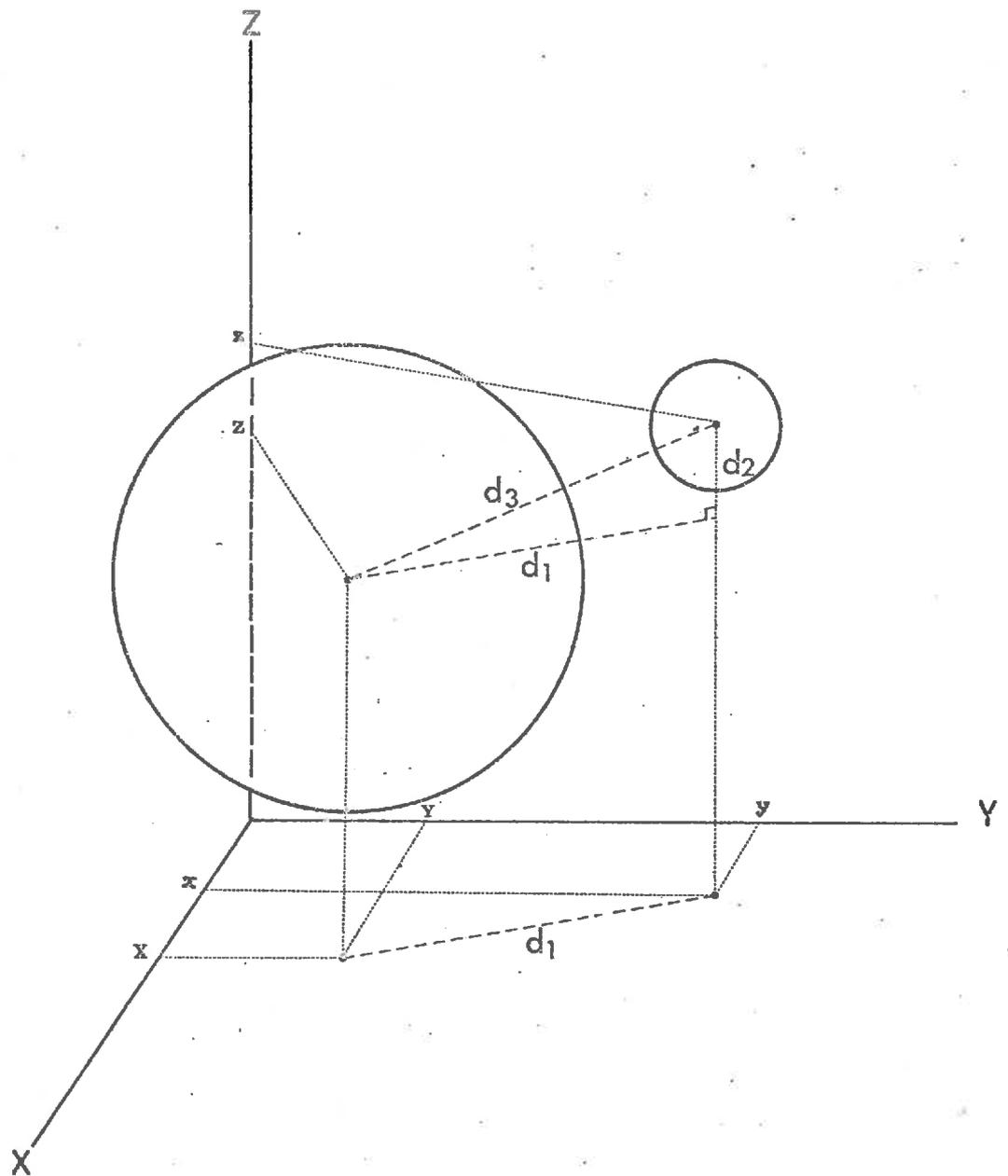
L'introduction de coefficients de perturbation dans les formules de base des lois de remplissage et de substitution permet d'obtenir une meilleure prévision quantitative de ces porosités. Cependant, dans le domaine des compositions moyennes, ces modèles ne rendent pas compte de la forme des variations observées de porosité.

Ce fait nous a conduit à rechercher une fonction générale qui, ajoutée à la loi d'additivité, rend compte des diverses possibilités de mélange tout en permettant d'en retrouver à la limite les lois simples de départ.

On constate, par rapport aux travaux antérieurs faits sur le même sujet, un certain accord entre l'ensemble des résultats.

Les formules utilisées par nos devanciers portaient toutes sur des points particuliers des mélanges ou sur une partie seulement de leurs compositions.. Il semble donc que nous ayons obtenus une solution plus générale.

Rappelons toutefois que ces modèles sont caractérisés par le fait que les particules sont isodiamétriques et sans interaction réciproque autre que celle résultant des effets stériques.



⑭ SCHEMA UTILISE POUR LA DEMONSTRATION DE LA CONDITION DE COEXISTENCE DE SPHERES DE TAILLES DIFFERENTES DANS UN MEME MASSIF

8 - INTERPRETATION GEOMETRIQUE DES LOIS D'ASSOCIATION DE PARTICULES

8.1 Présentation du problème

L'étude de la porosité de mélanges, que nous avons considérée jusqu'à présent d'un point de vue très global, a mis en évidence des effets de perturbation.

Ainsi, dans le domaine de substitution, par exemple, l'hypothèse retenue admet la stricte égalité entre le volume de grosses particules introduites et le volume encombrant de petites particules déplacées. Or, les résultats ont montré que pour toutes les valeurs du rapport de taille R/r , inférieures à 100, cette égalité n'est pas vérifiée.

Mais l'hypothèse de substitution est, nous l'avons dit, une hypothèse globale. Si nous cherchons à analyser ses conséquences au niveau de chacun des constituants d'un mélange binaire, il apparaît que la réalisation de la substitution implique des relations stériques nécessairement très contraignantes entre les particules mises en présence. Au moment de la substitution, il faut en effet, les particules n'étant ni sécables ni déformables, que la surface de la grosse particule soit l'exacte enveloppe des petites particules substituées. Autrement dit, cette surface enveloppe ne doit pas chevaucher de petites particules au niveau de l'interface grosses-petites. Par contre, s'il y a chevauchement, il y a nécessairement perturbation du système, un certain nombre de petites particules venant alors s'ajouter au lot de celles strictement prévues par la loi de substitution.

Aussi, sans nier l'existence de solutions correspondant à une surface enveloppe idéale, nous avons admis, à titre d'hypothèse de travail, la prépondérance du nombre de cas de chevauchement sur le nombre de cas de réalisation d'une stricte substitution:

A titre d'illustration, nous avons représenté sur la figure (13) la section d'un massif de billes r , telle qu'on l'observe sur une lame mince. Pour simuler un mélange, nous avons surimposé l'image de la section diamétrale d'une bille R . Les matériaux considérés n'étant ni sécables ni déformables au niveau d'énergie où nous nous situons, la mise en place du disque R déplace plus d'éléments r que ne le prévoit la substitution en interaction simple si l'on admet sur la base des résultats expérimentaux qu'il ne peut y avoir de réarrangement serré de petites.

Sur des arrangements modèles de sphères nous allons effectuer l'analyse de cet effet stérique, en choisissant un certain nombre de cas exemplaires qui permettent de dégager des explications au comportement des mélanges binaires mais qui auront nécessairement le caractère incomplet d'un schéma.

8.2 Principe de la démarche

Le choix d'une approche géométrique implique un certain nombre d'hypothèses et de limites spécifiques de la démarche, que nous allons présenter.

Considérons le cas de mélange de particules sphériques illustré par la figure(13). Les coordonnées respectives des centres des petites sphères de rayon r d'une part, du centre de la grosse sphère de rayon R d'autre part pouvaient être définies par rapport à trois axes orthogonaux, ox , oy et oz .

Pour qu'une sphère r puisse exister après l'introduction de la sphère R , il faut et il suffit que la distance de leurs centres respectifs soit supérieure ou égale à la somme de leurs rayons;

Ainsi, soient x y z et X Y Z , les coordonnées respectives d'une sphère r et de la sphère R , la sphère r ne peut coexister avec la sphère R que si la condition suivante est vérifiée :

$$(x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2 \geq (R + r)^2 \quad (I6)$$

En effet, comme le montre la figure (I4), cette condition revient à calculer la distance entre les centres des deux sphères. Sur la figure considérée, on a les relations suivantes :

$$(x - X)^2 + (y - Y)^2 = d_1^2$$

$$z - Z = d_2$$

On peut alors calculer la distance entre les centres, d_3 , à partir de la relation :

$$d_3^2 = d_1^2 + d_2^2$$

Cette relation peut s'écrire en faisant apparaître les coordonnées des centres des sphères :

$$d_3^2 = (x - X)^2 + (y - Y)^2 + (z - Z)^2$$

la suite du calcul revient à rechercher si la distance entre centres est supérieure ou au moins égale à la somme des rayons, ce qui s'écrit :

$$d_3 \geq R + r$$

L'application de la relation (16) à un massif de sphères r prises une à une permet de recenser le nombre de cas où la relation (16) n'est pas vérifiée, autrement dit de connaître le nombre de petites sphères, ne pouvant coexister avec la grosse sphère introduite dans le massif.

En posant comme hypothèse que ces petites sphères sont alors chassées du massif considéré, nous disposons du moyen de calculer la porosité du massif après "mélange".

Pour utiliser la relation (16), il est nécessaire de connaître les coordonnées des sphères présentes.

Pour cela, nous avons choisi de disposer ces sphères selon des arrangements types.

Ceci nous a permis de définir les coordonnées des sphères dans l'espace en utilisant des progressions arithmétiques simples.

Nous avons ensuite défini les mélanges binaires de sphères en fixant à priori les positions relatives des deux types de sphères impliqués.

L'analyse de l'interaction entre sphères est conduite à l'aide de la relation (16) au niveau d'un volume élémentaire. Ce dernier sera défini dans un massif de l'un des deux types de sphères considérées.

Pour le calcul de la porosité de mélange, qui fait intervenir le volume élémentaire, nous avons admis que la disposition des particules qui coexistent restait constante.

Ce n'est seulement que pour un cas particulièrement simple que nous avons été amené à envisager un réarrangement de particules.

Les domaines d'interaction des sphères de tailles différentes sont ceux de la substitution et du remplissage.

Dans le domaine de substitution, nous considérerons la présence d'une seule grosse sphère dans un massif de petites.

Pour ces dernières, nous avons retenu, comme type d'organisation celui correspondant au système rhomboédrique. C'est en effet le mode d'association, pour une population de particules isodiamétriques de forme sphérique, qui correspond à l'assemblage le plus serré possible. C'est donc à priori un modèle dans lequel la valeur de b_0 est une caractéristique intrinsèque. Une description en est donnée à la figure (15). Une telle organisation sera retenue pour les grosses sphères lors du passage vers le domaine de remplissage : c'est le domaine que nous avons appelé domaine de transition.

Enfin, le domaine de remplissage lui-même est traité comme une interaction entre deux massifs de sphères organisées selon le même système.

Dans chacun de ces trois domaines, un ou plusieurs types de dispositions relatives des petites et des grosses sphères ont été considérés.

Nous allons maintenant appliquer la démarche que nous venons de définir, au domaine de substitution, nous étudierons ensuite les domaines de transition et de remplissage.

8.3 Domaine de substitution

Nous allons considérer un massif de petites sphères de rayon r , arrangées selon un système rhomboédrique. Dans ce massif, nous allons étudier les conséquences de l'introduction d'une grosse sphère de rayon R . Chaque cas de "mélange" sera caractérisé par une valeur t du rapport R/r et par la position de la sphère R dans le massif.

8.3.1 Etude d'un premier cas de figure

8.3.1.1 Axes de référence et coordonnées des centres des sphères

Dans le massif de sphères r , nous allons considérer le plan P sur lequel les centres des sphères sont disposés au sommet d'un carré. (Figure 15)

Par rapport à ces éléments de référence, situons la grosse sphère qui pourra être, ce sera notre premier exemple, appuyée sur quatre petites sphères dont les centres sont dans le plan P. (Figure 16 b). C'est ce que nous avons appelé la position B pour la sphère R.

Nous prenons comme référence ce plan passant par le centre des quatre sphères r.

Si l'on imagine l'axe de coordonnée OZ normal au plan P passant par le centre Ω de la sphère de rayon R, la hauteur Z du centre de la grosse sphère est tel que :

$$Z^2 = (R + r)^2 - (r\sqrt{2})^2$$

soit :

$$Z = \sqrt{R^2 + 2Rr - r^2}$$

et en divisant par r^2

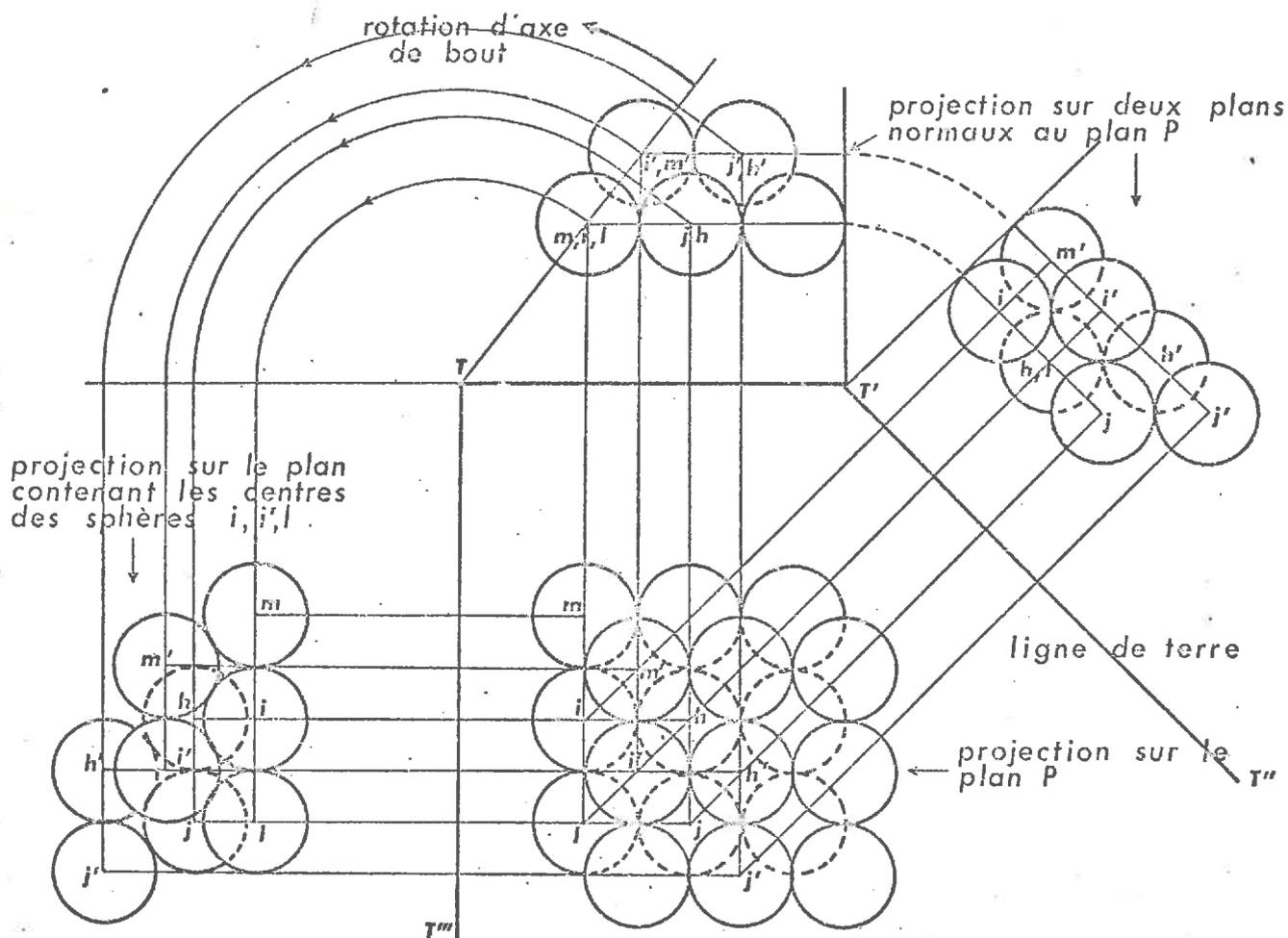
$$Z = r \sqrt{t^2 + 2t - 1}$$

Compte tenu de la position choisie pour la sphère R, les deux autres coordonnées de son centre Ω sont :

$$X = 0 \quad Y = 0$$

Soient x, y et z les coordonnées des centres des petites sphères, la distance du centre d'une petite sphère quelconque au centre de la grosse sphère s'écrit, selon l'équation (16) :

$$x^2 + y^2 + (z - Z)^2$$



15 REPRESENTATION DANS DIFFERENTS PLANS D'UN ASSEMBLAGE RHOMBOEDRIQUE DE SPHERES

Dans cette relation, Z a la valeur calculée précédemment.

Le système d'arrangement retenu pour les petites sphères permet de définir les coordonnées de leurs centres respectifs par les progressions arithmétiques suivantes, compte tenu du fait que les axes ox et oy sont dans le plan P et passent aux points de tangence des sphères r dont les centres sont situés sur ce plan (Figure 16 a) :

$$x = n.r \quad y = p.r \quad z = q.r \sqrt{2}$$

Dans ces relations r représente le rayon des petites sphères, n, p et q sont des nombres entiers tels que q d'une part n et p d'autre part soient toujours de parité différente.

Cette condition est liée au fait que, par rapport aux centres des sphères r situés sur des plans parallèles à P, tels que $q = 0, 2, 4, 6, \text{ etc } \dots$, les centres des sphères r situés sur des plans tels que $q = 1, 3, 5, 7, \text{ etc } \dots$ sont décalés chaque fois de r suivant ox et oy (Figure 16).

Compte tenu du système d'arrangement retenu pour les sphères r, ces différents plans parallèles se situent les un des autres à une distance égale à $r \sqrt{2}$ (Figure 16 a).

8.3.1.2. Condition de coexistence des sphères

Les conditions de coexistence d'une sphère r quelconque et d'une sphère R s'écrit maintenant, d'après la relation (16) :

$$(n.r)^2 + (p.r)^2 + (q.r \sqrt{2} - r \sqrt{t^2 + 2t - 1})^2 \geq r^2 (t + 1)^2$$

Après simplification, on peut donner à cette dernière relation la forme suivante :

$$n^2 + p^2 \geq 2 (q \sqrt{2 (t^2 + 2 t - 1)} + 1 - q^2) \quad (17)$$

Cette écriture est en effet adaptée au mode de calcul que nous avons retenu. Considérant successivement les plans parallèles au plan P et correspondant à des valeurs croissantes de q, nous avons calculé, pour chaque sphère dont le centre était défini par les valeurs de n et de p, les termes de la relation (14) afin de définir le nombre de cas où cette relation n'était pas vérifiée.

Nous avons pu ainsi déterminer le nombre de sphères r chassées par la mise en place de la sphère R, selon les conventions que nous avons admises au paragraphe 2. La conduite d'un tel calcul exigeait que soient définies les valeurs limites n', p' et q' correspondant soit aux coordonnées des dernières sphères r perturbées par la sphère R, soit aux coordonnées des premières sphères r non perturbées par la sphère R.

Ces valeurs nous permettent de définir, dans le massif des sphères, un volume élémentaire.

8.3.1.3. Volume élémentaire

Nous avons appelé volume élémentaire un volume géométrique à l'intérieur duquel des sphères r sont déplacées par la sphère R (Figure 16).

Ce volume est défini dans le premier quadrant des axes ox et oy. C'est un prisme droit à base carrée qui contient $\frac{1}{4}$ de sphère R.

Par ailleurs, afin de pouvoir effectuer le décompte du nombre de sphères r , les faces de ce prisme doivent passer par les centres, ou les points de tangence, des sphères r . Pour cela, la longueur c des côtés du prisme situé dans le plan P a été définie par la relation :

$$c = n'.r = p'.r$$

Dans cette relation, n' est le nombre entier dont la valeur vérifie la double inéquation :

$$R \leq n'.r < R + r$$

soit, en faisant apparaître le rapport $\frac{R}{r}$:

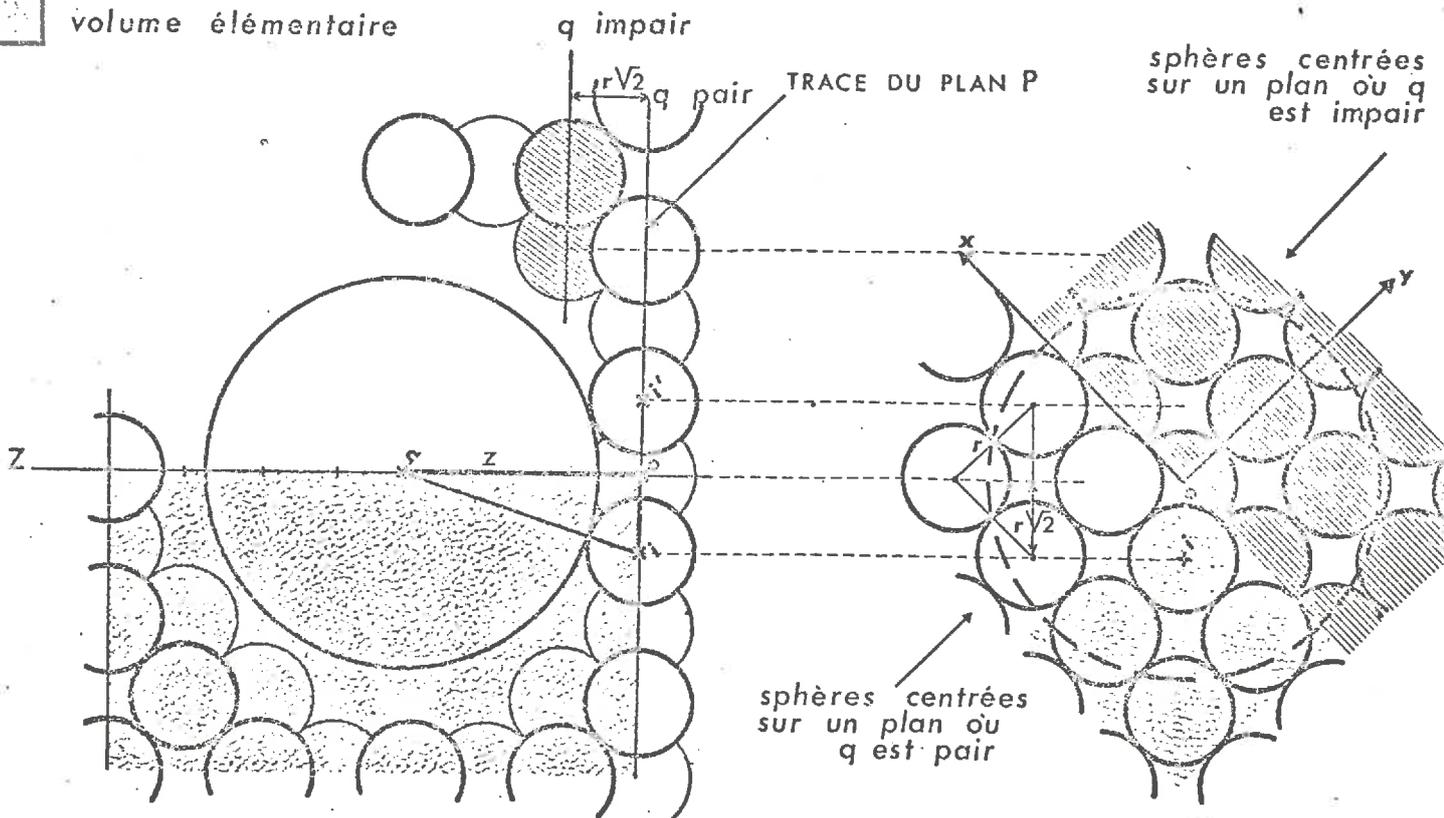
$$t \leq n' < t + 1$$

Ceci signifie que les faces du prisme, normales au plan P , passent soit par les centres des sphères r pour lesquelles les valeurs de n et de p sont les plus élevées et qui seraient chassées par la sphère R , ou bien sont tangentes à ces sphères (Figure 16 a). Nous avons admis que la hauteur du prisme correspondait à la distance entre les plans, parallèles au plan P , dont les couches de sphères r n'étaient pas perturbées par la présence de la sphère R .

Ces plans sont respectivement celui pour lequel $q = 0$ et $q = q'$. Cette dernière valeur doit être discutée en fonction de la parité du plan considéré.

⑩ SUBSTITUTION DE SPHERES r

□ volume élémentaire



⑥ projection sur un plan normal à P

⑦ projection sur un plan P

Si q' est un entier pair, l'expression :

$$q' \sqrt{2(t^2 + 2t - 1)} + 1 - q'^2$$

dans la relation (14) doit être inférieure ou égale à 1, la plus petite valeur de n et p étant 1.

Si q' est un entier impair, cette même expression doit être inférieure ou égale à zéro, qui représente la première valeur possible pour n et p .

Le calcul montre que pour une valeur donnée de t , il existe deux solutions positives, x_1 et x_2 qui permettent de définir deux valeurs entières correspondant à q' , soit :

$$x_1 \leq q'1 < x_1 + 1 \quad x_2 \leq q'2 < x_2 + 1$$

On retiendra pour q' la plus petite des deux valeurs obtenue, qui correspond au premier plan, parallèle à P , contenant une couche entière de sphères r non perturbées par la sphère R .

8.3.1.4. Porosité du volume élémentaire et sa variation

Dans le volume élémentaire, avant introduction de la sphère de rayon R , le nombre de sphères r contenues dans un plan parallèle au plan P est de $\frac{1}{4} \cdot n'^2$, quelle que soit la parité de q .

Le volume élémentaire étant limité en $q = 0$ et $q = q'$, par deux demi-couches complètes de sphères r , le nombre total de couches complètes est égal à q' .

Le nombre initial de sphères r dans le volume élémentaire est alors :

$$N = 0,25 n'^2 \cdot q'$$

Pour une valeur donnée de t , le nombre de cas où la relation (17) n'était pas vérifiée peut être calculé. Ceci a été réalisé sur ordinateur sur la base de programmes A.P.L. A chacun de ces cas, on a alors fait correspondre les valeurs 1, 1/2, 1/4 ou 1/8 selon qu'il s'agissait d'une sphère entière ou située sur la limite du volume élémentaire considéré. La somme de ces valeurs correspond au nombre N'' de sphères r chassées du volume élémentaire.

Après mélange, l'expression générale de la porosité du volume élémentaire a comme expression :

$$n = 1 - \frac{\text{volume total des sphères}}{\text{volume élémentaire}}$$

Soit N' le nombre de sphères r restant après mélange, déterminée par la différence $N - N''$ et en rappelant que le volume élémentaire contient un quart de la sphère R , le volume total des sphères est égal à :

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \cdot N' + \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3.$$

Compte tenu du système d'arrangement fixé pour les petites sphères, on sait par définition qu'au volume occupé par une sphère r , soit $\frac{4}{3} \pi r^3$, correspond un volume encombrant égal à $4 r^3 \sqrt{2}$. La porosité d'un tel arrangement, soit $1 - \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2}}$ est égale à 25,95 p. cent.

Le volume encombrant des sphères r initiales, c'est-à-dire le volume élémentaire, est alors égal à :

$$\frac{4}{3} \pi r^3 \cdot N \cdot \frac{3 \sqrt{2}}{\pi}$$

La porosité du volume élémentaire, après introduction de la sphère est alors, après simplification :

$$\Pi = 1 - \frac{0,25 R^3 + r^3 N'}{r^3 N} \cdot \frac{\pi}{3 \sqrt{2}}$$

soit, en faisant apparaître le rapport de taille :

$$\Pi = 1 - \frac{0,25 t^3 + N'}{N} \cdot \frac{\pi}{3 \sqrt{2}} \quad (18)$$

Afin de pouvoir faire correspondre à chaque valeur de la porosité une teneur pondérale en sphère r , nous avons supposé que les différentes sphères avaient une même densité.

En fonction de t et de N' , cette teneur pondérale est exprimée par la relation suivante :

$$g = \frac{N'}{N' + 0,25 t^3} \cdot 100 \quad (19)$$

Pour décrire maintenant la courbe de variation de la porosité, dans le domaine de substitution, quand la teneur en sphères r croît, nous avons admis que des sphères r se disposaient à la périphérie du volume élémentaire, toujours selon un arrangement rhomboédrique. Pour la porosité, ceci revient, dans la relation (18), à augmenter de N_* le nombre de sphères N' déjà présentes

et à augmenter de N_{**} le nombre N de sphères r initiales permettant le calcul du volume encombrant :

Après simplification, on obtient :

$$\eta = 1 - \frac{0,25 t^3 + N' + N_{**}}{N + N_{**}} \cdot \frac{\pi}{3 \sqrt{2}} \quad (18')$$

De même, la relation (17) devient alors :

$$g = \frac{N' + N_{**}}{N' + N_{**} + 0,25 t^3} \cdot 100 \quad (19')$$

Enfin, on remarquera que le volume élémentaire retenu n'est pas le plus petit possible dans le domaine de substitution et qu'il est possible de diminuer la teneur en sphères r correspondante. Mais ceci implique que soit défini l'arrangement propre aux sphères R , ce que nous envisagerons dans le domaine de transition.

8.3.2. Données obtenues

Elles correspondent rappelons le à la position B de la sphère R .

Parmi les valeurs de t qui ont été successivement considérées, un premier groupe caractérise les valeurs du rapport correspondant à ce que nous appelons des mélanges au sens strict.

Un second groupe, correspondant plus précisément à des valeurs de t peu différentes de 1, devait être également considéré : nous avons rattaché ces valeurs non plus à un problème de mélange, mais à celui de la porosité propre à une population en fonction de son calibrage.

Nous allons présenter et discuter tout d'abord les résultats correspondant aux valeurs caractérisant les mélanges, où t prend successivement la valeur 2, 5, 8, 10, 20 et 100.

8.3.2.1. Cas général.

Le premier élément fourni par le calcul des conditions d'existence (17) est le nombre N'' de sphères r chassées du réseau. Les valeurs de N'' peuvent tout d'abord être comparées à celles calculées selon l'hypothèse d'une stricte substitution.

Rappelons que selon cette hypothèse, le volume encombrant de petites particules chassées d'un massif est égal au volume occupé par la grosse particule introduite dans le massif, soit :

$$B = b' \frac{1}{b_0}$$

En posant que b' représente le volume d'un nombre S'' de sphères r chassées du volume élémentaire, on peut écrire :

$$S'' = \frac{b'}{\frac{4}{3} \pi r^3}$$

t	2	5	8	10	20	100
Teneur en sphères r.	42,86	39,32	38,46	39,39	39,48	40,01
Porosité % modèle géométrique	35,21 (270)	32,21 (266)	25,95 (218)	23,64 (195)	18,43 (152)	13,08 (106)
Porosité % substitution	13,06 (100)	12,11 (100)	11,88 (100)	12,13 (100)	12,15 (100)	12,30 (100)

TABLEAU 9 : POROSITES COMPAREES DANS LE VOLUME ELEMENTAIRE, EN
FONCTION DE t.

Rapport de taille	t	2	5	8	10	20	100
modèle géométrique	N''	2,5	36	128	237,5	1 695,25	188 274,5
Substitution stricte	S''	1,481	23,140	94,782	185,120	1 480,961	185 120,122
$100 \frac{N''}{S''}$		163,8	155,6	135,0	128,3	114,5	101,7

TABLEAU 8 : NOMBRE DE SPHERES r CLASSEES DANS LE MODELE GEOMETRIQUE ET EN SUBSTITUTION LORS DE L'INTRODUCTION D'UNE SPHERE R DANS UN VOLUME ELEMENTAIRE, POUR DIFFERENTES VALEURS DU RAPPORT DE TAILLE.

ou encore :

$$S'' = \frac{B \cdot b_0}{\frac{4}{3} \pi r^3}$$

En se référant, comme pour le calcul de N'' au quart de volume de sphère R ou a alors :

$$B = \frac{1}{4} \cdot \frac{4}{3} \pi R^3$$

Enfin, compte tenu de l'arrangement des petites sphères r ; b_0 a pour expression :

$$b_0 = \frac{\pi}{3 \sqrt{2}}$$

Après simplification, le nombre de sphères r chassées en hypothèse de substitution s'exprime comme suit :

$$S'' = 0,25 t^3 \frac{\pi}{3 \sqrt{2}}$$

La comparaison des valeurs obtenues rassemblées dans le tableau (8) est exprimée par le rapport $100 N''/S''$. Elle permet de constater d'une part que le nombre de sphères déplacées dans l'approche géométrique est toujours plus élevé que celui prévu par la substitution, d'autre part que l'écart entre N'' et S'' est d'autant plus important que t est proche de l'unité.

Le fait de pouvoir constater un écart entre les deux types de résultats implique que dans les exemples étudiés, il y a toujours chevauchement. Cependant, bien que toujours placé dans

un cas défavorable à la réalisation d'une stricte substitution, une convergence se manifeste quand la valeur de t est suffisamment élevée. Il n'y a donc pas de contradiction fondamentale entre l'hypothèse de chevauchement retenue et vérifiée ici et la réalisation de la substitution que l'on a pu par ailleurs vérifier expérimentalement.

Nous pouvons considérer en effet que l'écart entre les valeurs de S'' d'une part et N'' d'autre part est lié essentiellement à la teneur relative en sphères r limites, situées à l'interface grosse-petites particules, par rapport aux sphères r entièrement incluses dans la sphère R .

Or, cette teneur relative en sphères limites décroît quand augmente la valeur de t . En posant par exemple, que le volume v de la zone d'interface où se situent les sphères limites est fonction de la différence entre les volumes respectifs d'une sphère de rayon $R + r$ et d'une sphère $(R - r)$, l'expression de ce volume en fonction de t a la forme suivante :

$$v = \frac{4}{3} \pi r^3 \cdot ((t + 1)^3 - (t - 1)^3)$$

Après développement, il apparaît que v est une fonction en t^2 . En remarquant que le nombre relatif de sphères limites est proportionnel au rapport entre v et $\frac{4}{3} \pi t^3 r^3$, volume de la sphère R , il ressort que ce nombre est proportionnel à $\frac{1}{t}$.

Nous allons maintenant considérer les résultats exprimés en termes de porosité du volume élémentaire. Ces résultats portés au tableau (9) montrent un classement des porosités en fonction de t , comparable à celui constaté sur les mélanges expérimentaux

où, aux valeurs les plus élevées de t , correspondent à teneurs comparables, les porosités les plus faibles. En comparant sur la base de l'indice 100 les valeurs de Π du modèle géométrique et celles calculées en hypothèse de substitution, on constate à nouveau que l'accord n'est satisfaisant que pour une valeur élevée de t .

Si on compare maintenant à la porosité initiale du massif de sphères r , les valeurs de Π du modèle géométrique, il apparaît, et cela est clairement visible sur le graphique (17) que les "mélanges" n'aboutissent pas tous à une diminution de porosité quand augmente la teneur en sphères R , comme le voudrait le processus de stricte substitution. Pour la position B donnée à la sphère R , ce n'est que lorsque les valeurs de t sont égales ou supérieures à 8 que la porosité du volume élémentaire reste égale ou devient inférieure à la porosité initiale du massif de petites sphères.

L'approche géométrique met donc bien en évidence que la porosité totale est au moins la résultante d'un double processus. Le premier est lié aux sphères limites : leur départ tend à accroître le volume d'encombrement de la sphère R . Le second dépend de la stricte substitution, où un volume poreux est remplacé par un volume plein.

Quand t est petit, la teneur relative en sphères limites est grande et c'est le premier processus qui l'emporte. En dessous d'une valeur t correspondant à un équilibre entre les deux processus, la teneur relative en sphère limite décroît et le second processus apparaît prépondérant.

Nous avons analysé les conséquences de l'implantation d'une sphère R en position B dans un massif de sphères r. Les effets stériques d'encombrement d'une "grosse" sphère, modélisés par la relation d'exclusion des "petites" sphères limites apparaissent croissants quand les valeurs de t diminuent. Or pour des valeurs de t proches de l'unité, ce sont les effets de perturbation au sein d'une population qui sont alors concernés. C'est cet aspect particulier que nous allons considérer maintenant.

8.3.2.2. Cas particulier du calibrage.

Dans la pratique, les études de mélange de particules sont conduites à partir de population non isodimensionnelles. Ces populations sont nécessairement constituées d'éléments qui, même quand ils sont sphériques, ont un rayon compris dans l'intervalle $r \pm \Delta r$. La valeur maximale prise par Δr est liée aux conditions de préparation, par exemple l'écart entre deux dimensions de maille pour le tamisage, ou encore l'intervalle de temps quand on opère par sédimentation.

Nous allons considérer tout d'abord le cas extrême d'une sphère R qui ne diffère que de ϵ de la dimension des sphères r, soit $t = 1 + \epsilon$.

D'après les définitions du paragraphe I.3., les caractéristiques du volume élémentaire sont alors les suivantes :

- côté de la maille $c = 2r$
- nombre initial de sphères r $N = 3$
- nombre de sphères r restant après
substitution $N' = 1,25$
- couche limite entière $q' = 3$

L'examen de la figure (18) permet de préciser que les sphères r chassées appartiennent d'une part à la couche $q = 1$, d'autre part à la couche $q = 2$. Cette dernière est totallement vide après substitution.

La porosité d'un tel volume élémentaire s'écrit d'après la relation (18) :

$$\eta = 1 - \frac{0,25 t^3 + 1,25}{3} \frac{\pi}{3\sqrt{2}}$$

L'étude des conditions d'existence (17) des sphères r dans le volume élémentaire, quant t varie, montre que les caractéristiques du volume élémentaire sont inchangées pour t tel que :

$$1 + \varepsilon \leq t \leq 1,357$$

Pour $t = 1,357$ la sphère substituante est alors tangente à la sphère r de la couche $q' = 3$ située à la verticale.

Les valeurs de porosité pour les deux valeurs limites de t sont alors :

$t = 1 + \varepsilon$	$\eta = 62,96$ p.cent	$g = 83,33$ p.cent
$t = 1,357$	$\eta = 53,73$ p.cent	$g = 66,68$ p.cent

Ces résultats extrêmes sont liés à l'hypothèse de rigidité de l'assemblage des sphères r . L'existence d'une couche vide nous a conduit à envisager son réarrangement.

Celui que nous avons envisagé consiste à effondrer la couche $q' = 3$ et à la translater pour que les sphères de cette couche occupent des positions proches de celles qu'occupaient les sphères de la couche 2, ainsi que le montre la figure (19).

La hauteur du volume élémentaire a alors comme valeur le double de la cote du centre de la sphère R soit :

$$2 r. \sqrt{t^2 + 2 t - 1}.$$

La porosité a comme expression :

$$\Pi = 1 - \frac{\pi}{6} \frac{1,25 + 0,25 t^3}{t^2 + 2 t - 1}$$

Les valeurs concernant la porosité de volumes élémentaires après rearrangement sont alors :

pour $t = 1 + \varepsilon$	$\Pi = 44,46$ p.cent	avec $g = 83,33$ p.cent
pour $t = 1,357$	$\Pi = 47,94$ p.cent	avec $g = 66,68$ p.cent

Ces résultats montrent que malgré le réarrangement, la présence de 20 à 30 p.cent de sphères mal calibrées perturbe profondément l'organisation rhomboédrique initiale.

Ceci est à rapprocher du fait que dans les populations de billes utilisées, nous n'avons jamais mis en évidence de porosité voisine de 26 p.cent. Par ailleurs, de nombreux chercheurs ont également constaté l'impossibilité pratique de réaliser des assemblages rhomboédriques de billes. Ainsi, SCOTT (1960) mesure sur des populations de billes dont l'intervalle de calibrage est réduit ($t = 1,008$) une porosité totale toujours comprise entre 36 et 38 p.cent.

8.3.3. Porosité du volume élémentaire et position de la sphère R.

Il était illusoire de tenter, avec le type d'approche que nous utilisons, une étude de l'ensemble des positions possibles d'une sphère R dans un massif de sphères r car nous ne disposons pas d'une relation liant la position de la sphère R au nombre de sphères r déplacées.

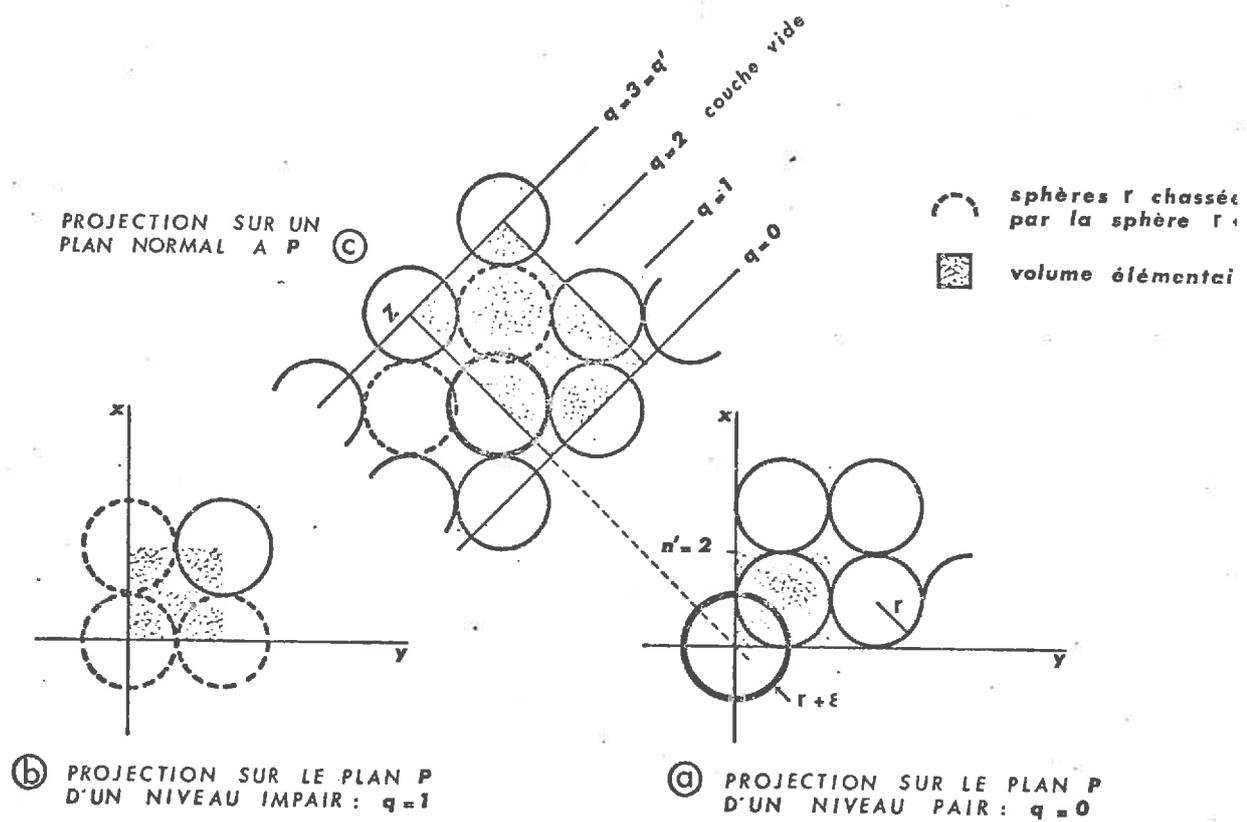
Il était cependant probable qu'entre la solution idéale de substitution et celle du cas de chevauchement maximum, une suite de cas intermédiaires pouvait exister.

C'est pourquoi nous avons considéré deux nouveaux cas de figure, illustrés sur la (figure 20).

Dans le cas de figure appelé A, la sphère R est tangente à une sphère r placée à sa verticale et centrée sur le plan P, où $q = 0$. En position C, la sphère R a son centre situé sur un plan parallèle au plan P et contenant les centres de sphères r. (figure 20). Dans ce dernier cas, ce plan devient un plan de symétrie pour le volume élémentaire.

En position A, le centre de la sphère R a comme cote $Z = R + r$, soit $Z = r (t + 1)$. En position C, ce même centre a pour cote $Z = h \cdot r \sqrt{2}$. Dans ce dernier cas, h est un nombre entier dont la valeur autorise à la fois le centrage de la sphère R dans un plan contenant les centres de sphères r et la non intersection avec la sphère r centrée sur le plan P et situé à la verticale de la sphère R.

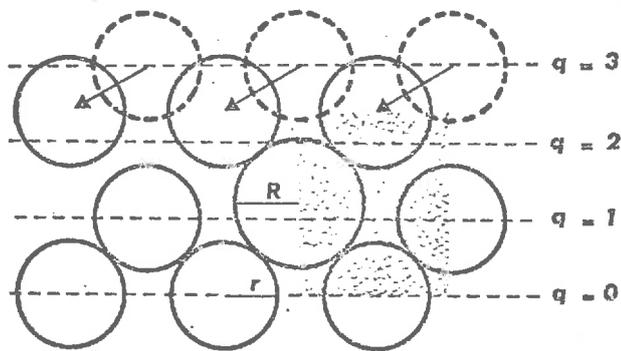
18 CAS DU CALIBRAGE : R EST PEU DIFFERENT DE r





volume élémentaire

PROJECTION SUR
UN PLAN NORMAL A P



① CAS DU CALIBRAGE : REARRANGEMENT DES SPHERES DE RAYON r POUR
 $1+\epsilon \leq t \leq 1.357$

Ceci implique que h soit le premier des nombres entiers qui vérifie la relation assurant la non intersection soit :

$$\frac{h \cdot r \sqrt{2}}{R + r} \geq 1, \text{ soit } h \geq \frac{t + 1}{\sqrt{2}}$$

Pour les deux positions considérées, la relation (16) s'écrit :

$$n^2 + p^2 \geq 2 q \sqrt{2} \cdot (t + 1) - 2 q^2 \quad \text{pour la position A}$$

$$n^2 + p^2 \geq (t + 1)^2 - 2 (q - h)^2 \quad \text{pour la position C}$$

La figure (20) rassemble les variations calculées de porosité, pour différentes valeurs de t , en fonction de la teneur en sphères r .

On peut tout d'abord constater que pour une même valeur de t , les trois positions considérées délimitent un éventail qui est plus ou moins ouvert selon la valeur donnée à t , l'ouverture maximum apparaissant, pour les exemples traités, quand t prend la valeur 8.

Cependant, et en fonction du rôle de moins en moins important des sphères r en position limite, il est certain que les différences de porosité liées aux positions de la sphère R disparaissent pratiquement quand t prend des valeurs élevées. L'amorce d'une telle évolution apparaît quand on compare les éventails de porosité obtenus respectivement pour $t = 10$ et $t = 15$.

Ensuite, il apparaît que la position donnée à la sphère R ne conduit pas à un même classement des courbes dans un éventail correspondant à une valeur donnée de t. Ainsi pour $t = 2$, on a le classement de porosité suivant, à valeur égale :

$$A > C > B$$

puis, pour $t = 5$

$$C > A = B$$

et pour $t = 8$

$$A > B > C.$$

Enfin, entre les différents éventails, des zones d'inclusion totale peuvent exister, comme c'est le cas entre $t = 8$ et $t = 10$.

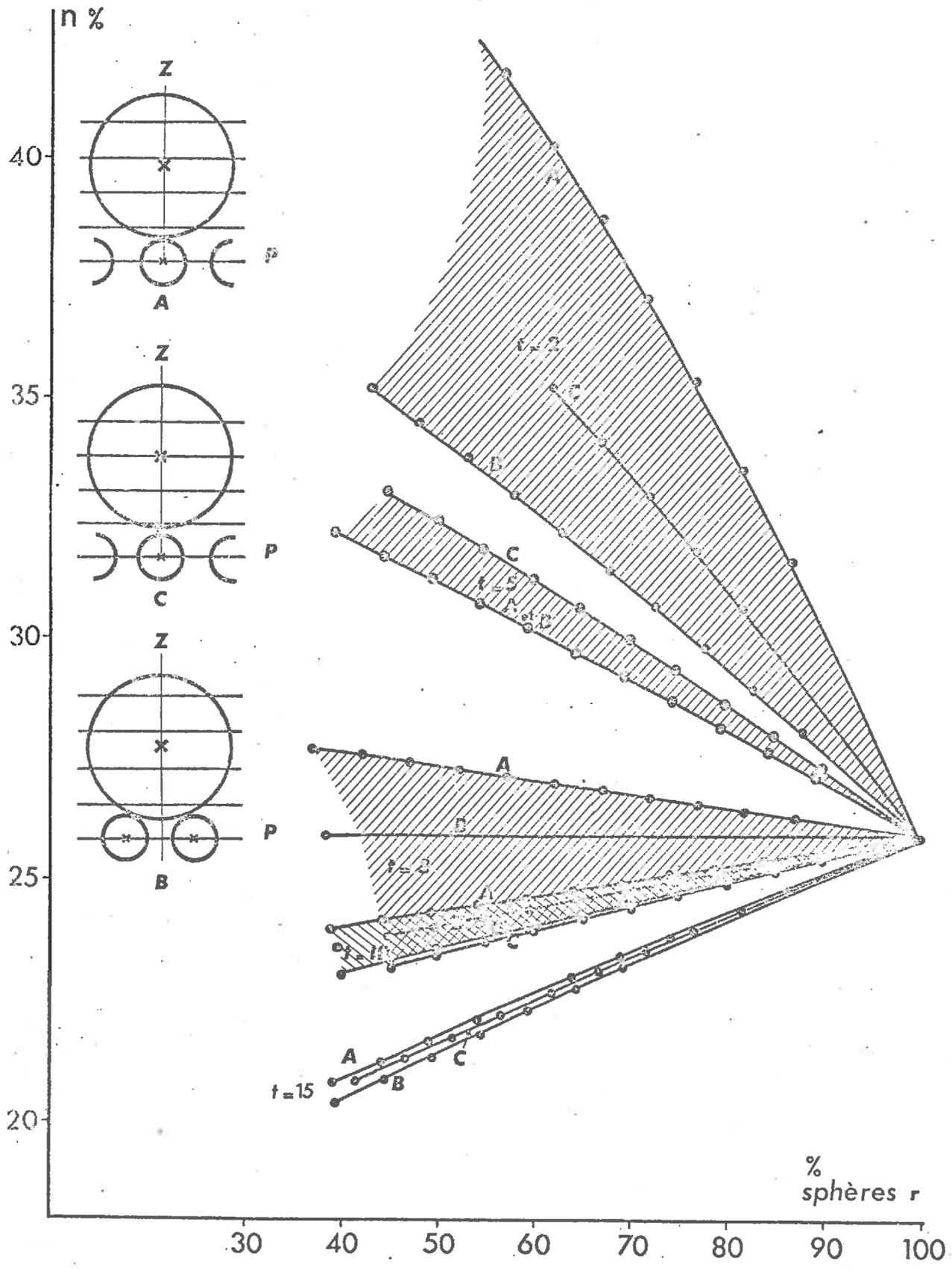
Cependant, en considérant les valeurs moyennes, il demeure que le classement des porosités de maille demeure essentiellement fonction des valeurs attribuées à t.

8.3.4. Conclusions

Ces résultats nous conduisent à formuler les deux remarques suivantes :

- le rapport de taille n'est pas le seul critère qui rende compte d'un effet de perturbation puisqu'il existe en fait différents degrés de réalisation de la substitution pour une même valeur de t. Il est même possible qu'à une autre échelle d'observation (lame mince), ceci soit à l'origine d'une grande hétérogénéité qualitative et quantitative de la porosité.

10 POSITION RELATIVE DES SPHERES ET POROSITE TOTALE



- d'une façon globale, en considérant les valeurs moyennes, on retrouve cependant bien un classement des courbes de porosité en fonction des valeurs attribuées à t .

8.4. Domaine de transition.

Comme nous l'avons déjà remarqué, le volume élémentaire tel que nous l'avons défini, ne permet de traiter qu'une partie du problème des porosités de mélange. Il nous reste à considérer les conséquences d'un accroissement de la teneur en grosses particules au delà du seuil fixé dans le volume élémentaire.

Pour celà, il est nécessaire de définir l'arrangement que nous allons donner aux sphères R et qui sera un arrangement lâche, ces sphères n'étant pas au contact dans leur position initiale.

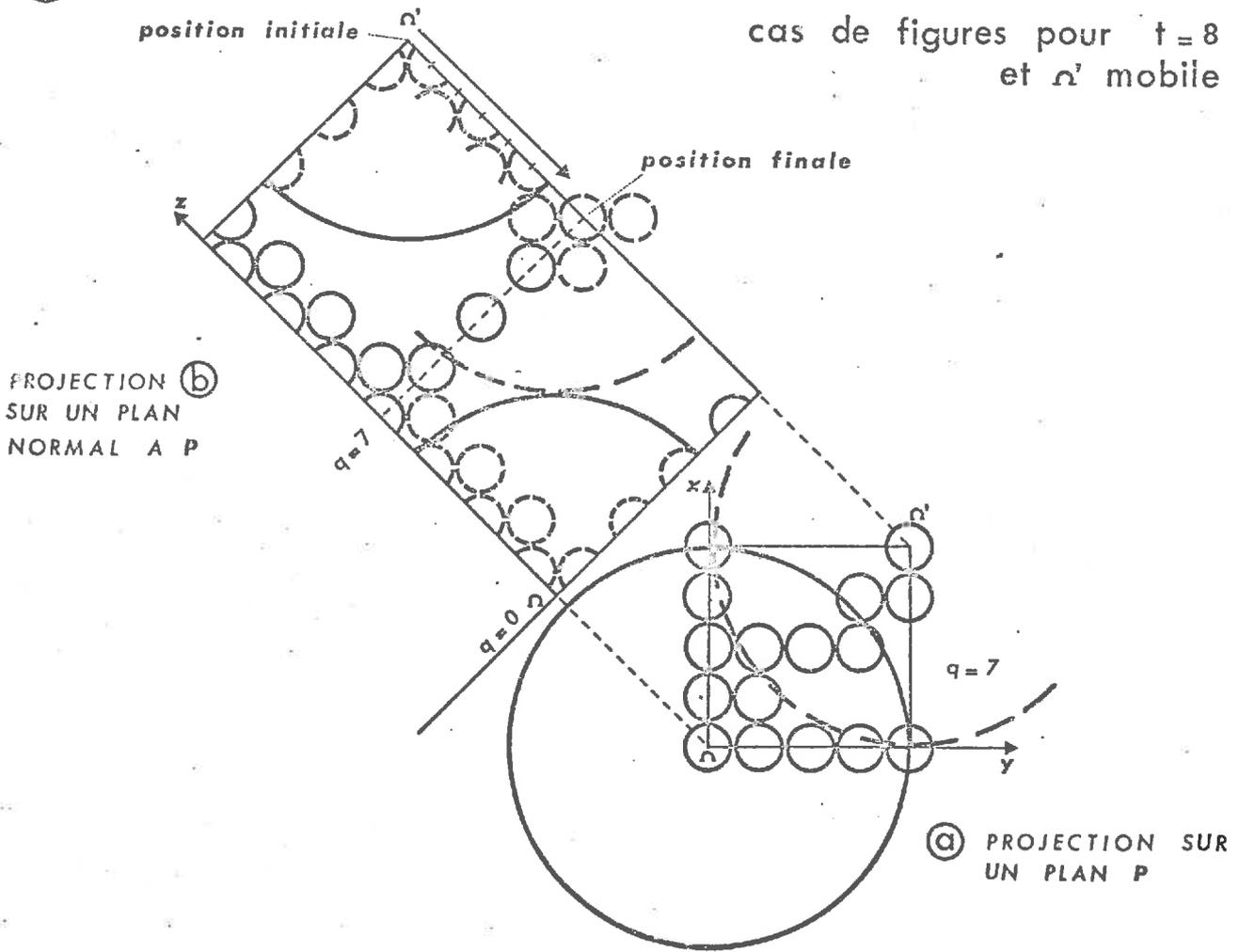
Le nouveau volume élémentaire que nous définirons doit permettre de se rattacher aux résultats déjà obtenus dans le domaine de substitution.

Par ailleurs, un mode de rapprochement des sphères R sera retenu afin de permettre une évolution du volume élémentaire vers le domaine du remplissage, où les sphères R seront tangentes les unes aux autres et assemblées selon un arrangement rhomboédrique.

8.4.1. Définition du modèle dans le domaine de transition.

Parmi les cas de figure étudiés pour la sphère R, la position C présente l'avantage de permettre de passer facilement

②① DOMAINE DE TRANSITION DE LA SUBSTITUTION AU REMPLISSAGE
 cas de figures pour $t=8$
 et α' mobile



d'un volume élémentaire défini dans un massif de petites sphères à un volume élémentaire défini dans un massif de grosses sphères. En effet, le plan parallèle à P sur lequel est centré la sphère R en position C, est un plan de symétrie également pour les sphères r.

Le nouveau volume élémentaire est présenté sur la figure 21, b,. La partie de ce volume limitée par les plans tels que $q = 0$ et $q = 7$, dans l'exemple choisi où $t = 8$, représente un demi volume élémentaire, une sphère R étant centrée en Ω sur le plan P et Ω étant pris comme origine des axes coordonnées. La seconde moitié du volume élémentaire contient une sphère R centrée en Ω' , les coordonnées X' et Y' de ce centre étant égale à R (figure 21, a,) afin de permettre ultérieurement d'obtenir un arrangement rhomboédrique des sphères R par translation du centre Ω' normalement au plan P.

Quand ce volume élémentaire est équivalent au volume considéré dans le domaine de substitution, la distance entre les centres Ω et Ω' représente deux fois la distance d'un des centres au plan parallèle au plan P et contenant une couche complète de sphères r.

Si la côte de Ω est $Z = 0$, la côte de Ω' s'écrit alors :

$$Z' = 2h r \sqrt{2}$$

Comme dans le calcul précédent, h est un nombre entier tel que sa valeur autorise le centrage de la sphère R dans un plan parallèle à P et contenant les centres de sphères r et vérifie l'inéquation précédente :

$$h \geq \frac{t+1}{\sqrt{2}}$$

Ceci signifie ici qu'il existe dans le volume élémentaire, entre les deux sphères R, une couche entière de sphère r. Nous allons maintenant admettre que l'augmentation de la teneur en sphères R se traduit par un rapprochement des sphères R. Ce rapprochement entraîne en effet le départ de sphères r.

Dans le volume élémentaire initial, nous supposons que le centre Ω' glisse le long d'un axe normal au plan P, le centre Ω restant lui même fixe.

Pour permettre la définition de nouveaux volumes élémentaires correspondant aux déplacements successifs de Ω' , nous donnons à ce déplacement un pas constant de $r\sqrt{2}$, le nombre de pas de déplacements j étant un entier

Dans ces conditions, la cote Z' du point Ω' a comme expression générale :

$$Z' = 2h r \cdot \sqrt{2} - j \cdot r \sqrt{2}$$

La valeur inférieure limite de Z', qui est $R\sqrt{2}$, correspond au cas où les sphères R sont disposées selon un assemblage rhomboédrique. Ceci impose pour j une valeur limite telle que :

$$R\sqrt{2} = r\sqrt{2} \cdot (2h - j)$$

et après simplification

$$j = 2h - t$$

Les conditions de coexistence des sphères r, et R, dans les séries de volumes élémentaires correspondant sont doubles et définies par les relations (d'après la relation 16) :

$$n^2 + p^2 \geq (t + 1)^2 - (q\sqrt{2})^2$$

pour la sphère centrée en Ω , de coordonnées X, Y et Z égales à 0,

et pour la sphère centrée en Ω' , dont les coordonnées X et Y sont égales à R :

$$(n - t)^2 + (p - t)^2 \geq (t + 1)^2 - (q\sqrt{2} - 2h\sqrt{2} + j\sqrt{2})^2$$

8.4.2. Etude d'un cas de mélange.

Le modèle de mélange que nous venons de définir a été mis en oeuvre avec une seule valeur de t. Les résultats sont exprimés sur la figure (22) en termes de porosité et de teneur pondérale en sphère r. Les données concernant les hypothèses de remplissage et de substitution y sont également portées. Sur ce graphique le domaine de transition débute au point de concordance des porosités calculées pour le volume élémentaire du domaine de substitution et son équivalent et s'achève quand le domaine de remplissage est atteint.

Le fait d'utiliser un pas donné pour le déplacement de l'une des sphères R entraîne nécessairement une discontinuité au niveau des résultats. Cette discontinuité est également marquée par des "sauts" de porosité. En effet, lors de ses déplacements, la sphère R passe successivement d'une position de type C à une position proche du type B quand Ω' passe d'un plan q à un plan q - 1. Or nous avons déjà noté dans un paragraphe précédent l'influence de la position d'une grosse particule sur la porosité totale.

8.4.3. Conclusions

En dépit de leur caractère discontinu, ces résultats évoquent bien un amortissement des variations quand la teneur en petites particules décroît. Le calcul de valeurs moyennes, présenté dans le tableau 10 montre même le passage par un minimum pour 11 p.cent de fines et pour des teneurs plus faibles, une remontée des valeurs de porosité.

Ce type de variation se rapproche bien de l'allure générale présentée par les courbes expérimentales. Cependant en définitive, la prépondérance des grosses sphères sur les petites, admise dans ce modèle, conduit, pour le déplacement ultime de la sphère R, à des valeurs de porosité correspondant à celles calculées en hypothèse de remplissage. Nous allons maintenant considérer ce dernier aspect des mélanges.

8.5. Domaine de remplissage.

Dans l'exemple que nous venons de présenter, pour $t = 8$, la phase de remplissage n'est pas atteinte au niveau du minimum prévu par l'hypothèse de remplissage, mais par des teneurs en petites sphères bien plus faibles - voir figure (22).

Ces résultats, bien qu'obtenus avec une hypothèse très optimiste - l'organisation serrée des sphères R est déjà acquise - démontrent que le domaine où l'hypothèse de remplissage peut être vérifiée est restreint.

En outre, il est assez évident que même dans ce domaine, des dispositions telles que l'intercallation de petites sphères entre deux grosses sphères vont nécessairement perturber l'organisation de ces dernières.

Nous avons appliqué le calcul de la porosité, quand j atteint sa valeur limite, à plusieurs valeurs de t . Le tableau (11) montre en effet que pour des valeurs de t inférieures ou voisines de 5 la phase de remplissage sans perturbation des grosses sphères ne peut pas en pratique exister.

De plus, au delà et jusqu'à une valeur de t égale à 15, cette phase de remplissage n'est possible que pour des teneurs pondérales en petites sphères ne dépassant pas 12 p.cent.

8.6. Application à quelques images de massifs de microbilles.

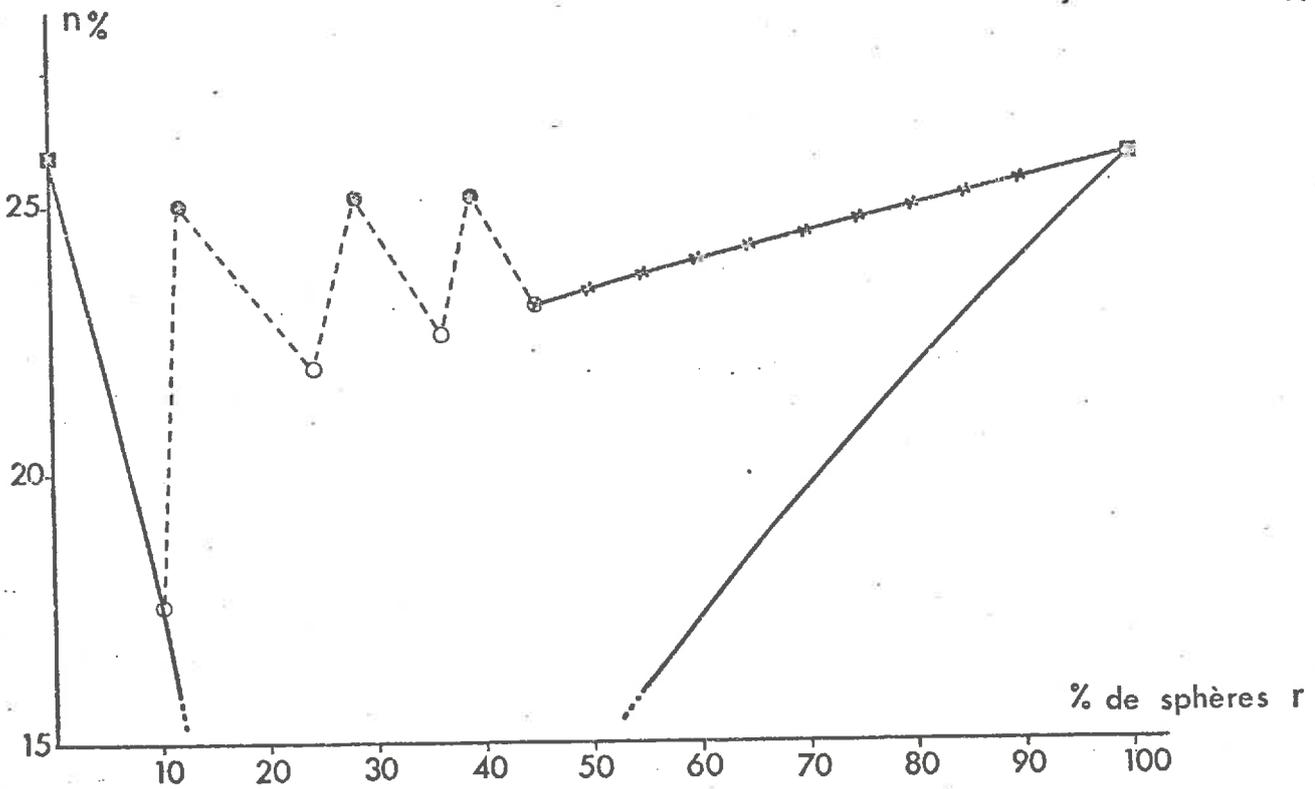
Ce dernier paragraphe concernant l'approche géométrique est destiné à la présentation d'images de microbilles de verre et de leur mélange.

Notre intention n'est pas de procéder à une analyse de ces images, mais de soulever à leur propos les remarques suggérées par l'approche géométrique, qui permettraient d'orienter une véritable analyse d'image.

Les photos présentées concernent d'une part un massif de microbilles calibrées, d'autre part un mélange binaire.

22 EXEMPLE DE VARIATION DE LA POROSITE CALCULEE AVEC UN RAPPORT DE TAILLES 8

- ⊙ domaine de transition
- x domaine de substitution
- ✓ lois de remplissage et de substitution



Pour chacun des cas, les massifs poreux réalisés ont été indurés avec une résine. Après sciage de ces massifs, les surfaces obtenues ont été traitées à l'acide fluorhydrique afin d'accroître le contraste entre le verre et la résine et de définir les microbilles appartenant au plan observé.

- Cas 1 : document (4)

Nous nous situons ici dans un domaine relevant des problèmes de calibrage.

Des mesures, effectuées par ailleurs, de la surface totale observée d'une part, de la surface des sections de microbilles d'autre part, ont permis de calculer une porosité moyenne de 40,01 p.cent, donc du même ordre de grandeur que la valeur obtenue par mesure de la densité apparente (36,97 p.cent).

Par contre, l'observation du détail de cette surface montre qu'il existe une hétérogénéité dans la distribution de cette porosité.

Sur cette photo, il est possible de reconnaître dans le quart supérieur droit une zone d'organisation serrée et assez régulière des particules. On peut constater, cependant, les microbilles n'étant pas isodimensionnelles, qu'un arrangement très serré n'est pas réalisable.

Par ailleurs, dans la partie médiane, des lacunes importantes ayant la dimension d'une ou deux microbilles, évoquent les couches vides plus ou moins comblées par effondrement dont nous avons parlé à propos des valeurs de t tendant vers $1 + \epsilon$.

j	0	1	2	3	4	5	6	6
η	23,22	25,30	22,67	25,27	22,02	25,12	17,56	26,0
g	44,89	38,94	36,16	27,94	24,04	12,10	10,18	0
$\bar{\eta}$		24,26	23,99	23,97	23,73	23,57	21,34	21,78
\bar{g}		41,92	37,55	32,05	25,99	18,07	11,14	5,09

j : nombre de pas effectués par la sphère R.

η : g : respectivement porosité totale et teneur pondérale en fines.

$\bar{\eta}$: \bar{g} : valeurs moyennes intrapolées.

TABLEAU 10 : VARIATION DE LA POROSITE DANS LE DOMAINE DE TRANSITION,
POUR $t = 8$.

- Cas 2.

Les documents (5 et 6) rendent compte de l'aspect général d'un mélange dont t est voisin de 5. La porosité totale est ici de 28,34 p.cent.

Le premier point que nous considérons ici est l'aspect qualitatif du contact grosses-petites particules. Selon l'analyse de l'effet de perturbation que nous avons présenté pour le domaine de substitution, la zone de contact des deux constituants doit présenter une porosité assez élevée.

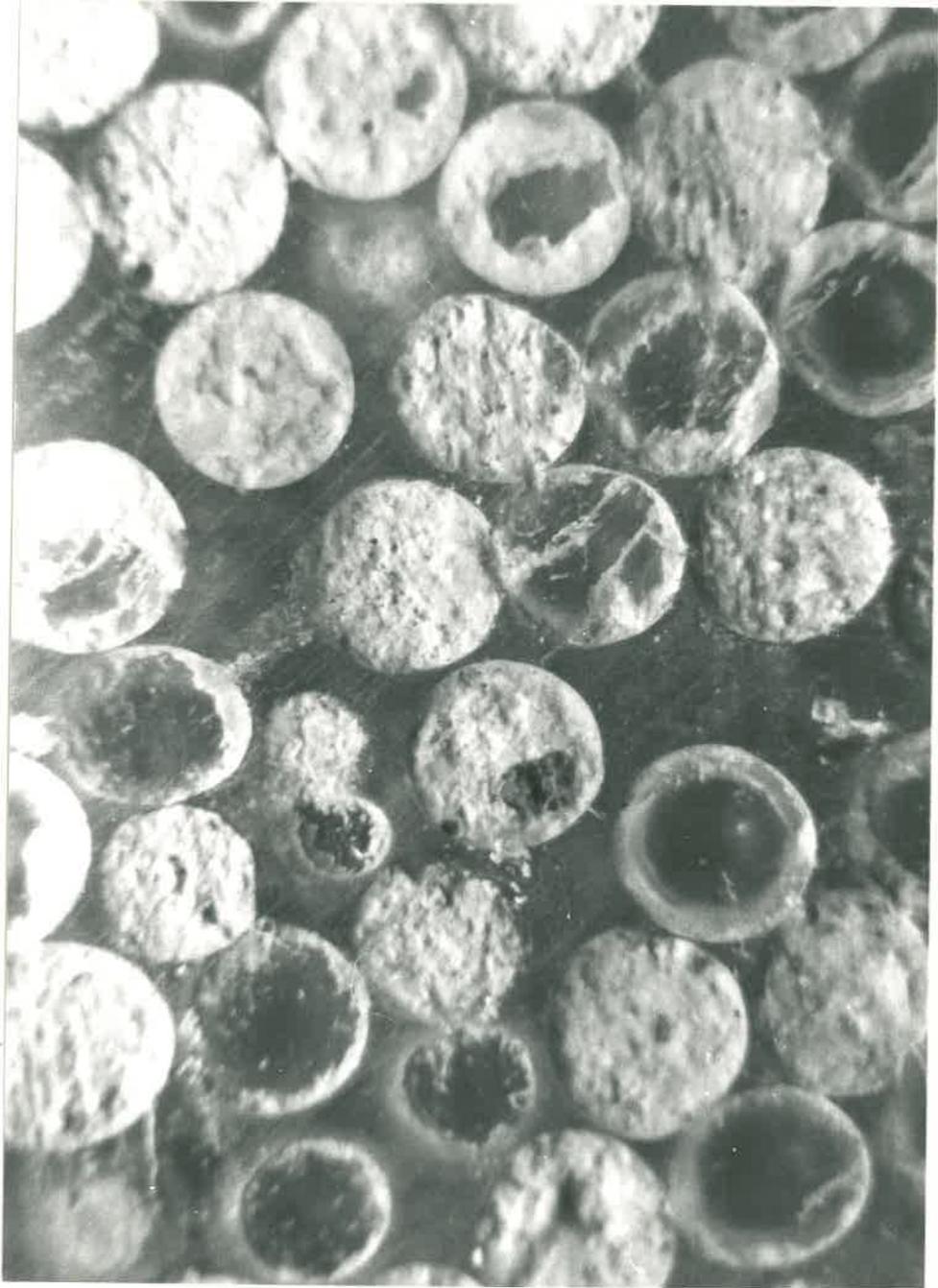
Sur la photo (5) on peut en effet constater parfois l'existence de vides importants, de l'ordre d'une microbille de 400 - 430 μ - dans cette zone de contact. Pour conforter cette interprétation, il faudrait pouvoir faire la part de l'hétérogénéité de la porosité des petites particules elles mêmes. Il est évident que cette possibilité est bien au delà des moyens de l'oeil humain et relève directement de l'analyse d'image.

Le second point que révèle l'observation concerne la distribution des grosses particules. Il existe un certain nombre de cas en (6) - où ces particules sont entrées en contact, constituant des doublets et des triplets. Or en termes d'analyse géométrique, l'existence de ces doublets impose aux petites particules la contrainte de deux conditions d'existence. Un exemple calculé pour $t = 5$ en position B d'une part et en doublet d'autre part, à une teneur en fines voisine de 40 p.cent, montre que le passage au doublet entraîne un accroissement de porosité de l'ordre de 20 p.cent en valeur absolue.

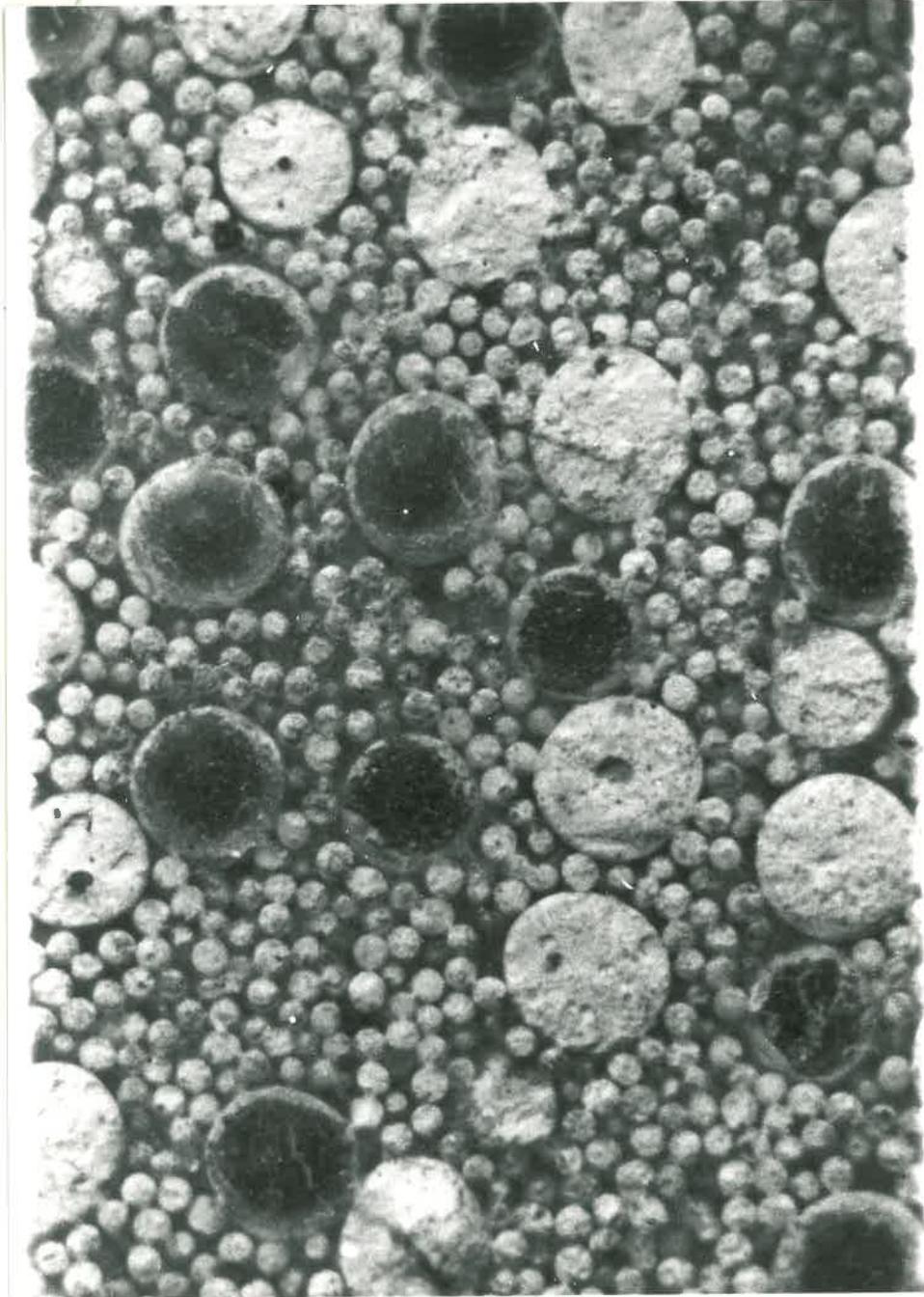
Nous touchons là une des limites du modèle de rapprochement progressif adopté pour le domaine de transition.

Modèle géométrique						Lois de substitution et de remplissage
t	2	5	8	10	15	
Π	25,96	25,36	17,56	18,03	16,03	6,35
g	0	0,79	10,18	9,67	11,81	20,6

TABLEAU 11 : POROSITE MINIMALE EN REMPLISSAGE POUR DIFFERENTES VALEURS DE t ET TENEUR CORRESPONDANTE EN PETITES SPHERES.

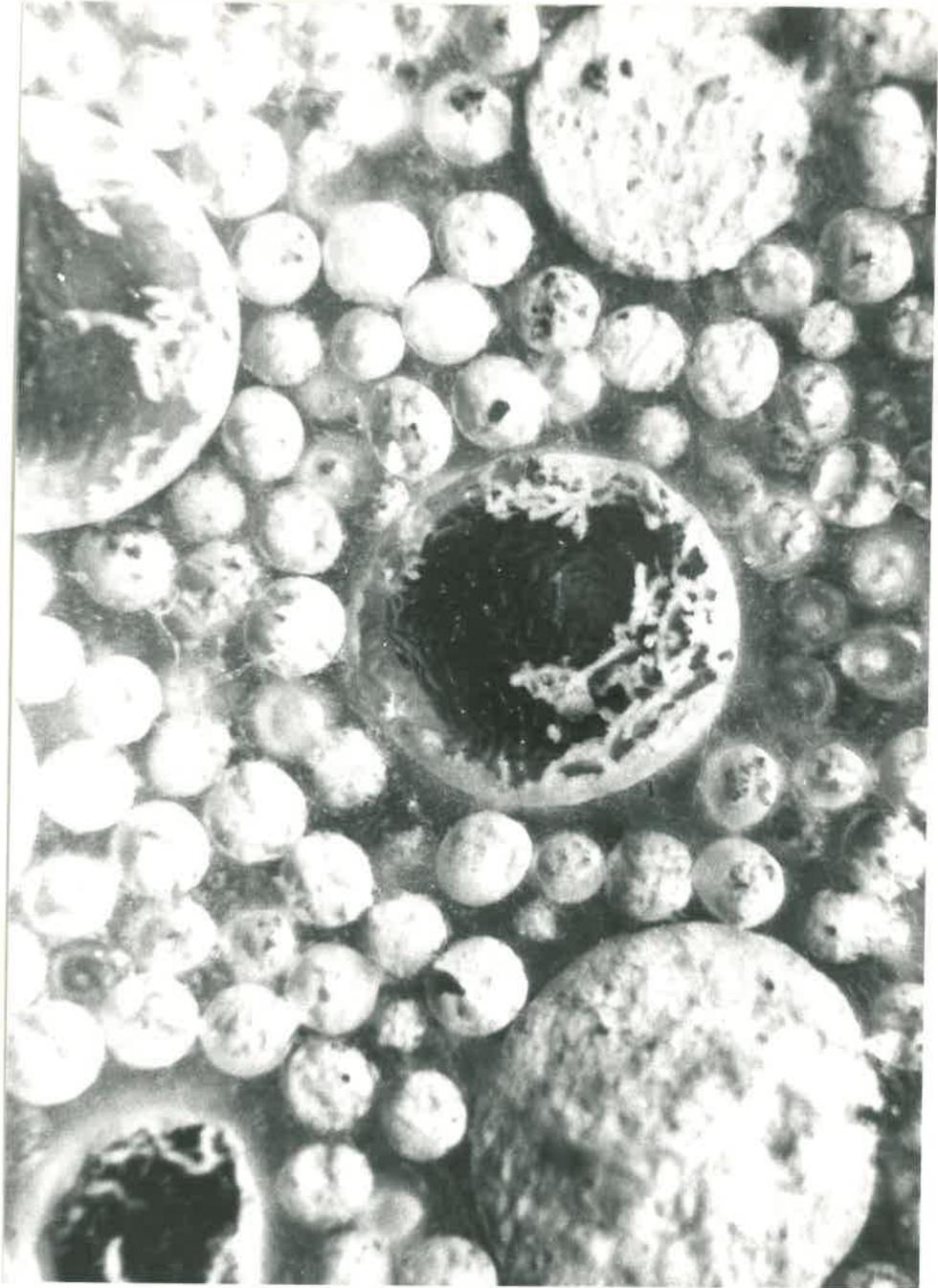


4 : Section polie de microbilles 2000 μ . (x 15)



6 : Section d'un mélange 415μ (40 p.cent) - 2000μ .(x10)

79^{mm}



5 : Section polie d'un mélange 415 μ (40 p.cent) - 2000 μ .(x 30)

Par ailleurs, si nous extrapolons maintenant au domaine des faibles teneurs en fines, la présence de particules intercalaires en (6) peut être un bon exemple d'interaction visant à perturber l'arrangement des grosses particules en accroissant leur porosité d'assemblage.

8.7. Conclusions

Au cours de cette approche nous avons appliqué, à travers certaines hypothèses, une analyse géométrique à l'association de particules de tailles différentes.

La caractéristique de cette approche réside dans le fait que nous n'avons pas éliminé, à priori, les cas de chevauchement d'une classe de particules sur une autre.

Ce faisant, nous nous sommes donc éloigné des démarches où l'on procède par empilement successifs de particules dans les espaces vides d'un premier système poreux sans perturber les arrangements acquis (WHITE et al 1936 - RIVIERE et al 1969). Ces travaux sont limités en général au seul état de porosité minimum. En fait, les calculs conduisant au choix des rapports de tailles pour obtenir un état de porosité donné supposent que telle particule ira effectivement se loger dans le site choisi : or un tel déterminisme est difficile à admettre en l'absence de force de liaison, ce qui est le cas pour les particules envisagées.

En l'absence de vérification in situ, la validité de l'hypothèse de perturbation que nous avons retenue ne peut être testée qu'à travers une comparaison entre les résultats calculés et ceux obtenus expérimentalement.

Qualitativement, les résultats que nous avons obtenus au niveau de la porosité totale, sont en accord avec l'expérience sur les points suivants :

- dans les domaines de substitution et de transition, les courbes de porosité calculées avec des valeurs moyennes de t passent toujours au dessus des courbes théoriques. Ces dernières ne sont atteintes que pour des valeurs de t élevées.
- le classement des courbes en fonction de valeurs croissantes de t s'effectue bien par porosités décroissantes à teneur égale.
- en remplissage, la simple prise en compte d'un effet de la matrice de grosses particules sur les possibilités d'empilement de petites particules montre bien que la réalisation du remplissage strict se limite à un domaine relativement étroit de teneurs en fines.

Cependant, le modèle retenu pour l'organisation initiale des particules est un réseau rhomboédrique. Le choix d'un tel modèle était susceptible d'introduire un biais par rapport au véritable type d'organisation présenté par les particules.

On peut d'abord constater que ce choix permet, dans le cas limite du calibrage, de proposer une hypothèse rendant compte de la porosité de massifs de particules isolées par tamisage.

Par ailleurs, reprenant la comparaison amorcée au tableau (8) - entre le nombre N'' de sphères chassées d'un volume élémentaire et celui, S'' , calculé en substitution stricte - et l'étendant à deux nouveaux modes d'arrangement, pour une même position relative de la sphère R , nous avons obtenu les résultats rassemblés dans le tableau (12).

Nous pouvons constater que par rapport à une référence de stricte substitution, le nombre relatif de sphères déplacées reste pour un t donné, du même ordre de grandeur et cela quel que soit le mode d'arrangement des sphères auxquelles le calcul est appliqué.

Ce résultat suggère qu'il n'y a pas de biais introduit par le choix d'un arrangement compact, autre que celui lié à la valeur de la porosité initiale des systèmes retenus.

Pour tenter la comparaison avec un mélange expérimental, nous avons alors repris l'équation (18) permettant le calcul de la porosité, en introduisant la valeur observée de la porosité de la classe de particules fines utilisées, à la place de celle correspondant à l'assemblage rhomboédrique étudié.

Les valeurs du nombre de particules N dans le volume élémentaire et du nombre N' de particules restant après introduction d'une grosse particule, peuvent être obtenues pour un t donné, en intrapolant entre les valeurs calculées pour des arrangements types. Les valeurs de N et N' sont alors choisies au niveau de la valeur de la porosité correspondant à la porosité observée sur la classe de particules fines considérées.

Pour un mélange expérimental à $t = 7.95$, choisi parce qu'il correspond aux modèles géométriques calculés avec $t = 8$ pour différents modes d'arrangements, on a obtenu ainsi :

g	100	90	80	70	60	50	40
(expérimental)	36,7	35,3	33,5	32	30,	27,7	26,8
(calculé)		35,7	34,6	33,4	32,2	30,9	28,9

Ce type de calcul n'est bien entendu valable que dans le domaine de substitution. Les valeurs calculées présentées dans le tableau ci-dessus, apparaissent ici systématiquement supérieures aux valeurs observées. Cependant elles ne sont pas fondamentalement différentes. Ceci suggère que l'hypothèse retenue, à savoir l'élimination systématique sans réarrangement des petites sphères appartenant à la zone de chevauchement reflète la réalité physique des interactions stériques les plus fréquentes entre particules.

Enfin, cette approche très analytique fait ressortir l'importance de la disposition réciproque des constituants dans un mélange. Une disposition des grosses particules telle qu'elle est apparue sur la photo (6) entraîne certainement des effets perturbateurs plus importants qu'une répartition homogène. Cette approche éclaire également l'importance au niveau de la porosité de la forme propre des particules : plus les particules s'éloignent de la sphère parfaite et plus les conditions d'existence de deux particules voisines apparaîtront contraignantes.

t	2	5	8	10	organisation et porosité initiale p. cent du massif
$100 \frac{N''}{S''}$	168,8	155,6	135,0	128,3	rhomboedrique $\eta = 25,95$
	206,8	153,6	138,3	129,0	orthorhombique $\eta = 39,54$
	190,5	146,7	134,3	128,3	cubique $\eta = 47,64$

TABLEAU 12 : COMPARAISON, POUR TROIS MODES D'ARRANGEMENT, DU NOMBRE DE SPHERES CHASSEES DANS LE MODELE GEOMETRIQUE ET EN SUBSTITUTION STRICTE.

II - ETUDE EXPERIMENTALE DE MELANGES DE PARTICULES CONTENANT UNE PHASE ACTIVE.

Introduction :

Avec cette seconde partie nous abordons la porosité de systèmes contenant une fraction phylliteuse dont les éléments constitutifs sont inférieurs à 2 microns.

On sait qu'à cette fraction argileuse est attaché une grande réactivité vis à vis des conditions hydriques. Notamment, la dessiccation d'une pâte argileuse se traduit par un phénomène de retrait qui se manifeste au niveau macroscopique.

On peut alors se demander comment va se situer, par rapport aux hypothèses que nous avons utilisées dans la première partie de ce travail, la porosité de systèmes secs contenant une phase argileuse, ces systèmes résultant de l'évolution de mélanges préparés à un certain état d'humidité.

Cela suppose que l'on examine si le mélange d'une fraction argileuse, soit à l'état sec, soit à l'état humide et d'une fraction du squelette du sol donne des porosités conformes à celles prévues par les lois d'association de remplissage ou de substitution.

On peut remarquer que le mélange à sec ne correspond pas au problème tel qu'il est posé, la partie d'argile ayant la granulométrie correspondant à des limons et non celle d'une fraction argileuse.

Nous nous limitons donc à l'étude de mélanges où la fraction phylliteuse est introduite sous forme de pâte.

Dans un deuxième temps, il conviendra d'envisager comment évolue ce système, pâte d'argile-squelette, avec la dessiccation. De toute façon nous n'aurons encore là qu'un modèle.

Il implique le type de matériaux mis en présence et les conditions de l'association, c'est-à-dire l'évolution d'une pâte d'argile plus ou moins imprégnée d'éléments grossiers sous l'influence de la dessiccation.

On peut concevoir en pratique d'autres types d'associations, en particulier dans les processus d'illuviation, où la phase argileuse imprègnerait une structure immobile constituée par le squelette du sol. Il conviendra donc par la suite de comparer les propriétés des systèmes expérimentaux et les propriétés des matériaux trouvés in situ pour juger de la représentativité de nos modèles. Les critères de vérification porteront sur la porosité ou la densité des mélanges. Il conviendra d'y ajouter, pour mieux comprendre l'origine des accords ou des désaccords, un examen micromorphologique qui permettra de caractériser au moins qualitativement les particularités des mélanges réalisés.

Ces différentes considérations nous ont amené à choisir une série de squelettes caractérisés par leur homogénéité. Nous n'avons utilisé qu'une seule fraction argileuse, correspondant à un matériau déjà bien connu.

Désignation	constitution minéralogique*	Cation	Densité de solide	Capacité d'é- change pour 100 g d'argile séchée 105°C m.eq.
HB	minéraux gonflants (smectite, vermiculite) 40% Illite 25 % Kaolinite 25 % Oxydes, hydroxydes de fer 10 % Quartz : traces	Ca ⁺⁺	2.809	52,5

* TESSIER 1975

TABLEAU 14 : CARACTERISTIQUES DE L'ARGILE UTILISEE.

1. MATERIEL EXPERIMENTAL

1.1. Les squelettes.

Différents types de squelettes ont été choisis.

Tout d'abord, afin de permettre des comparaisons directes avec les résultats du chapitre précédent, nous avons utilisé aussi bien des microbilles calibrées, qu'un mélange correspondant à un état de compacité assez élevé, proche du maximum théorique (t voisin de 70).

D'autre part, pour nous rapprocher des constitutions propres aux matériaux naturels, nous avons utilisés des squelettes allant des limons fins aux sables grossiers.

Les matériaux de taille inférieure ou égale à 20 ont été séparés et extraits par siphonnages successifs d'une suspension d'un matériau limono-argileux (horizon d'accumulation d'un sol de Versailles.)

Les limons grossiers et les sables ont été obtenus par tamisage.

Le tableau (13) rassemble les données obtenues sur ces matériaux. Pour les particules d'origine naturelle et de taille inférieure à 200 μ les diamètres équivalents sont calculés sur la base des mesures de surfaces spécifiques par perméabilité à l'eau ou à l'air (FIES 1970). La porosité de ces mêmes matériaux a été mesurée sur les colonnes ayant servi aux mesures de perméabilité.

Classe granulométrique -microns-	Porosité %	Densité de Solide	Surface cm ² g ⁻¹	Diamètre équivalent -microns-	Constitution minéralogique	Nature
2- 10	44,58	2,694	5.850	3,7	Quartz, traces de feldspaths et de muscovite	Horizon d'accumulation d'un sol de limon de Versailles
2- 20	46,50	2,700	3.700	6,0		
10- 20	48,50	2,662	1.755	12,6		
2- 50	43,01	2,674	1.743	12,8		
20- 50	49,01	2,667	1.090	20,4	Quartz essentiellement	Sable de Fontainebleau
100-200	42,00	2,655	225	100,0		
200-500	36,30	2,670	68,5	327,5		
400-430	35,54	2,648	54,6	415,0		
50- 80	37,70	2,370	396,5	63,8	microbilles	
160-200	37,20	2,662	125,7	179,3		
400-430	36,35	2,659	54,4	415,0		
200-500 + 2-10 (20%)	30,65	2,675	-	-	Quartz	Mélange sable - Limon

TABLEAU 13. CARACTERISTIQUES DES DIFFERENTS SQUELETES.

En ce qui concerne les autres matériaux, le diamètre équivalent a été calculé selon la relation déjà présentée au chapitre 1. Les porosités sont obtenues après remplissage standard d'un volume donné suffisant. Enfin, la densité de solide a pour l'ensemble des constituants, été mesurée au pycnomètre à air.

1.2. La fraction argileuse

La fraction argileuse utilisée, HB, a été extraite de l'horizon d'accumulation d'un sol de Versailles. Elle correspond aux particules inférieures à 2μ recueillies par décantations successives après mise en suspension du sol, floculées par du chlorure de calcium, puis lavées et centrifugées. L'analyse des cations échangeables a révélé que cette fraction argileuse a bien été rendue monoionique Ca^{++} . L'ensemble des caractéristiques sont présentées au tableau (14).

2. METHODE D'ETUDE

2.1. Protocole de préparation des mélanges.

Nous avons retenu un standard de préparation, dérivé du protocole mis au point par MONNIER et KHEYRABI (1968), faisant intervenir la phase argileuse à l'état humide et soumettant le mélange à une dessiccation. Nous autorisons ainsi la manifestation d'interactions phase argileuse - squelette dans un cadre défini par des conditions hydriques imposées.

La mesure de la densité effectuée à l'état sec, nous permettra alors d'apprécier les conséquences globales du retrait de la phase argileuse associée à différentes classes de particules de squelette.

A partir des différents constituants que nous avons énumérés nous avons réalisé des séries de mélanges binaires, chacune étant constituée par l'association d'une phase argileuse à un squelette donné.

Au sein de chaque série, la teneur pondérale en argile varie de 10 à 100 p.cent, de 5 en 5 p.cent jusqu'à 30 p.cent puis de 10 en 10 p.cent.

Les différents squelettes sont associés à la pâte argileuse par malaxage manuel, la quantité de produit sec étant voisine de 100 g.

Une teneur en eau de 230 p.cent a été choisie pour la pâte d'argile HB. Cependant, dans le cas des mélanges à 10 et 15 p.cent d'argile, la teneur en eau de la pâte argileuse a été augmentée afin de permettre le mélange.

Nous avons observé dans ces conditions que pour l'ensemble des échantillons le malaxage permettait alors d'obtenir au bout d'une dizaine de minutes une pâte d'aspect bien homogène.

Cette pâte est introduite dans un buchner au fond duquel on a préalablement placé un disque de papier filtre. Les buchner utilisés ont un diamètre de 6 cm et une profondeur de 3 cm.

Une dépression équivalente à 60 cm de mercure est appliquée à la base du buchner pendant 5 heures.

L'éprouvette obtenue est alors extraite du buchner et laissée 48 heures à l'atmosphère du laboratoire avant d'être séchée à 105° C en étuve. C'est sur des matériaux secs que va porter la mesure de la densité $\bar{\gamma}_d$

2.2. Critères d'homogénéité.

Mais les valeurs de densité obtenues n'ont de signification vis à vis de l'organisation des constituants que dans la mesure où les échantillons étudiés sont homogènes. C'est à dire que l'échantillon ne présente pas d'une part de variation systématique de la distribution spatiale de ses constituants dans une direction privilégiée, d'autre part des fissures majeures séparant des ensembles pouvant présenter eux-mêmes une structure continue.

Comme nous le verrons plus loin, l'observation de lames minces d'échantillons, ne montre pas de différence, appréciable à l'oeil, dans la distribution des constituants. En particulier, il n'a jamais été noté de phénomènes d'entraînement ou d'accumulation de phase argileuse entre la surface et la base du gâteau.

Par ailleurs la phase de dessiccation à l'air, a permis de supprimer le développement de fissures importantes dans les échantillons, aux fortes teneurs en argile.

En fait, la continuité de la structure qui constitue un critère essentiel de l'origine texturale de la valeur de la densité n'a pu être établie qu'à la suite de la mise au point d'une technique de mesure du poids volumique sur des volumes variés d'un même échantillon.

Après un rappel de la technique de mesure utilisée, nous considérerons son application à la vérification du critère de structure continue qui permettra de qualifier les mesures de $\bar{\gamma}_d$ de densités texturales.

2.3. Mesure de la densité texturale des échantillons.

2.3.1. Mesure de volume.-

On sait que la densité est établie à partir du rapport du poids de l'échantillon sec au volume qu'il encombre. Dans le cas de matériaux cohérents, ce volume n'est jamais spontanément un volume géométrique simple et l'on a alors recours pour sa mesure, à la pesée hydrostatique. Ainsi, nous avons montré que pour des échantillons de sol, il était possible de mesurer le volume encombré en effectuant la pesée dans le pétrole du commerce, après avoir imprégné préalablement les échantillons par le même liquide.

(MONNIER, STENGEL, FIES 1973).

De plus, contrairement à des techniques faisant appel à une imperméabilisation préalable de l'échantillon (FIES 1971) on peut alors déterminer la valeur de la densité d'un même matériau sur des échantillons dont la taille varie de la dizaine de centimètres au millimètre.

A titre d'exemple, le tableau (15) rassemble les moyennes et les écarts types obtenus sur les mesures de densité effectuées sur des prises de 2 g d'agglomérats de 2 à 3mm appartenant à des matériaux de texture différente.

On peut constater que la reproductibilité est excellente, la valeur de la densité pouvant être estimée à 1 p.cent près pour le matériau le plus pauvre en argile (limon blanc) et à moins de 0,5 p.cent pour les trois autres sols.

2.3.2. Estimation de la réalisation d'une structure continue

Des valeurs de $\bar{\gamma}_d$ mesurées sur des échantillons de volumes variés extraits d'éprouvettes réalisées selon le protocole indiqué, sont présentées sur la figure (23) (N. SOUTY 1978). Les valeurs portées en abscisse représentent l'inverse du rayon de la sphère de volume équivalent à celui de l'échantillon mesuré. La constance de la densité démontre que le type de fabrication choisi a conféré aux échantillons une structure continue, au moins dans le domaine des volumes soumis à la méthode de mesure.

L'influence d'un séchage préalable à l'air, par rapport à un passage direct à l'étuve peut être apprécié de la même façon. Ainsi, pour un gâteau d'argile HB, les valeurs de la densité appréciées, dans les deux traitements, respectivement sur un quart d'éprouvette et sur une prise d'agglomérats 2-3 mm ont montré les variations indiquées sur la figure (23). Dans le seul cas de l'échantillon séché à l'air une structure continue est réalisée. Pour l'échantillon séché directement en étuve, on peut noter que la valeur de la densité croît quand on passe de l'éprouvette à une prise d'agglomérats, un certain nombre de fissures participant au volume d'encombrement de l'éprouvette étant supprimées par le fractionnement d'échantillon. De plus, la valeur mesurée sur agglomérats se rapproche de celle obtenue sur le matériau à structure continue.

2.3.3. Limites propres à la technique de mesure.

La détermination de la densité d'agglomérats terreux comprend une phase de ressuyage après impregnation par le pétrole. Ce ressuyage doit éliminer l'excès de pétrole présent à l'état de film autour des agglomérats sans toutefois vider les pores.

Pour les matériaux limoneux à argileux, le papier filtre ou le verre fritté (billes de 50μ) se sont révélés tout à fait adaptés. Dans ces conditions l'expérience a en effet montré qu'une erreur systématique due à la présence de ménisques au niveau des pores (CURRIE 1966) était généralement faible. Cependant, dans le cas de matériaux à constituants plus grossiers, la vidange d'une partie de la porosité peut entraîner une sous évaluation du volume encombré du matériau, comme l'illustre la figure (24).

Pour tester cette éventualité, nous avons réalisé des échantillons constitués de limons et de billes de verre, tamisés dans un intervalle aussi étroit que possible. Le diamètre équivalent des populations obtenues couvre l'intervalle $3\mu - 800 \mu$. Chaque classe de particules a été malaxée en présence d'eau et ressuyée sur buchner. L'éprouvette obtenue est séchée à 105°C . En absence d'argile, la cohésion est assurée par l'introduction de gomme arabique lors du malaxage. La teneur pondérale en gomme est égale ou inférieure à 2 p.cent dans les échantillons secs.

Nous avons comparé les valeurs de la densité obtenues sur éprouvettes à celles mesurées sur agglomérats de 2-3 mm. Dans l'hypothèse d'une vidange des pores lors du ressuyage, on peut s'attendre à ce que les mesures sur éprouvettes, où la surface

(10 mesures)	Limon blanc 1,630	Limon rouge 1,771	Limon argileux 1,791	Terre argileuse 1,913
écart type	0,021	0,008	0,006	0,005

TABLEAU 15 : DENSITE TEXTURALE RESULTANT DE L'ASSEMBLAGE DES
 CONSTITUANTS. LA MESURE EST EFFECTUEE SUR DES
 AGGLOMERATS DE 2 à 3 MM DE DIAMETRE ISSUS
 D'EPROUVETTES, AFIN D'EVITER DE PRENDRE EN COMPTE
 UNE POROSITE D'ORIGINE FISSURALE.

de contact avec le papier filtre est relativement faible, soient beaucoup moins perturbées par la vidange, qui risque au contraire de se manifester nettement pour les agglomérats qui ont une grande surface volumique.

Pour un même échantillon, les deux valeurs de densité sont confrontées dans l'indice suivant :

$$i_n = \frac{\bar{\gamma}_d \text{ agglomérat} - \bar{\gamma}_d \text{ éprouvette}}{\bar{\gamma}_d \text{ agglomérat}} \cdot 100$$

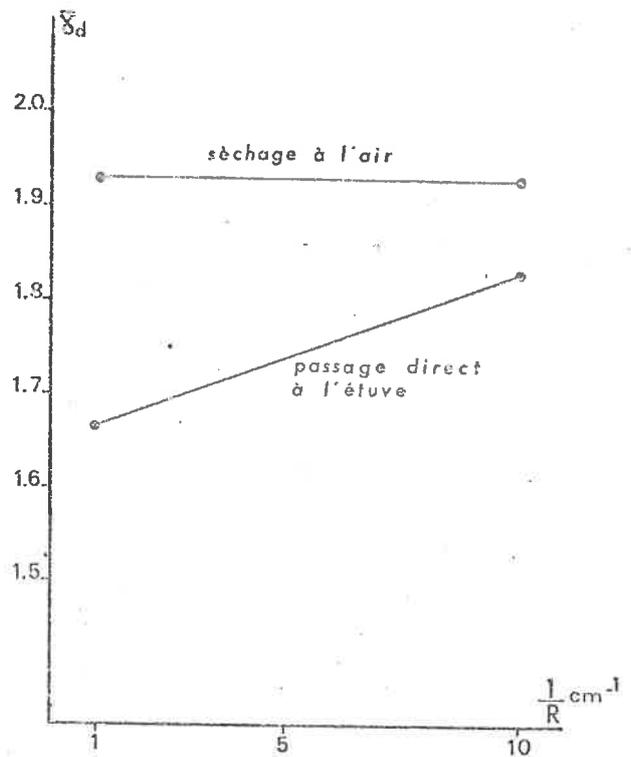
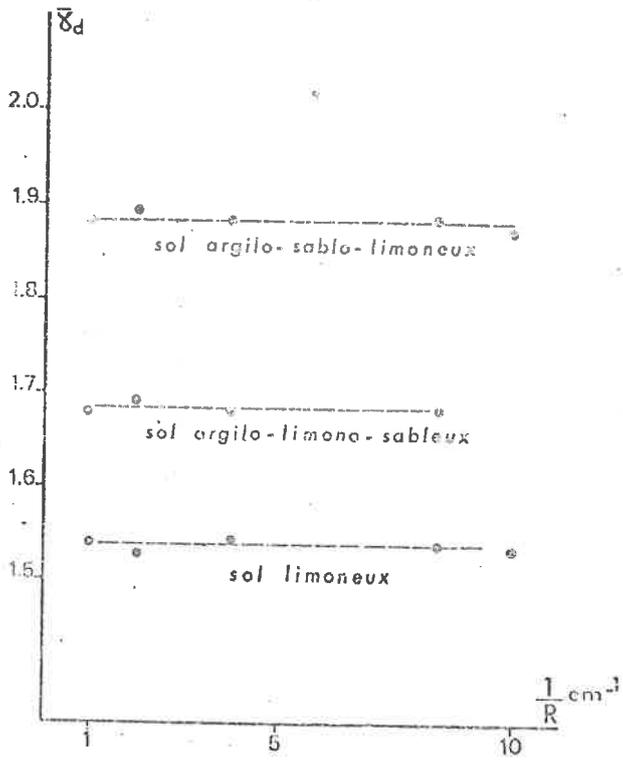
Cet indice représente ici, s'il est positif, la porosité réoccupée par le pétrole lors de la mesure de volume. Nous avons porté sur la figure (25) les valeurs de cet indice en fonction du diamètre équivalent des particules.

Les résultats montrent que le risque de vidange est loin d'être négligeable. Dans le cas extrême constitué par des micro-billes de diamètre compris entre 710 et 800 μ dont la porosité totale est voisine de 39 p.cent, c'est au moins 85 p.cent de la porosité totale qui a subi une vidange puis un remplissage lors de la mesure du volume d'encombrement. Par ailleurs compte-tenu des erreurs de mesures enregistrées pour ces matériaux dépourvus de phase argileuse, on peut affirmer que des variations de l'indice de $\pm 1,5$ p.cent ne sont pas significatives. Dans ces conditions, c'est pour des massifs constitués de particules comprises entre 50 μ et 100 μ qu'une erreur, liée à une vidange partielle des pores au ressuyage, entâche systématiquement la valeur de la densité des agglomérats.

Cette conclusion est bien sûr remise en cause quand on s'adresse à des matériaux contenant une phase argileuse comme le montre les valeurs de i_n du tableau (16).

MISE en EVIDENCE de la STRUCTURE CONTINUE des EPROUVETTES REALISEES en LABORATOIRE (d'apres Nicole SOUTY)

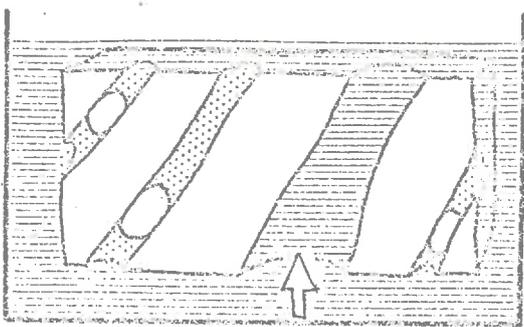
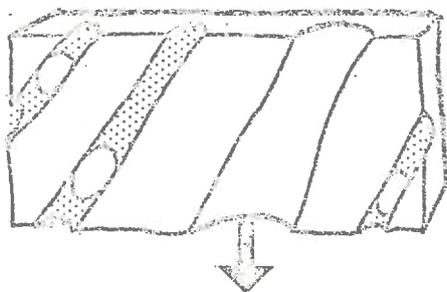
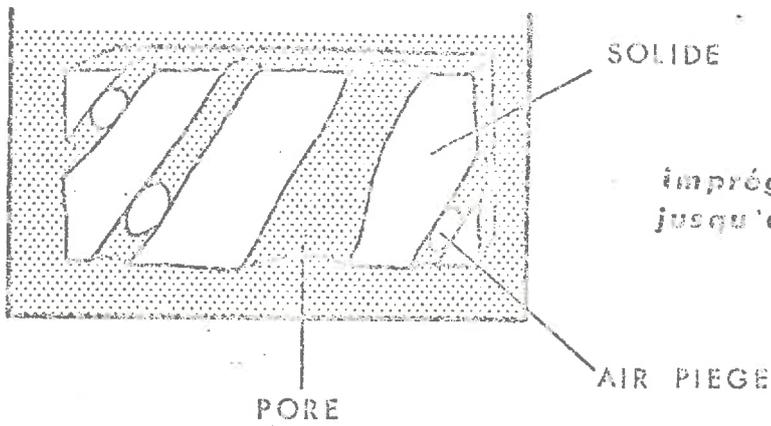
INFLUENCE du MODE de DESSICATION sur l'APPARITION de FISSURES dans une EPROUVETTE D'ARGILE (H.B.)



Diamètre équivalent en μ .	A %			
		20	60	
3,7	0,56		- 0,10	La mesure de $\bar{\gamma}_d$ texturale peut être effectuée sur des agglomérats de 2-3 mm.
12,6	0,37		- 0,93	
63,8	2,69		- 0,55	
100,0	5,70		0,93	La mesure de $\bar{\gamma}_d$ texturale doit être effectuée sur des volumes supérieurs à ceux des agglomérats.
179,3	3,11		0,05	
415,0	9,14		6,48	

TABLEAU 16 : VALEURS DE L'INDICE i_n POUR DEUX NIVEAUX DE TENEUR EN ARGILE DANS DIFFERENTS MELANGES BINAIRES.

QUELQUES ASPECTS de la MESURE du PETROLE du VOLUME
d'ECHANTILLONS POREUX



imprégnation de pétrole
jusqu'à taux constant

ressuyage du pétrole en
excès : risque de vidange
des pores grossiers

mesure du volume encombré
par l'échantillon : exemple
de sous-évaluation par
remplissage d'un pore

Aussi n'avons nous pas cherché à préciser davantage la valeur de diamètre autorisant l'emploi de la technique de mesure au pétrole. Nous avons plutôt cherché à connaître pour un cas situé à l'extrême des matériaux utilisés dans nos mélanges avec une phase argileuse, jusqu'à quelle dimension de l'échantillon il était possible d'appliquer la technique utilisée ici.

Pour cela nous avons retenu un échantillon de sable siliceux contenant essentiellement des particules comprises entre 200 μ et 500 μ .

Le matériau a été malaxé comme précédemment avec de la gomme arabique puis introduit dans un récipient d'un volume voisin du litre. Après séchage et pesée une première estimation de $\bar{\gamma}_d$ a été calculée. Selon les critères discutés dans la première partie, nous nous sommes ainsi placé dans des conditions de mesure de la porosité à ± 1 p.cent.

L'échantillon initial a été divisé une première fois, les morceaux obtenus étant alors soumis à la mesure dans le pétrole et récupérés après séchage.

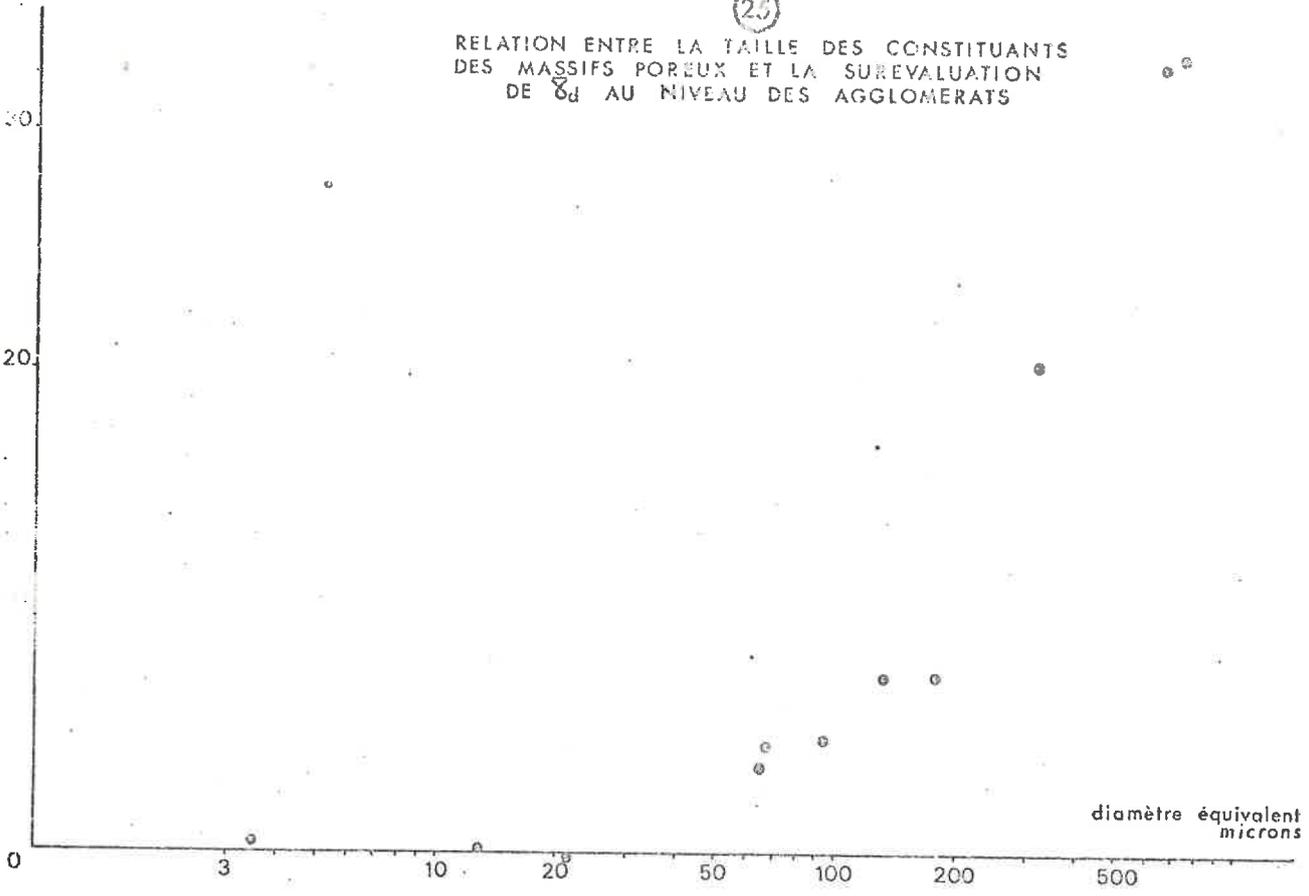
Les mesures portant sur cinq séquences de divisions successives ont permis d'établir la figure (26) où la densité est exprimée en fonction du poids sec de l'échantillon mesuré.

On peut constater que les valeurs de densité sur agglomérats sont très supérieures aux valeurs mesurées à d'autres niveaux, l'écart moyen correspondant ici à une valeur de l'indice i_n de 24 p.cent.

$$i_n = \frac{(\bar{\delta}_d \text{ agglomérats} - \bar{\delta}_d \text{ éprouvette}) \cdot 100}{\bar{\delta}_d \text{ agglomérats}}$$

(25)

RELATION ENTRE LA TAILLE DES CONSTITUANTS
DES MASSIFS POREUX ET LA SUREVALUATION
DE $\bar{\delta}_d$ AU NIVEAU DES AGGLOMERATS



diamètre équivalent
microns

Un palier très marqué correspond aux mesures sur échantillons compris entre 150 g et 20 g. Ce palier correspond à la meilleure évaluation de $\bar{\gamma}_d$ puisqu'elle apparaît indépendante, de la taille de l'échantillon et qu'elle se situe au même niveau que la valeur de densité obtenue par remplissage d'un volume connu. En dessous de 20 g, le phénomène de vidange se manifeste déjà de façon sensible, entraînant une surestimation de $\bar{\gamma}_d$.

Par contre, il ne semble pas que l'estimation de $\bar{\gamma}_d$ sur un échantillon trop important soit satisfaisante. Compte tenu de la précision de la mesure, la valeur obtenue sur échantillon de 500 g traduit elle aussi une sous évaluation de volume encombré. Il ne s'agit plus ici d'un ressuyage provoqué des pores qui devrait alors se manifester aussi sur les échantillons plus petits, mais de leur vidange sous l'effet de la gravité quand l'échantillon est retiré du pétrole après la phase d'humectation. Nous retrouvons là un effet comparable à celui mis en évidence par GRAS (1972). Sur des massifs de billes de verre plongés puis retirés de l'eau, cet auteur a constaté le phénomène et a montré qu'il existait une liaison négative significative entre le degré de remplissage (volume d'eau retenu exprimé en pour cent du volume des pores ouverts) et le rayon moyen des billes.

La détermination de la densité par remplissage d'un volume connu donne par ailleurs la valeur comparativement la plus faible de $\bar{\gamma}_d$. S'il s'agit bien là d'une mesure de référence sur l'organisation au moment de sa mise en place, nous avons constaté après séchage un léger retrait périphérique du matériau. Ceci peut rendre compte du sens de l'écart avec la valeur de $\bar{\gamma}_d$ au palier. Cependant cette mesure n'en situe pas moins le niveau de la valeur la plus probable de la densité texturale pour le matériau considéré et donne sa pleine signification au palier que nous avons observé.

TENEUR EN ARGILLE %	SQUELETTES											
	1	1	1	1	1	b	s	b	b	s	s	
μ	2-10	2-20	10-20	2-50	20-50	50-80	100-200	160-200	400-430	400-430	200-500 + 2-10 (20%)	
0	1,493	1,445	1,371	1,524	1,360	1,477	1,534	1,672	1,692	1,707	1,855	
10	1,530	1,600	1,473	1,715	1,538	1,542	1,620	1,732	1,779	1,754	1,864	
15	1,572	1,603	1,578	1,712	1,588	1,532	1,587	1,732	1,742	1,731	1,838	
20	1,610	1,606	1,597	1,729	1,594	1,553	1,572	1,716	1,699	1,681	1,830	
25	1,673	1,672	1,622	1,768	1,626	1,591	1,591	1,735	1,697	1,674	1,825	
30	1,743	1,754	1,669	1,847	1,685	1,626	1,614	1,756	1,739	1,706	1,836	
40	1,865	1,881	1,827	1,888	1,804	1,750	1,706	1,829	1,786	1,739	1,862	
50	1,922	1,961	1,913	1,936	1,878	1,796	1,761	1,852	1,799	1,802	1,853	
60	1,970	1,988	1,962	1,980	1,923	1,835	1,817	1,880	1,828	1,803	1,859	
70	1,993	2,012	1,968	1,971	1,949	1,861	1,852	1,888	1,848	1,848	1,872	
80	1,986	2,002	1,971	1,990	1,943	1,887	1,876	1,889	1,866	1,864	1,877	
90	1,962	1,943	1,941	1,976	1,930	1,909	1,903	1,906	1,876	1,859	1,905	
100	1,929											

1 = limon - b = billes - s = sable

TABLEAU 17. DENSITE TEXTURALE SECHE DES ECHANTILLONS REALISES EN LABORATOIRE.

2.4. Conclusions

En définitive, la démarche suivie a débouché sur la mise au point d'un protocole de préparation conférant au matériau une structure continue à l'état sec, cette dernière étant contrôlée par des mesures de poids volumique sur des volumes variés.

Nous en concluons que les valeurs mesurées correspondent à la densité texturale du matériau.

Nous avons montré qu'avec la méthode de mesure utilisée le domaine de contrôle tendait à se restreindre quand la taille des constituants du matériau et donc la taille des pores, devenait trop importante, notamment dans le cas des matériaux sableux.

Il ressort que la densité texturale des échantillons préparés en laboratoire peut dans la majorité des cas être mesurée avec une grande sécurité sur des volumes de l'ordre de 10 à 15 cm³.

3. Présentation des résultats.

3.1. Les porosités texturales

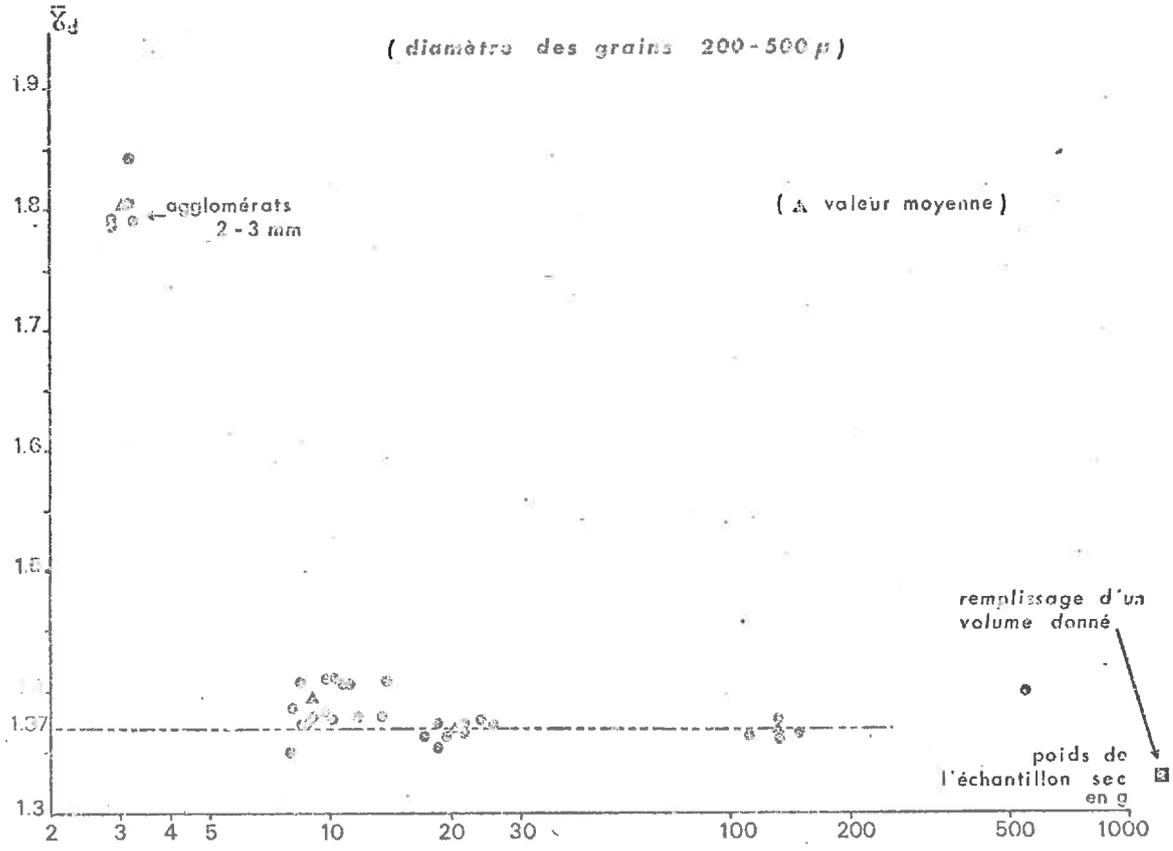
Les valeurs de $\bar{\gamma}_d$ des échantillons secs sont groupées sur le tableau (17). Compte tenu de la variété des densités de solide des constituants nous avons préféré présenter ces résultats sous forme de courbes de variation de la porosité texturale des échantillons en fonction de la teneur pondérale en argile de chacun d'eux. Ces courbes correspondent à la figure (27).

Ces courbes présentent une bien plus grande variété de formes que celles, très régulières, obtenues pour les mélanges de squelette. Elles couvrent un domaine de porosité s'étendant entre les valeurs de 49 à 27 p.cent.

26

DETERMINATION DU DOMAINE D'APPLICATION DE LA TECHNIQUE DE MESURE AU PETROLE DE LA DENSITE TEXTURALE D'UN MATERIAU SABLEUX

(diamètre des grains 200-500 μ)



En tenant compte de la présence d'un minimum et d'un maximum de porosité deux familles de courbes peuvent être dégagées.

- La première est caractérisée par une décroissance de la porosité quand croît la teneur en argile jusqu'à un minimum correspondant à 70 p.cent d'argile environ. La porosité croît ensuite faiblement pour atteindre la valeur de la porosité texturale de la phase argileuse pure.

A ce type de courbe se rattachent les mélanges à squelette limoneux : 2 - 10 μ : 2 - 20 μ : 10 - 20 μ , les deux derniers présentant un palier marqué entre 10 et 20 p.cent d'argile. La courbe correspondant au mélange à squelette 2 - 50 μ quoique décalée à l'origine du fait de la valeur plus faible de la porosité propre au squelette seul, se rattache par son allure générale, très nettement à cette première famille.

- Le second type de courbe se caractérise par la présence d'un maximum de porosité pour une teneur en argile voisine de 25 p.cent. C'est le cas notamment des mélanges à squelette grossier, sables et billes de 400 - 430 μ dont les courbes sont parfois confondues et toujours très proches l'une de l'autre et du sable 100 - 200 μ . Pour ce dernier mélange la courbe est nettement décalée vers les porosités plus élevées par rapport aux deux courbes précédentes, en accord avec la porosité plus forte présentée par cette fraction sableuse.

Des variantes à cette seconde famille de courbe sont présentées d'une part avec les mélanges contenant des microbilles 100 - 200 μ ou 50 - 80 μ , où le maximum de porosité est beaucoup moins marqué, d'autre part avec le mélange à squelette complexe sablo-limoneux, où la porosité varie très peu en fonction de la teneur en argile. Par ailleurs, par rapport aux teneurs en argile, trois domaines peuvent être définis.

- Pour les teneurs supérieures à 40 p.cent les courbes de porosité apparaissent se classer indépendamment de la porosité initiale du squelette. Les matériaux à squelette grossier présentent les plus fortes porosités texturales, les matériaux limoneux les plus faibles.
- Pour une teneur de 10 p.cent la porosité propre au squelette joue encore un rôle prépondérant.
- Enfin, pour les teneurs comprises entre 10 et 40 p.cent il apparaît que tout un ensemble de mélanges peut présenter à teneur égale en argile, des valeurs très voisines de porosité texturale.

C'est le cas par exemple des mélanges où interviennent respectivement les squelettes 10-20 μ et 100 - 200 μ , les squelettes 20 - 50 μ et 400 - 430 μ , aux teneurs en argiles comprises entre 15 et 20 p.cent.

Il ressort de l'ensemble de ces résultats que l'influence du squelette retentit sur la porosité du mélange squelette argile tout au long de la gamme de teneur en argile. La porosité propre au squelette intervient pour les teneurs inférieures à 40 p.cent d'argile, au delà de cette teneur c'est la taille des particules du squelette qui semble intervenir. Le mélange sablo-limoneux à faible porosité initiale représente ici un cas extrême de l'influence du squelette, la porosité des mélanges de ce squelette composé et de la phase argileuse étant modifiée de moins de 2 p.cent en valeur absolue par l'apport de la phase argileuse.

Pour juger maintenant de l'influence propre à la phase argileuse qui est commune à tous les mélanges, nous allons comparer les diverses courbes de porosité sur les bases communes fournies

par les indices i_{ad} et i_{rs} . Ces indices permettent de comparer des différences relatives de porosité entre les valeurs observées et les valeurs calculées sur la base de la loi d'additivité d'une part, des lois complémentaires de remplissage et de substitution d'autre part.

3.2. COMPARAISON DES COURBES DE POROSITE.

3.2.1. Valeurs comparées des différences relatives de porosité entre les valeurs observées et les valeurs calculées sur la base de la loi d'additivité.

L'indice qui permet cette comparaison a pour expression rappelons le :

$$i_{ad} = \frac{n_{ad} - n}{n_{ad}} \cdot 100$$

Le point marquant qui ressort de l'examen de la figure (28) où sont représentées les valeurs de i_{ad} pour les différents teneurs en argile des mélanges, est que tous les mélanges squelette-argile ne conduisent pas tous à une diminution de porosité par rapport à l'additivité. Les mélanges à squelettes sableux présentent même une porosité supérieure parfois à celle prévue avec la loi d'additivité.

Par ailleurs, on peut constater un certain classement des courbes en fonction de la taille des particules du squelette.

Pour les teneurs en argile supérieures à 20 p.cent, la différence relative de porosité est la plus élevée dans les mélanges dont le squelette se situe entre 2 μ et 50 μ . Elle est maximum au voisinage d'une teneur en argile de 50 p.cent.

A l'intérieur de ce groupe de mélanges il n'apparaît pas de classement en fonction du diamètre équivalent de chaque squelette.

Les systèmes à squelette dont la taille est voisine de 400 μ , squelette complexe inclus, présentent tous au contraire des valeurs de i_{ad} négatives avec un minimum marqué au voisinage de 25 p.cent d'argile.

Les positions intermédiaires entre ces deux extrêmes sont occupées par les mélanges à squelette variant de 50 à 200 μ , l'ordre de classement des courbes suivant celui des diamètres équivalent des squelettes.

3.2.2. Valeurs comparées des différences relatives de porosité entre les valeurs observées et les valeurs calculées sur la base des lois complémentaires de remplissage et de substitution

L'indice utilisé ici à comme définition :

$$i_{rs} = \frac{n_{rs} - n}{n_{rs}} \cdot 100$$

Les résultats sont regroupés sur la figure (29).

Il apparaît que dans le domaine des teneurs en argile comprises entre 20 et 90 p.cent, aucun mélange ne vérifie les hypothèses de remplissage ou de substitution.

Enfin, comme précédemment, on retrouve un classement des valeurs de i_{rs} en fonction du diamètre des particules du squelette. Les valeurs les plus fortes, en valeur absolue, apparaissent dans les mélanges à squelette grossier.

3.2.3. Discussion

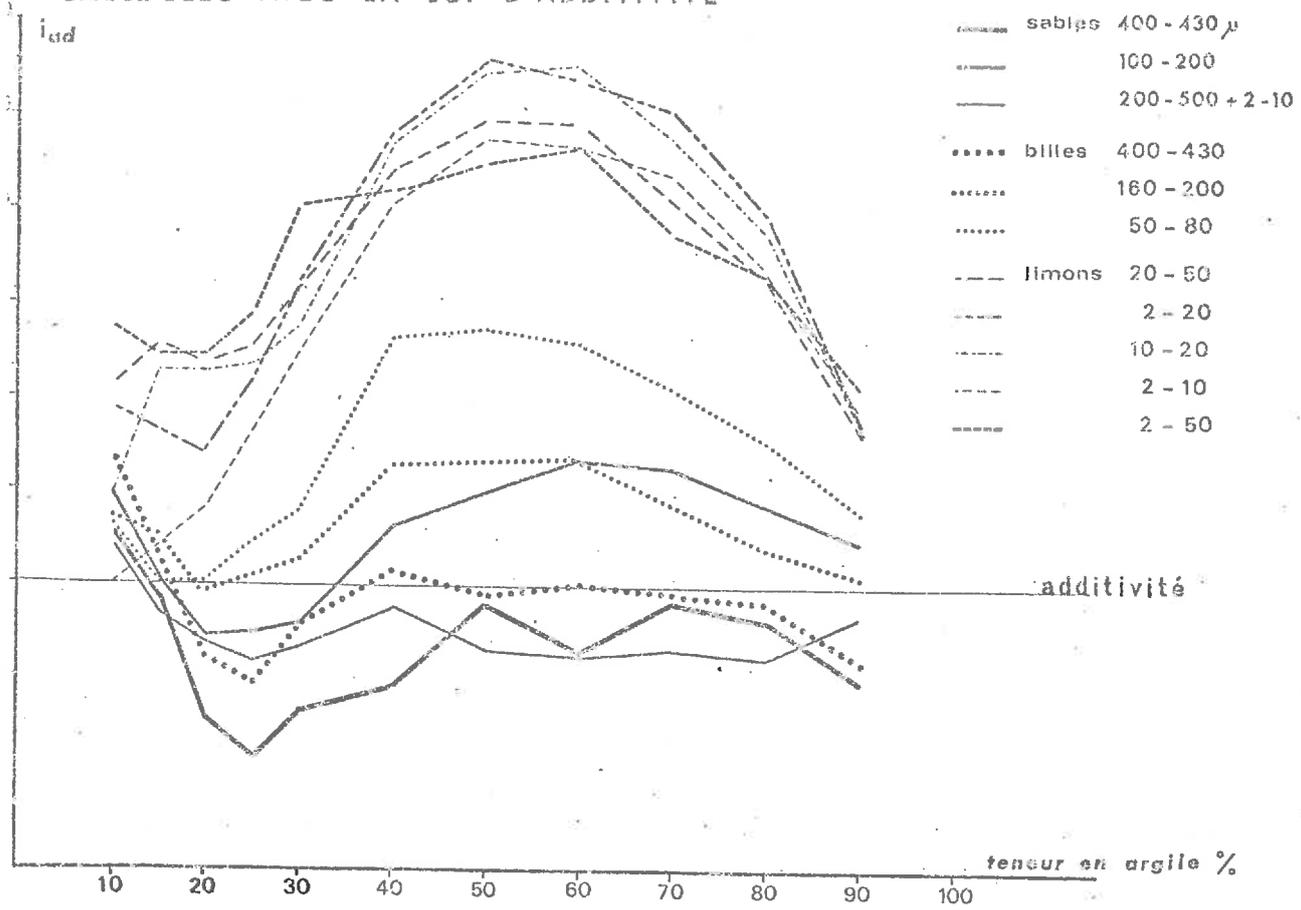
Ces deux modes de comparaison font nettement ressortir que les mélanges, après dessiccation, se présentent comme des systèmes fortement perturbés. Les mélanges à squelettes sableux font apparaître une porosité parfois supérieure même à celle calculée en additivité. Sur les mélanges à squelettes limoneux, bien qu'une diminution de porosité soit mise en évidence, il apparaît que la porosité mesurée reste encore très supérieure à celle calculée en remplissage ou substitution.

Par ailleurs, le sens des classements observés avec l'un ou l'autre indice montre le caractère spécifique des mélanges contenant une phase argileuse, par rapport aux mélanges binaires de squelettes.

Dans ce dernier cas en effet, le déplacement des porosités observées vers les valeurs déduites des hypothèses de remplissage-substitution était d'autant plus marqué que, toutes choses égales par ailleurs la taille de la fraction grossière gagnait en importance relative.

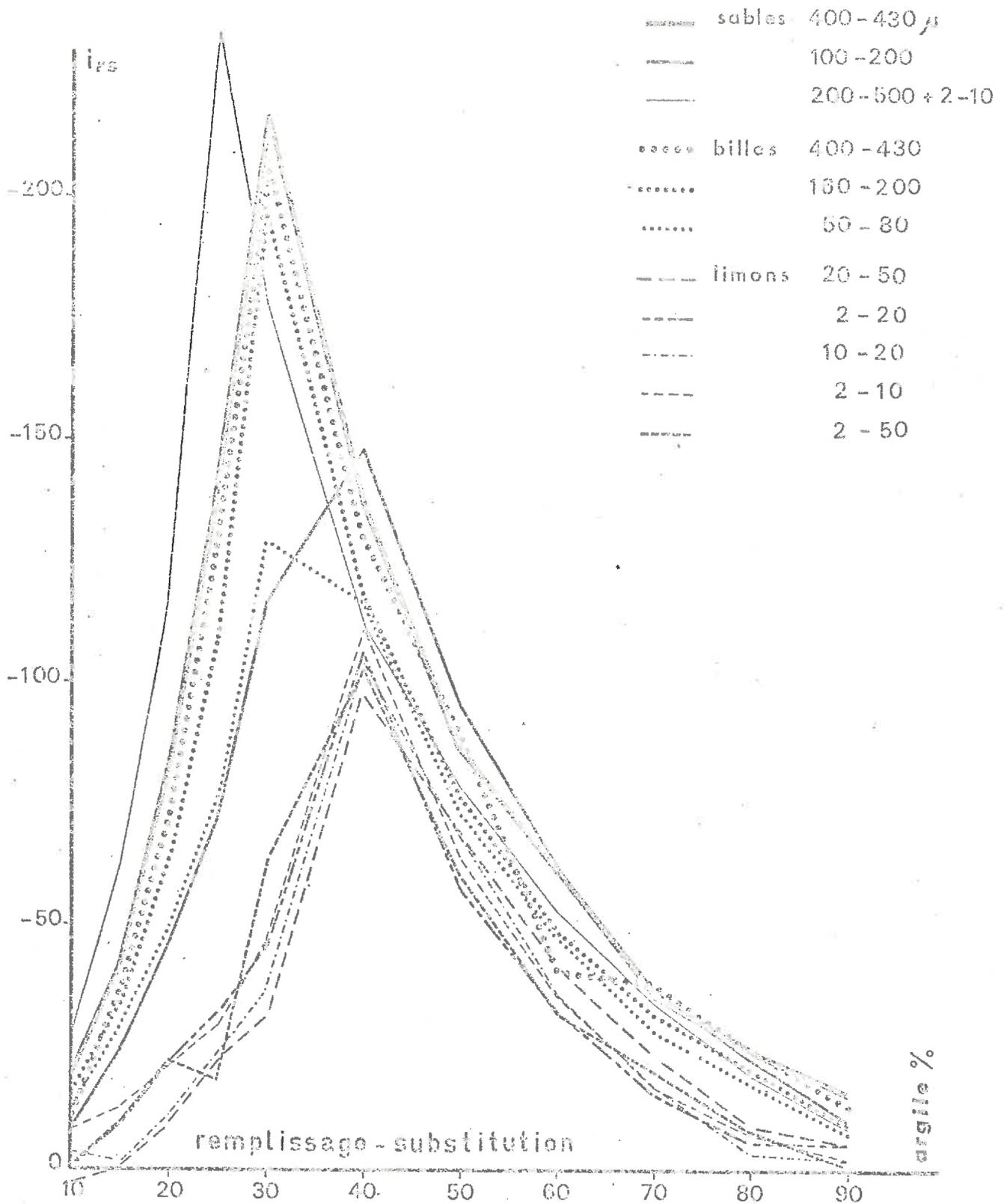
Il n'en est plus ainsi avec les systèmes à phase argileuse où le passage des constituants fins aux constituants grossiers entraîne une variation de porosité contraire.

28 DIFFERENCES RELATIVES DE POROSITE ENTRE VALEURS OBSERVEES ET CALCULEES AVEC LA LOI D'ADDITIVITE



DIFFERENCES RELATIVES DE POROSITE ENTRE VALEURS
OBSERVEES ET CALCULEES EN REMPLISSAGE ET SUB-
STITUTION

29

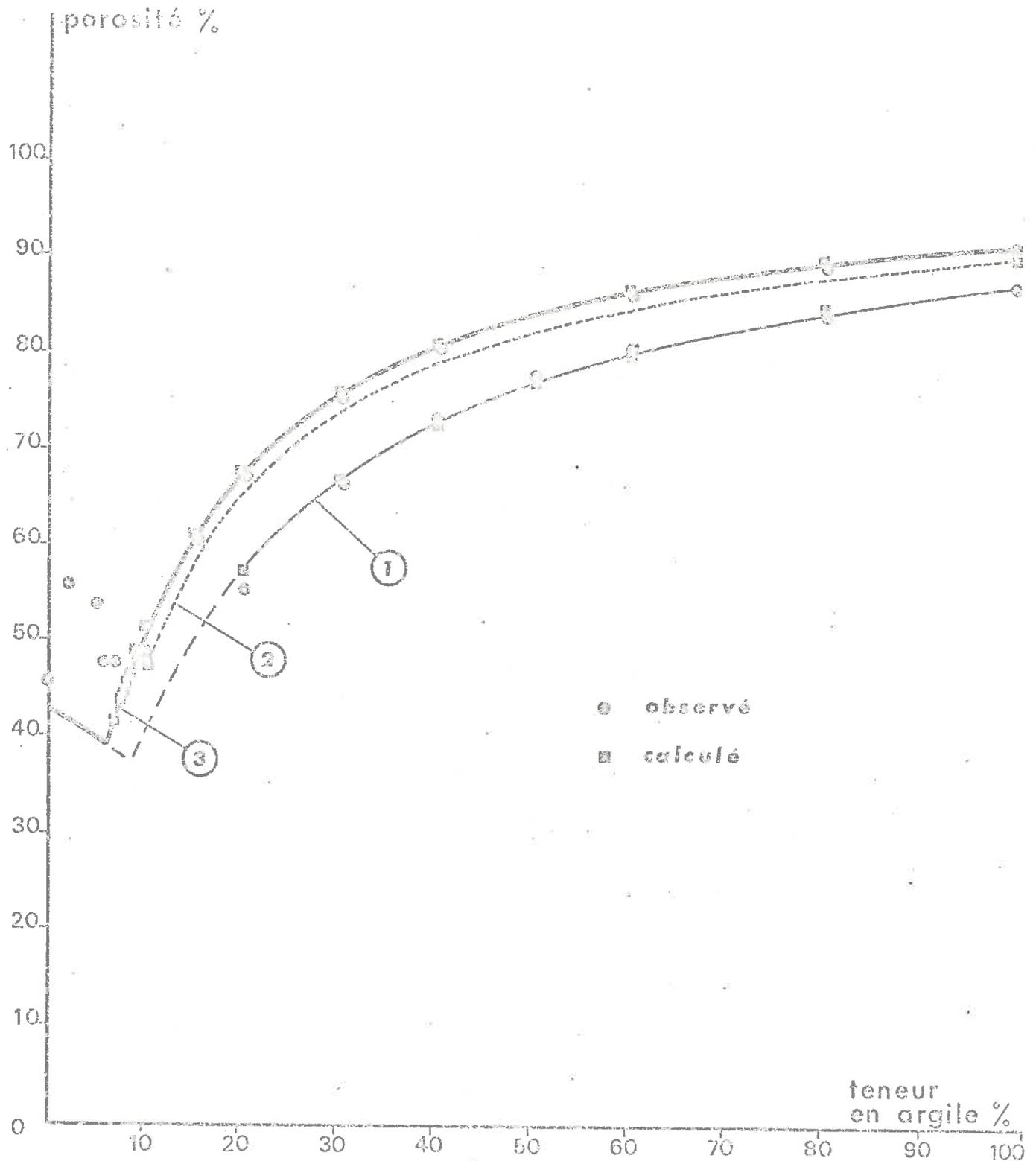


TENEUR EN ARGILE %	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90
POROSITE MESUREE %	47,0	54,4	60,4	64,3	70,7	75,2	78,5	81,1	83,0	84,7
POROSITE CALCULEE %	47,2	54,5	60,0	64,3	70,5	75,2	78,6	81,1	83,2	84,8

TABLEAU 18 : VERIFICATION DE LA LOI DE SUBSTITUTION AVEC UN
MELANGE DE SABLE 400-430 μ ET D'ARGILE HB APRES
MALAXAGE ($W^a = 221 \%$)

VERIFICATION de l'HYPOTHESE de SUBSTITUTION après
MELANGE de LIMON 2-50 μ et d'ARGILE H. E.

30



En conséquence, le facteur stérique qui régissait les relations entre particules du squelette ne peut plus être invoqué pour expliquer les résultats des interactions squelette-phase argileuse.

Afin de préciser ce dernier point nous avons procédé à des mesures de densité immédiatement après malaxage.

3.2.4. Densité après malaxage

Nous avons procédé à des mesures de $\bar{\gamma}_d$ sur deux ensembles de mélanges choisis aux extrêmes granulométriques des squelettes utilisés. Le volume encombré par un mélange donné a été mesuré dans un récipient de volume connu, comme dans le cas des matériaux meubles. Les manipulations sont effectuées en atmosphère saturée en vapeur d'eau pour éviter toute évaporation.

Les résultats obtenus sur le mélange en proportions croissantes de limon 2 - 50 μ à une pâte d'argile HB amenée à trois niveaux d'humidité sont exprimés sur la figure (30) en terme de porosité. Sur ce même graphique sont portées les valeurs de porosité calculées correspondant aux lois de remplissage et de substitution. Pour ce dernier domaine, il existe une courbe de variation de la porosité en fonction de la teneur en argile, pour chacune des teneurs en eau de la phase argileuse. En effet, l'argile étant saturée en eau, le volume encombré par 1 gramme d'argile varie avec la teneur en eau selon la relation:

$$\frac{1}{\bar{\gamma}_d^a} = \frac{1}{\bar{\gamma}_s^a} + \frac{W^a}{100}$$

où $\bar{\gamma}_d^a$ est la densité de la phase argileuse, $\bar{\gamma}_s^a$ sa densité de solide et W^a la teneur en eau de 100 grammes d'argile.

On peut tout d'abord constater sur la courbe 1 ($W^a = 248$ p. cent) que l'accord est très satisfaisant entre valeurs calculées et les valeurs observées pour les teneurs en argile $>$ à 20 % c'est à dire pour une grande partie du domaine de substitution. En deçà de cette valeur le mélange est techniquement difficile à réaliser. En accroissant la teneur en eau de la phase argileuse ($W^a = 335$ p.cent) l'accord est vérifié pour une teneur en argile voisine de 10 p.cent (point 2). Enfin, avec $W^a = 391$ p.cent les points expérimentaux vérifient l'hypothèse de substitution pour pratiquement l'ensemble du domaine concerné (courbe 3).

Comme le montre le tableau (18), des résultats semblables sont obtenus quand le squelette est cette fois ci un sable 400 - 430 μ . Avec une teneur en eau de 221 p.cent. l'hypothèse de substitution est vérifié quand la teneur en argile est égale ou supérieure à 15 p.cent. Le fait de pouvoir encore réaliser le mélange avec moins d'argile que dans la situation comparable présentée par la courbe 1 est vraisemblablement lié à la différence des surfaces spécifiques des deux types de squelettes.

Compte tenu de ces résultats nous pouvons donc dire qu'après malaxage, l'ensemble des échantillons se situait sur des courbes vérifiant l'hypothèse de substitution et que pour tous les mélanges la phase argileuse pouvait être considérée comme continue. En effet, lors de la préparation des échantillons à 10 et 15 p.cent de teneur en argile, la teneur en eau de malaxage a été empiriquement modulée en fonction de la nécessité d'obtenir un mélange des constituants paraissant homogène à l'oeil après une dizaine de minutes de malaxage. Ainsi, pour les mélanges à 10 p.cent d'argile la teneur en eau varie entre 400 et 300 p.cent et dans le cas des mélanges à 15 p.cent d'argile, elle est comprise entre 350 et 300 p.cent.

Pour tous les mélanges où la teneur en argile est égale ou supérieure à 20 p.cent une teneur voisine de 230 p.cent en eau s'est révélée suffisante. Une représentation de l'état initial des échantillons après malaxage est donnée par la figure (31). Dans le domaine de substitution il n'a pas été tenu compte des variations liées aux différentes densités de solide des mélanges et seule la courbe correspondant au limon 2 - 50 μ a été tracée.

3.3. CONCLUSIONS

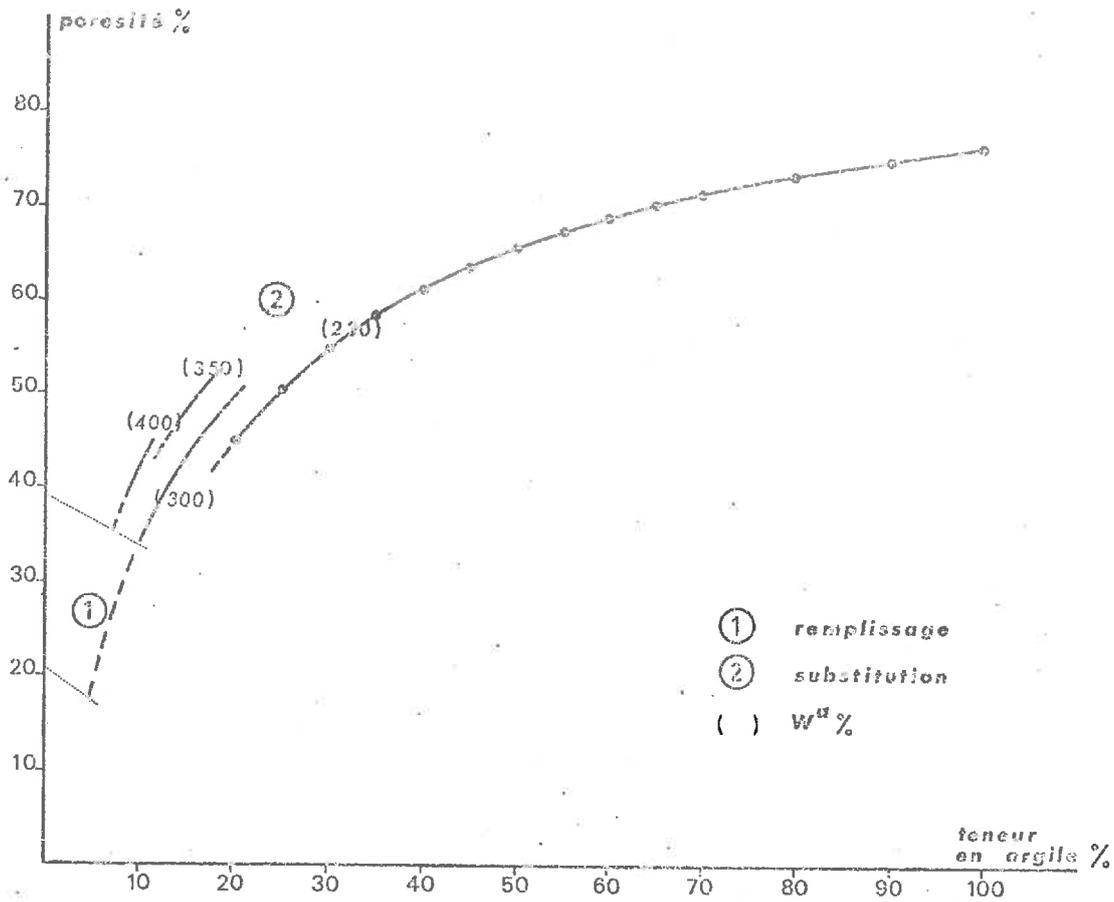
Lors du malaxage, le comportement général des mélanges est celui d'un mélange binaire de squelette dont le rapport de taille serait très élevé. Dans ces conditions nous avons vu en effet que les effets stériques de perturbation étaient négligeables.

Après dessiccation, l'allure générale des variations de porosité dans une série donnée ne correspond plus à celle observée sur les mélanges de squelette. Il n'est donc plus possible d'utiliser ici une relation telle que celle du modèle continu pour la prévision des valeurs de porosité.

Plus fondamentalement, le classement des courbes fait apparaître que les perturbations dont rendent compte les porosités mesurées n'ont pas pour origine une simple différence de taille entre particules.

Cependant, il faut noter que si l'introduction d'une phase argileuse singularise les échantillons elle ne masque pas les caractéristiques propres à chaque squelette dont l'influence au niveau de la porosité reste sensible quand augmente la teneur en argile.

31) ETAT INITIAL des ECHANTILLONS APRES MALAXAGE



Dans la suite donnée à cette étude nous avons d'abord recherché à rendre compte au niveau descriptif d'une disposition des constituants expliquant cette perturbation.

Dans un second temps nous avons cherché à montrer quels facteurs, liés à l'histoire hydrique du matériau étaient en cause.

4. DESCRIPTION DE L'ORGANISATION DES PHASES ARGILE-SQUELETTE.

4.1. Commentaire sur les manifestations de la perturbation dans les mélanges argile-squelette

L'écart entre les porosités mesurées et calculées dans le domaine de substitution signifie qu'une phase continue d'argile n'est pas réalisée à l'état sec. Une telle interprétation est évidemment liée au fait que nous admettons que la porosité caractérisant l'organisation de la phase argileuse à l'état sec conserve une valeur constante, quelque soit le squelette auquel est associée la phase argileuse.

De fait, il est a priori difficile d'admettre, compte tenu de la nature et de l'intensité des liaisons entre particules phylliteuses, que l'introduction d'un squelette suffise à modifier la disposition propre aux constituants argileux.

En effet, l'utilisation de cations différents lors de la floculation des suspensions d'argile, ou l'application de fortes contraintes d'origine externe au matériau (FAURE 1972) seraient seules susceptibles de modifier la porosité de la phase argileuse.

Nous avons calculé, sur la base de la densité texturale mesurée de la phase argileuse sèche, le taux d'encombrement par l'argile du volume non occupé par le squelette dans l'ensemble des échantillons, soit pour 1 gramme de mélange :

$$T = \frac{\text{volume encombré par la phase argile}}{\text{volume encombré par le mélange} - \text{volume occupé par le squelette}}$$

Ceci s'écrit :

$$T = \frac{100 \frac{A}{\gamma_d^a}}{1 - \frac{S}{100 \gamma_s^s}} \cdot 100$$

les valeurs de T, portées au tableau (19) montrent que T croît avec la teneur en argile tout en restant inférieure à 100 jusqu'à une teneur de 90 p.cent d'argile.

Dans le domaine de remplissage, le taux d'encombrement est nécessairement inférieur à 100.

Cependant, dans le domaine de substitution les valeurs de T, encore inférieures à 100, indiquent que tout se passe comme si un nouvel espace poral était apparu. Nous appellerons "lacunes" les vides ainsi créés et porosité lacunaire l'ensemble de l'espace du à ces lacunes dans l'unité de volume de mélange. Pour souligner les particularités du domaine de remplissage, on peut par ailleurs caractériser l'organisation du squelette dans le mélange par sa porosité propre que nous appelons porosité matricielle. Cette dernière se définit comme suit :

$$\eta_M = \frac{\frac{1}{\bar{\gamma}_d} - \frac{S}{100 \bar{\gamma}_s}}{\frac{1}{\bar{\gamma}_d}} \cdot 100$$

soit

$$\eta_M = \left(1 - \frac{S \bar{\gamma}_d}{\bar{\gamma}_s} \right) \cdot 100$$

Le calcul de η_M sur la base des valeurs expérimentales de $\bar{\gamma}_d$ aboutit à des valeurs toujours supérieures à celles calculées sur la base des lois de remplissage et de substitution, au moins pour les teneurs supérieures à 15 p.cent d'argile.

Un exemple de ces résultats est fourni sur la figure (32).

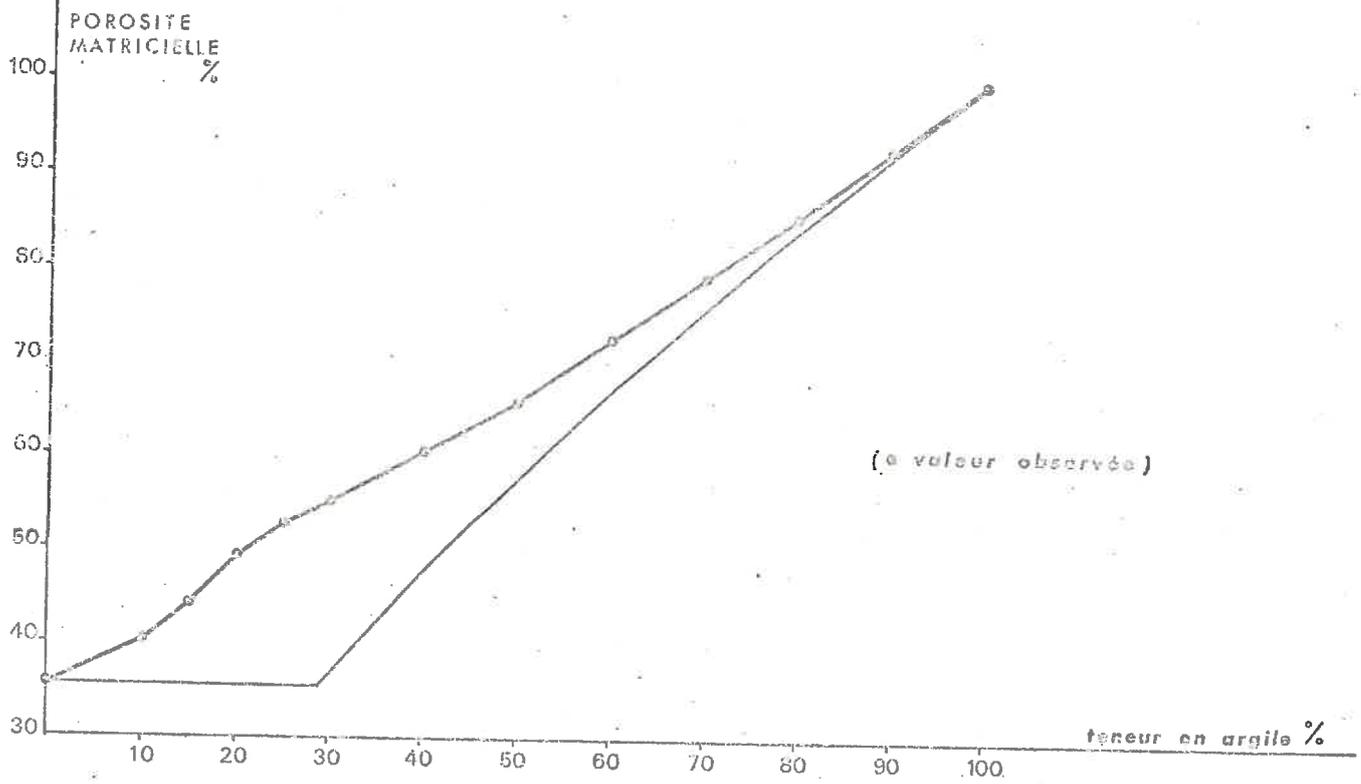
En conclusion, l'ensemble de ces résultats nous a conduit à envisager :

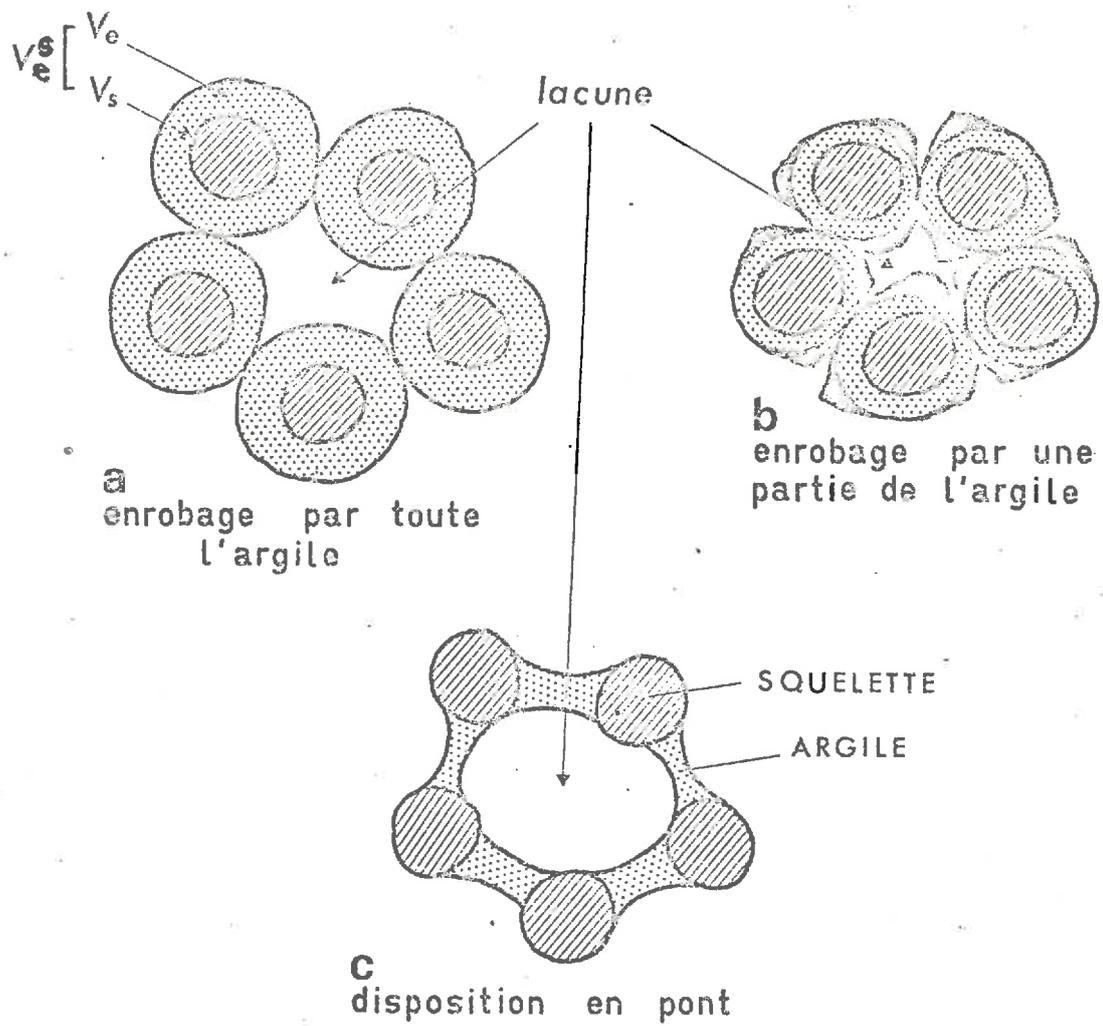
- une disposition relative de l'argile par rapport au squelette
- une évolution spécifique de la phase argileuse qui conduirait aux lacunes.

4.2. Recherche d'un modèle de disposition relative de la phase argileuse et du squelette.

Il s'agit donc maintenant de rechercher le type de disposition des constituants qui permet de rendre compte de la porosité matricielle des particules du squelette et de la présence d'une porosité lacunaire dans la phase argileuse.

32 VARIATIONS COMPAREES des POROSITES MATRICIELLES OBSERVEES pour la SERIE
à SQUELETTE de MICROBILLES 400-430 μ et CALCULEES (REPLISSAGE - SUBSTITUTION)





③③ SCHEMA DE DISPOSITIONS RELATIVES DE L'ARGILE ET DU SQUELETTE

TENEUR EN ARGILE %	S Q U E L E T T E S											
	l 2-10 µ	l 2-20	l 10-20	l 2-50	l 20-50	b 50-80	s 100-200	b 160-200	b 400-430	s 400-430	s 200-500 + 2-10 (20%)	
10	16,2	17,8	15,2	21,0	16,6	19,3	18,6	21,7	23,2	22,5	25,9	
15	24,2	25,2	24,7	29,2	25,0	26,4	25,1	30,1	30,6	30,3	34,4	
20	32,0	31,8	31,8	37,1	31,7	33,8	31,0	36,7	36,0	35,4	41,9	
25	40,6	40,5	38,7	45,4	38,8	41,5	37,4	44,0	42,2	41,3	48,4	
30	49,5	50,0	46,3	55,6	47,0	48,6	43,7	50,7	49,9	48,3	55,0	
40	66,1	67,0	64,4	67,9	62,3	65,1	57,6	64,5	62,0	59,5	66,3	
50	77,4	79,8	77,4	78,6	75,1	75,0	68,3	76,6	70,5	70,8	73,5	
60	86,6	87,6	86,5	87,5	84,1	82,7	77,8	81,5	78,4	77,1	80,1	
70	93,0	94,0	91,8	91,8	90,6	88,3	85,0	87,0	84,7	84,8	86,0	
80	96,6	97,5	96,0	97,0	94,3	93,1	90,6	91,3	90,0	90,0	90,6	
90	98,7	97,7	97,7	99,5	97,1	97,0	95,6	95,8	94,2	93,3	95,7	
	Domaine de la loi de remplissage					Domaine de la loi de substitution						
	l : limon		b : billes			s : sable						

TABLEAU 19. TAUX D'ENCOMBREMENT PAR L'ARGILE DU VOLUME NON OCCUPE PAR LE SQUELETTE DANS LES MELANGES.

Un premier schéma d'interprétation est suggéré par l'étude de MONNIER (1966) sur la couleur des terres en relation avec leur texture et conforté par notre étude sur les relations entre la stabilité structurale et la surface spécifique des particules du squelette (FIES 1970). Un ensemble convergent de résultats conduit à considérer la fraction argileuse comme répartie à la surface des particules de squelette.

C'est en tenant compte d'une telle tendance quant à la répartition de l'argile que nous avons élaboré un modèle d'enrobage.

4.2.1. Méthode de calcul.

Considérons figure (33_a) un massif constitué par l'empilement de sphères enrobées uniformément d'une couche d'argile. Une telle disposition provoque l'écartement des grains du squelette et rend compte à la fois de l'existence d'une porosité de lacune au sein de la phase argileuse et d'une porosité d'arrangement des grains du squelette supérieure à leur porosité initiale en l'absence d'argile.

Pour tester une telle disposition il faut pouvoir comparer le volume encombré par l'argile en position d'enrobage, v_e au volume encombré par l'argile effectivement introduit dans le mélange considéré, v .

En effet, pour $v_e = v$, la disposition est vérifiée. Par contre pour $v_e < v$, seule une partie de l'argile introduite a participé à l'enrobage et pour $v_e > v$ c'est une disposition en pont qu'il faut envisager (figure 33 b,c).

Mais le calcul de v_e à partir de poids volumique nécessite une hypothèse sur l'arrangement des sphères enrobées. Aussi nous avons admis que leur porosité d'empilement était indépendante de la teneur en argile et égale à la porosité initiale propre au squelette envisagé soit $1 - B_0$.

Dans 1 gramme de mélange, le volume v_e^s de sphères enrobées encombre un volume égal à $\frac{1}{\bar{\gamma}_d}$. En écrivant que la porosité d'assemblage des sphères enrobées est égale à $1 - B_0$, on a après simplification :

$$v_e^s = \frac{1}{\bar{\gamma}_d} B_0$$

Le volume encombré par l'argile participant à l'enrobage est alors :

$$v_e = \frac{1}{\bar{\gamma}_d} B_0 - \frac{S}{100 \bar{\gamma}_s^s}$$

Le dernier terme représentant le volume de solide de particules dans un gramme de mélange.

Par ailleurs le volume encombré par l'argile dans un gramme de mélange est :

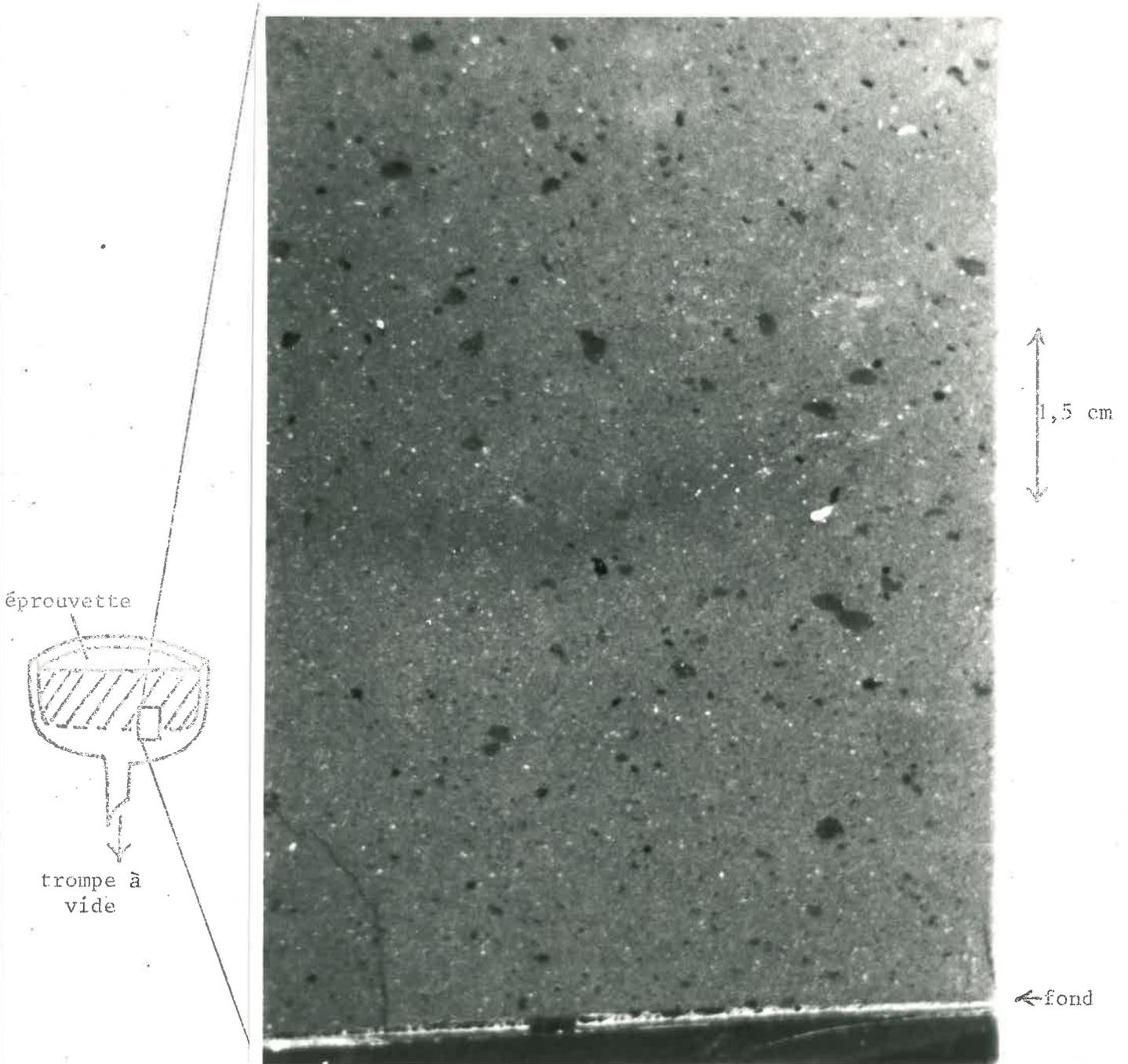
$$v = \frac{A}{100 \bar{\gamma}_d^a}$$

Ces deux dernières relations permettent de calculer le rapport

$$E = \frac{v_e}{v}$$

traduisant le taux de participation, E, de l'argile introduite, à l'enrobage.

102'

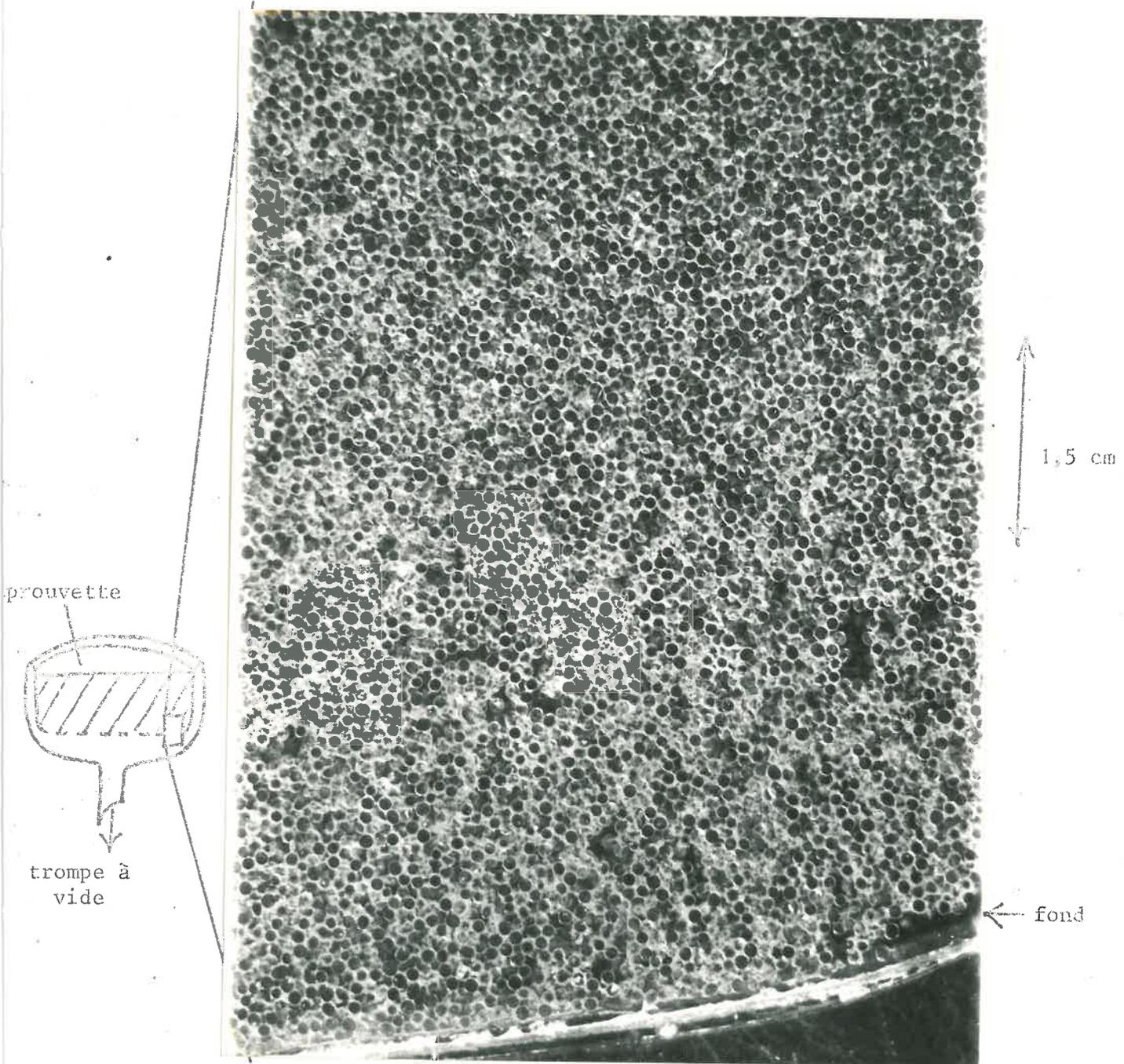


7 : Section verticale dans un échantillon limono argileuse

TENEUR EN ARGILE %	SQUELETTES										
	l	l	l	l	l	b	s	b	b	s	s+ ¹ 200-500 + 2-10 (20)
μ	2-10	2-20	10-20	2-50	20-50	50-80	100-200	160-200	400-430	400-430	
10	4,8	10,9	8,2	12,7	12,3	5,9	7,3	6,1	7,5	5,4	3,8
15	8,5	12,6	15,4	14,2	16,5	6,3	7,1	7,7	7,2	5,9	4,2
20	12,1	14,4	18,0	16,3	18,4	8,7	7,8	8,4	6,6	4,8	5,5
25	17,1	19,6	21,0	20,6	21,8	12,1	10,3	11,0	8,0	6,0	6,9
30	22,6	25,9	25,3	26,6	26,8	15,4	13,1	13,8	11,8	9,2	9,1
40	33,0	36,7	38,0	32,5	37,3	25,6	21,4	21,1	17,6	14,1	13,8
50	40,0	45,2	46,8	39,0	45,4	31,0	27,9	25,8	21,6	20,9	16,7
60	46,7	50,8	53,7	45,3	52,0	36,0	34,6	30,8	26,7	24,2	20,4
70	52,0	56,3	58,0	48,6	57,5	40,3	40,2	34,8	31,2	30,2	24,5
80	55,5	59,6	62,0	53,6	61,0	44,6	45,3	38,3	35,7	34,6	28,2
90	57,8	59,6	63,8	56,4	63,9	48,7	50,6	42,9	39,8	37,6	33,4

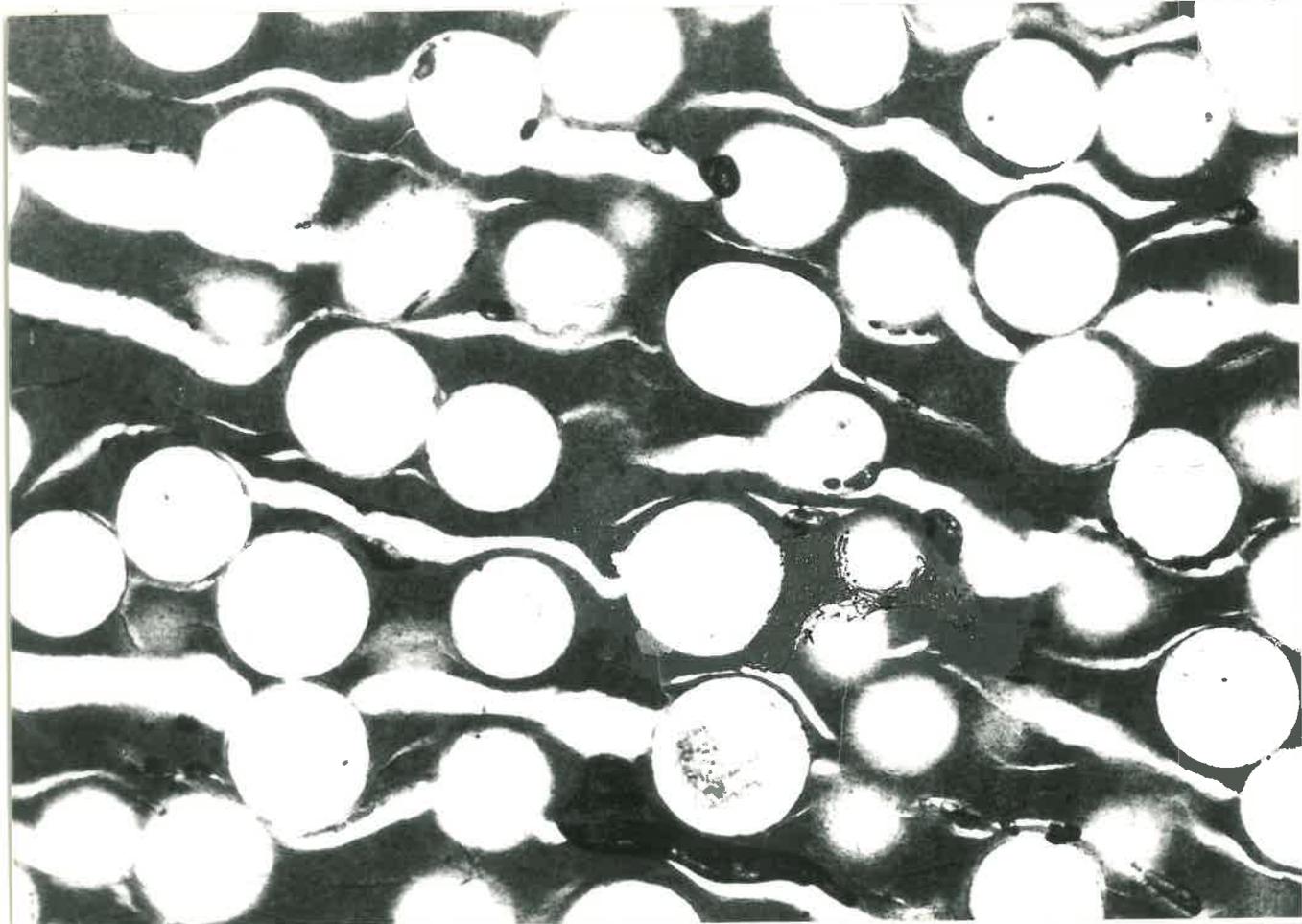
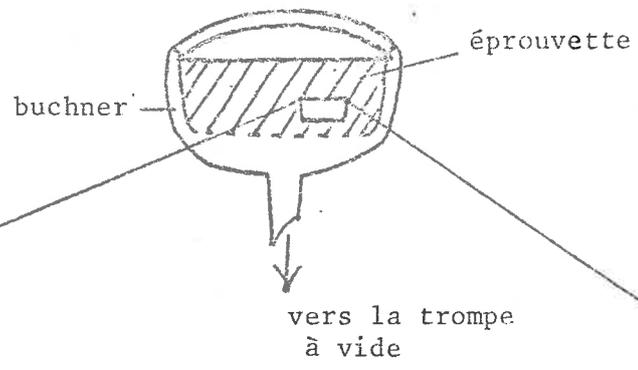
1 : limon - b : billes - s : sable

TABLEAU 20 : TAUX D'ENCOMBREMENT DE L'ARGILE NE PARTICIPANT PAS A L'ENROBAGE.



8 : Section verticale dans un mélange contenant 10 p.cent d'argile HB associée à des microbilles 160-200 μ .

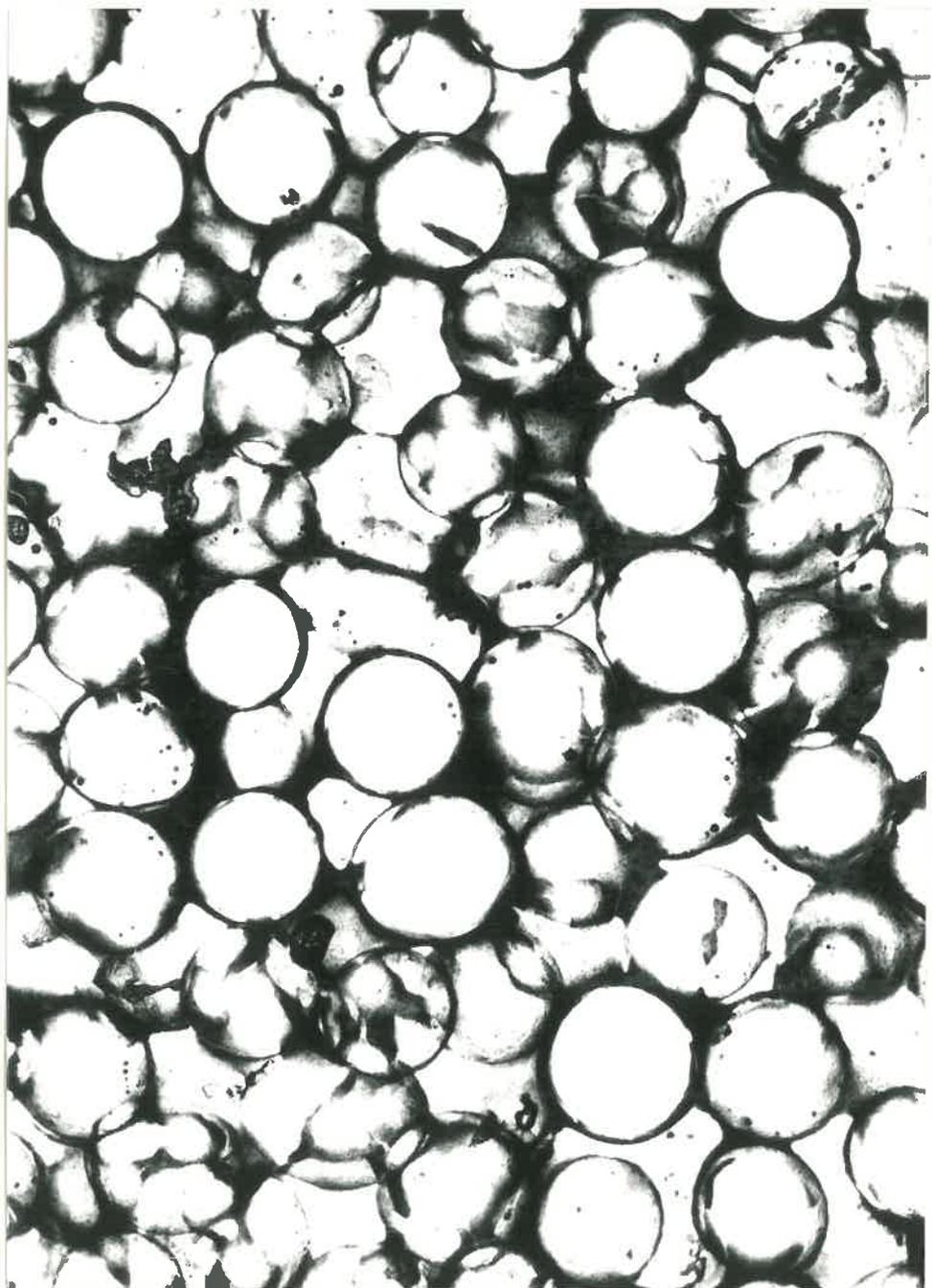
102 m.m.



200 μ

10 : Détail d'une section dans un massif contenant 30 p.cent d'argile HB associée à des microbilles 160-200 μ .

102 W

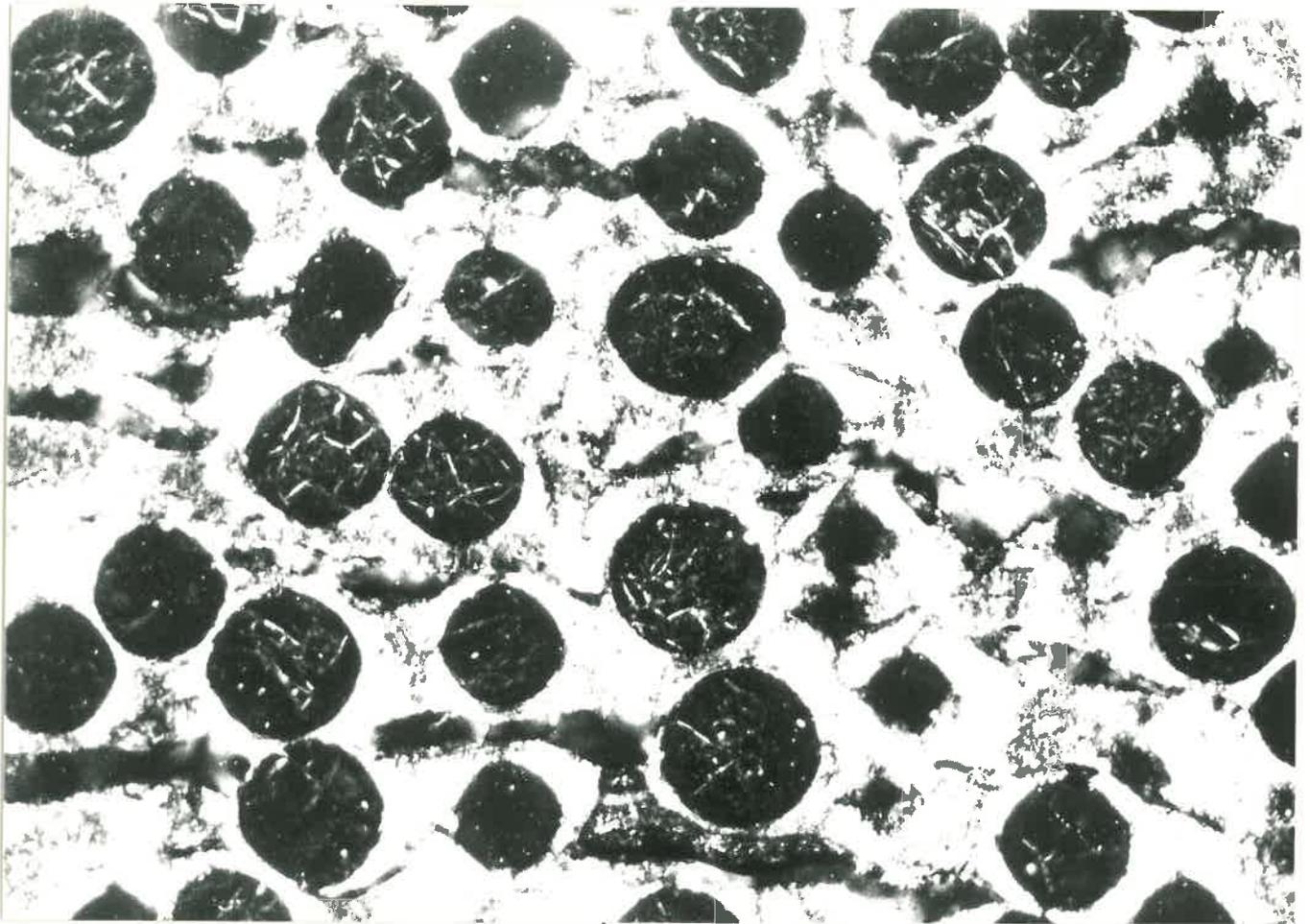


200 μ

9 : Détail d'une section dans un massif contenant 10 p.cent d'argile HB associée à des microbilles 160-200 μ .

106 21

106 21



200 μ

11 : M \hat{e} me section que pr \acute{e} c \acute{e} demment en lumi \grave{e} re polaris \acute{e} e analys \acute{e} e.

4.2.2. Application aux mélanges.

La figure (34) montre que dans tous les mélanges, les valeurs de E restent inférieures à 1. Ceci signifie que pour la majorité des échantillons une partie de l'argile peut être considérée comme participant à l'enrobage de grains du squelette, l'autre partie se situant dans l'espace ménagé entre les particules enrobées.

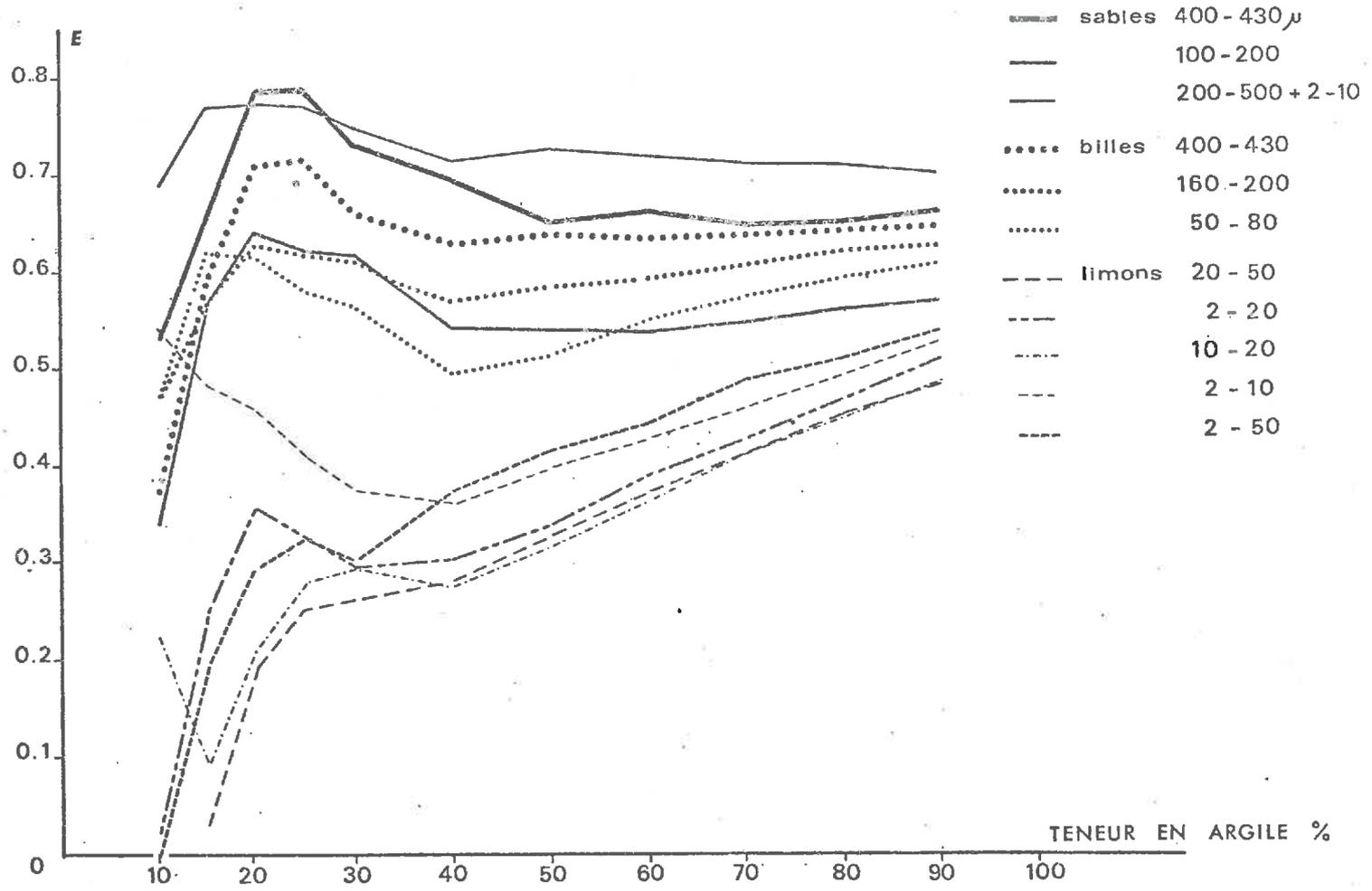
En particulier il apparaît que le taux de participation à l'enrobage est toujours plus élevé dans le cas des matériaux à squelette sableux que dans celui des matériaux à squelette limoneux. Pour les premiers, les valeurs de E sont généralement supérieures à 0,5 pour les seconds, les valeurs de E croissent avec la teneur en argile vers la valeur de 0,5.

Les exceptions correspondent d'une part aux mélanges à squelette 2 - 10 μ qui ne rejoignent le comportement des autres matériaux à squelette limoneux que pour des teneurs en argile supérieure à 40 p.cent, d'autre part, aux mélanges vérifiant en pratique à 10 et 15 p.cent d'argile, l'hypothèse de remplissage et pour lesquels les valeurs de E, proches de zéro indiquent un non enrobage.

L'enrobage par une fraction de l'argile étant le cas le plus général, nous avons calculé le taux d'encombrement, T', par l'argile ne participant pas à l'enrobage, de l'espace ménagé entre les particules de squelette enrobées. Les valeurs de T' indiquées au tableau (20) sont calculées selon la relation suivante :

$$T' = \frac{v - v_c}{\frac{1}{\gamma_d} - v_e^s} \cdot 100$$

TAUX DE PARTICIPATION DE LA PHASE ARGILEUSE A L'ENROBAGE



Il apparaît que ces valeurs restent toujours inférieures à 100 ce qui indique que les conséquences de l'hypothèse d'enrobage sont en accord avec l'existence d'une porosité de lacune dans la phase argileuse.

4.3. Etude qualitative sur lame mince.

L'examen des lames minces réalisées sur mélanges après dessiccation, à un grossissement faible, a tout d'abord permis de vérifier l'homogénéité de la répartition des constituants à la suite du processus de fabrication et de séchage des échantillons.

Cet aspect est illustré par les documents 7 et 8 réalisés à partir de sections verticales de gateaux. En 7, la structure du matériaux apparaît continue. Seuls les constituants les plus grossiers sont visibles ainsi que la trace de quelques bulles. En 8 la structure du massif apparaît également continue. La phase argileuse (en blanc) est nettement visible. C'est le schéma d'enrobage qui apparaît ici le mieux définir sa relation avec les microbilles. De nombreuses lacunes, à bords concaves sont également visibles. Une vue de détail est fournie par la photographie 9. Ici, la phase argileuse (en noir ou en grisé) apparaît nettement recouvrir la surface des microbilles de verre. De nombreux "menisques" sont visibles.

L'examen des zones de contact entre billes, fait toujours apparaître en lumière polarisée analysée, une forte biréfringence indiquant la présence d'un film argileux. Les lacunes sont nettement visibles. Le squelette apparaît commander l'architecture générale du massif.

Quand la teneur en argile augmente, une disposition telle que celle présentée sur la photographie 10 se développe.

Chaque grain du squelette reste entouré par la phase argileuse, parfois à l'état de film très mince. Cependant le terme d'enrobage ne paraît plus ici convenir à la description de la lame mince. Les grains apparaissent noyés dans une masse argileuse présentant des lacunes allongées. Il semble ici que c'est davantage le comportement de l'argile qui confère son trait dominant au matériau observé.

Les lacunes apparaissent allongées selon une direction préférentielle. Dans le centre de la lame, cette direction semble normale à la direction générale du flux d'eau lors de la succion provoquée par la trompe à eau.

Le document 11 fait apparaître le caractère très biréfringent de la phase argileuse. L'ensemble des observations, conduites sur des lames minces exploitables, c'est à dire correspondant à des mélanges binaires où le squelette est relativement grossier d'une part, et où la phase argileuse ne dépasse pas des teneurs de 50 p.cent d'autre part, permettent d'avancer :

- que le schéma d'enrobage semble vérifié pour les faibles teneurs en argile, et jusqu'à des teneurs d'autant plus fortes que le squelette est de dimension réduite.
- que l'apparition de lacunes dans la phase argileuse est bien confirmée. En particulier, il apparaît que les fissures se manifestent toujours dans la phase argileuse, avec un allongement qui semble dépendre de la direction du flux d'eau lors de la dessiccation. Enfin cette phase argileuse apparaît fortement orientée elle même.

4.4. Etude quantitative sur lame mince

Une étude quantitative a été amorcée avec la collaboration du Centre de Morphologie Mathématique de Fontainebleau. Il s'agit d'une étude très limitée, qui a porté sur deux lames minces d'un mélange de sable 400 - 430 μ et d'argile HB, l'une à 10 p.cent d'argile, l'autre à 20 p.cent. On ne présentera ici que les conclusions principales auxquelles cette étude a permis d'aboutir (MORVAN 1975), qui reposent sur les travaux de MATHERON (1967) et de SERRA (1969).

A partir de mesures portant sur les trois phases visibles, c'est à dire les grains, les lacunes, l'argile, les deux lames étudiées peuvent être qualifiées d'isotropes. Il est possible par ailleurs de différencier les deux lames par des critères portant sur la phase argile d'une part, et la réunion des phases argile-grains d'autre part. Enfin, un modèle théorique de disposition relative des grains de sable et de la phase argile, basé sur la disposition au hasard dans l'espace de centre de sphères, se révèle être tout à fait adapté à représenter la disposition des grains de sable dans la lame mince. Pour la phase argileuse un schéma d'enrobage, tel que celui présenté sur la figure (33a) se révèle insuffisant. Afin de rendre compte des caractéristiques des images observées il a été nécessaire de faire intervenir une phase argileuse ne participant pas à l'enrobage.

Ces conclusions rejoignent celles que nous avons tirées du calcul de l'assemblage argile-squelette. Il ne s'agit là que de résultats partiels non généralisables, mais cependant encourageants quant aux possibilités de descriptions objectives de lames minces et à l'acquisition de paramètres utilisables dans des modèles de prévision de l'arrangement des particules dans les sols.

5. ETUDE DES FACTEURS DE L'ORGANISATION DES CONSTITUANTS DANS LES MELANGES

La mesure directe des porosités de mélanges après malaxage puis après dessiccation a montré que seules les premières obéissaient à une loi d'association.

Pour rendre compte des secondes, un modèle d'organisation des constituants dans les mélanges après dessiccation a été élaboré.

Conforté par des observations microscopiques, ce modèle permet de dire qu'il y a localisation partielle de la phase argileuse autour du squelette et que se développe, dans la phase argileuse, un système de lacune qui lui est propre.

Nous allons essayer, en nous plaçant à différents stades dans l'hydratation de voir quand apparaissent ces différenciations.

Nous avons choisi pour cela d'associer à l'argile HB déjà utilisée, un squelette de billes 160 - 200 μ de façon à pouvoir affecter à la phase argileuse seule les teneurs en eau qui seraient mesurées sur les mélanges aux différents stades d'hydratation. Un squelette trop grossier aurait par ailleurs rendu délicate la détermination des densités.

5.1. Mode opératoire

Afin d'assurer l'homogénéité hydrique au sein de chaque échantillon nous les avons mis successivement en équilibre avec des pressions pneumatiques croissantes jusqu'à pF 4, 2, et au delà, avec différentes tensions de vapeur déterminées par des solutions sursaturées maintenues à 20° C, tableau (21).

Les échantillons correspondent aux teneurs en argile de 5, 20, 30, 40 et 50 p.cent. Par ailleurs des échantillons d'argile pure ont été soumis à la même série de traitements. Après malaxage chaque mélange a été introduit dans des anneaux de diamètre 3 cm et de hauteur 1 cm. A la suite de chaque équilibre nous avons déterminé sur des échantillons correspondant aux différentes teneurs en argile la densité et l'humidité. Les échantillons restant sont portés à un pF supérieur jusqu'à réalisation d'un nouvel équilibre hydrique.

5.2. Résultats

Les résultats de cette manipulation sont présentés sur la figure (35) en terme de porosité aux différents états d'équilibre, pour les teneurs en argile retenues.

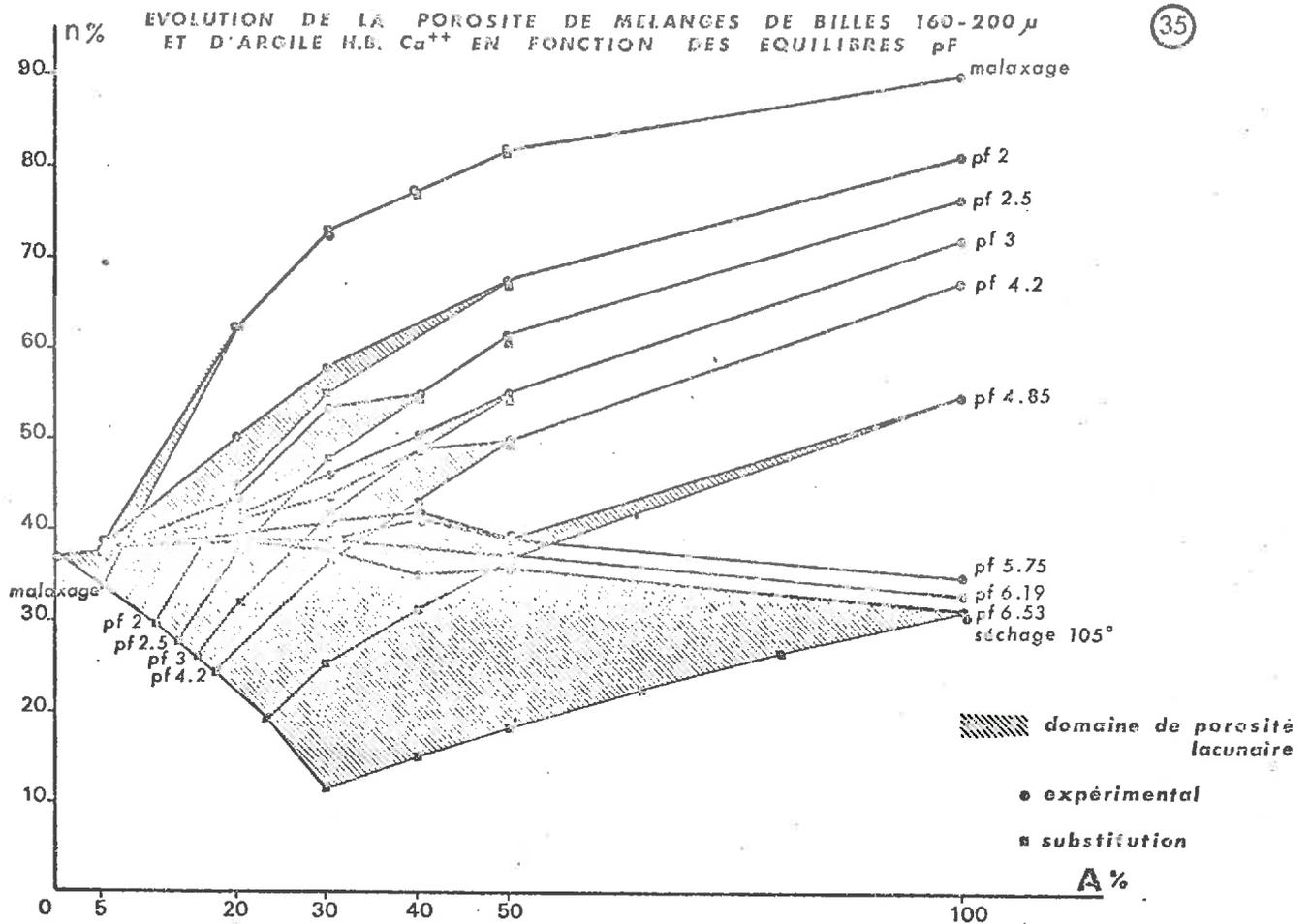
Sont également portées sur ce graphique les porosités calculées en remplissage et substitution.

On peut constater, pour la courbe "malaxage" l'accord entre les porosités calculées et mesurées, à l'exception du mélange à 5 p.cent d'argile qui se situe à plus de 4 p.cent de porosité en valeur absolue au dessus de la valeur théorique. A pF2, une discordance apparaît entre les valeurs des porosités expérimentales et théoriques pour les mélanges à 20 et 30 p.cent d'argile, les valeurs observées étant supérieur aux valeurs calculées.

Ces discordances correspondent bien à l'apparition d'une porosité lacunaire puisqu'elles se manifestent dans le domaine de substitution où la phase argileuse est continue. Elles ne sont pas liées à des différences d'état d'hydratation (et donc de gonflement) de la phase argileuse entre les échantillons de textures différentes portés au même équilibre. Comme l'indique la figure (36), il semble au contraire qu'à même équilibre la teneur en eau rapportée à l'argile dans les mélanges soit

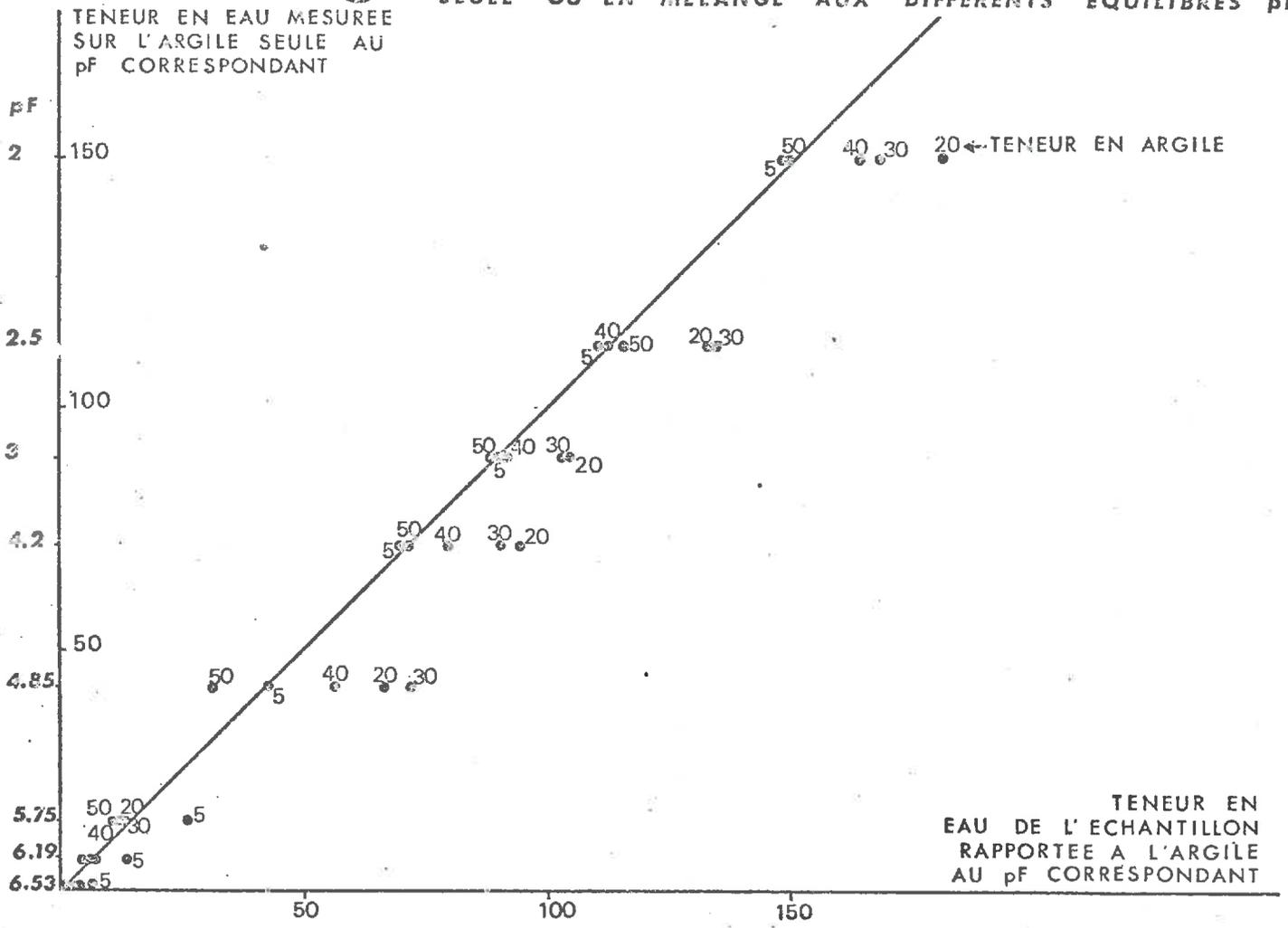
Etat initial : malaxage $W^a = 315$ p.cent		
P^F		
2		
2,5	pression pneumatique	
3		
4,2		
4,85		
5,75	Na ₂ SO ₃ , 7 H ₂ O	Solutions sursaturées à 20°C
6,19	Ca Cl ₂ , 6 H ₂ O	
6,53	solution à 69,095 % SO ₄ H ₂	
séchage en étuve à 105°C		

TABLEAU 21 : TRAITEMENTS DES MELANGES ARGILE HB-MICROBILLES
160 - 200 μ



36

TENEURS EN EAU COMPAREES DE LA PHASE ARGILEUSE SEULE OU EN MELANGE AUX DIFFERENTS EQUILIBRES pF



supérieure à celle mesurée sur le pâton d'argile pure, au moins pour les teneurs 20, 30 et 40 p.cent d'argile. L'accord est par contre satisfaisant d'une part pour l'échantillon le plus pauvre en argile (5 p.cent), d'autre part pour celui le plus riche (50 p.cent).

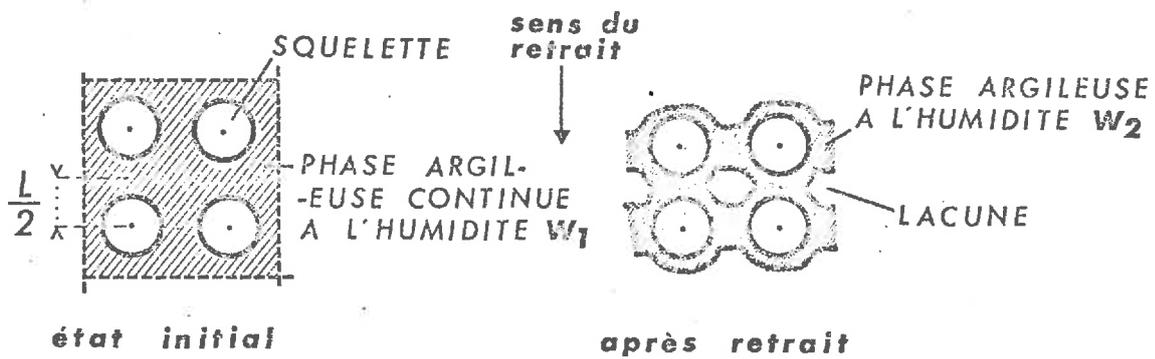
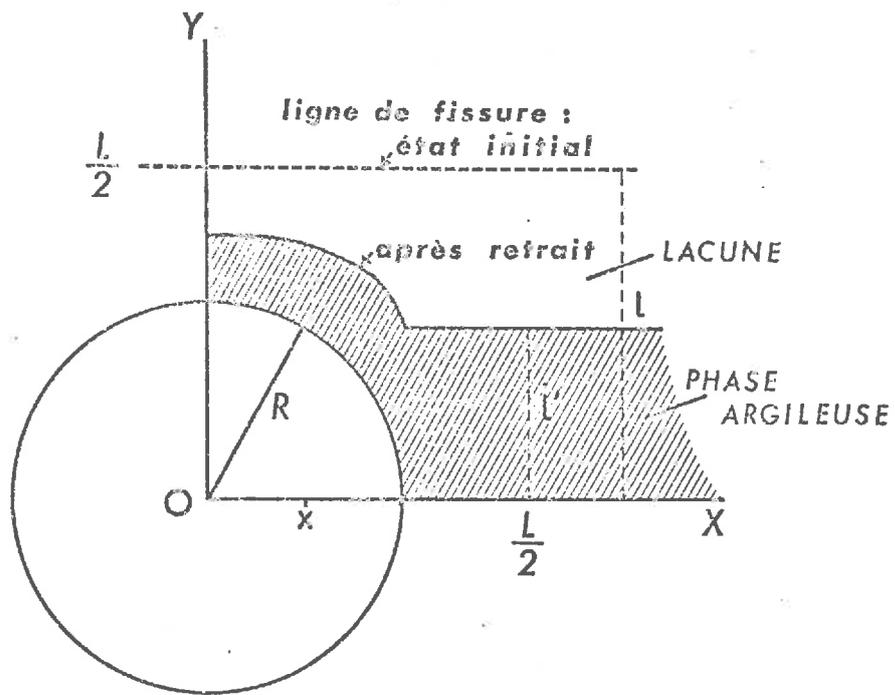
L'apparition d'une porosité lacunaire se marque dans les mêmes conditions dès pF 4, 2 pour l'échantillon à 40 p.cent d'argile et au delà de pF 4,85 pour le mélange à 50 p.cent d'argile. Enfin dès pF 5,75 les porosités totales observées sont proches des valeurs qui seraient mesurées après séchage à 105° C. Ainsi pour chaque échantillon, entre le malaxage et la dessiccation à 105° C, une organisation des constituants se manifeste plus ou moins tôt dans le déroulement de de l'histoire hydrique, selon la texture propre à l'échantillon considéré.

5.3. Interprétation

Nous avons cherché à préciser sur un modèle simple les facteurs d'apparition de fissures responsables de la porosité de lacune dans un système subissant un retrait. Dans un second temps, nous avons tenté de faire fonctionner ce modèle et de confronter les résultats aux données obtenues expérimentalement.

5.3.1. Modèle de Fissuration

Nous allons admettre qu'un mélange binaire d'un squelette et d'une pâte argileuse après malaxage peut être schématisé par un assemblage de sphères de rayon R dont les centres sont disposés au sommet d'un cube à l'intérieur d'une phase continue d'argile et qui ne sont pas tangentes les unes aux autres (figure 37).



③⑦ MODELE DE RETRAIT AVEC FISSURATION

Les travaux de TESSIER (1975) sur le retrait des pâtes argileuses soumises à des pressions pneumatiques ont montré que la perte en eau des échantillons s'accompagnait d'un retrait anisotrope de la phase argileuse. Les observations sur lames minces de nos mélanges après dessiccation ont révélé une orientation des lacunes suggérant à priori une anisotropie acquise au cours de la dessiccation dans un matériau jugé isotrope dans son état initial.

Dans le modèle que nous proposons, nous avons admis alors que le retrait de la phase argileuse s'effectuait selon une seule direction, ici la direction OY.

Considérons une des sphères, repérée dans le plan diamétral par rapport à deux axes orthogonaux OX et OY : figure (37).

Si L est la distance initiale entre les centres des deux sphères, $\frac{L}{2}$ représente alors la distance du centre d'une sphère aux deux demi-axes.

Nous allons maintenant admettre pour la commodité de calcul que s'il y a fissuration, cette dernière se produit à égale distance entre deux sphères, dans la phase argileuse.

Enfin, si l est la distance entre deux points pris dans la phase argileuse à l'humidité W_1 sur une parallèle à la direction OY, et l' la distance entre ces deux points quand la phase argileuse est à l'humidité W_2 telle que $W_2 < W_1$, on définit le retrait par la relation suivante :

$$r = \frac{l - l'}{l} \quad (20)$$

Si nous imaginons un retrait de la phase argileuse dans le modèle représenté à la figure (37), deux domaines distincts sont à considérer.

Dans la partie occupée uniquement par la phase argileuse, le retrait va affecter une épaisseur d'argile égale à $\frac{L}{2}$. De la relation (20) nous pouvons déduire qu'après retrait l'épaisseur de la phase argileuse est égale à :

$$l' = (1 - r) \cdot l$$

soit, en remplaçant l par sa valeur :

$$l' = (1 - r) \frac{L}{2}$$

Ainsi, une ligne de fissure d'ordonnée $\frac{L}{2}$ se retrouve, après un retrait r , située sur une parallèle à l'abscisse d'ordonnée, $(1 - r) \frac{L}{2}$.

Dans le domaine où le squelette est présent, l'épaisseur initiale de la phase argileuse est variable selon l'abscisse du point considéré. Quand x , varie de 0 à R , l'épaisseur d'argile croit de $\frac{L}{2} - R$ à $\frac{L}{2}$. En fonction de x , l'épaisseur initiale de la phase argileuse, entre les deux limites considérées à comme expression :

$$l = \frac{L}{2} - \sqrt{R^2 - x^2}$$

Après retrait, l'expression générale de l' est alors :

$$l' = (1 - r) \left(\frac{L}{2} - \sqrt{R^2 - x^2} \right)$$

Dans ce domaine, la ligne de fissure d'ordonnée initiale égale à $\frac{L}{2}$ ne se retrouve plus sur une parallèle à l'axe O X.

Cette différence de comportement entre les deux domaines est à notre avis une des conditions d'apparition de lacunes dans la phase argileuse. En effet, en admettant même que les points de la phase argileuse situés à l'aplomb des centres des sphères ne sont pas traversés par la fissure, le retrait affectant des épaisseurs variées d'argile entraîne l'apparition de lacunes, ce que nous avons illustré sur la figure (37).

5.3.2. Remarques

Ce modèle de fissuration fonctionne dès que dans le mélange initial il se produit une perte d'eau. Or les résultats obtenus sur les mélanges de billes 160-200 μ et d'argile HB, montrent qu'il existe un domaine dans lequel la dessiccation n'entraîne pas d'apparition de fissure, la phase argileuse restant continue. Ceci suggère qu'au cours de la dessiccation des transferts de phase argileuse s'opèrent. Quand ces transferts ne peuvent plus se réaliser des fissures apparaissent alors.

Quantitativement, nous envisagerons le fonctionnement de ce modèle à partir d'une teneur en eau, que nous appellerons W_i , pour laquelle la phase argileuse cesse d'être continue, valeur qui doit être définie expérimentalement.

La limite de ce modèle correspond à la teneur en eau pour laquelle la variation de volume de la phase argileuse cesse d'être égale à la perte en eau. Cette limite doit elle aussi être déterminée expérimentalement. C'est à l'intérieur des limites que nous venons de définir que nous allons calculer des courbes de retrait, que nous confronterons à celles que nous avons obtenues.

5.4. Courbes théoriques de retrait avec fissuration

5.4.1. Position du problème.

Le volume massique d'un matériau représente le volume qu'encombre 1 gramme de ce matériau. Ce volume est calculé en faisant le rapport du volume mesuré à la masse de l'objet. Nous l'appellerons U .

Dans le cas d'un matériau terreux saturé en eau, le volume massique est la somme du volume solide et du volume d'eau.

Soit ρ_s la masse volumique de solide et $\frac{W}{100}$ la teneur en eau d'1 gramme de solide, le volume massique U a comme définition :

$$U = \frac{1}{\rho_s} + \frac{W}{100}$$

Dans cette expression $\frac{1}{\rho_s}$ représente le volume occupé par 1 gramme de solide.

La représentation graphique de la variation de U en fonction de W (HAINES 1925 - PELTIER 1959) est une parallèle à la première bissectrice dont l'ordonnée à l'origine dépend de la constitution minéralogique de matériau, caractérisée par la valeur de ρ_s (figure 38).

Ces auteurs ont admis par ailleurs qu'à partir d'une certaine teneur en eau, appelée limite de retrait, la perte en eau n'était accompagnée d'aucun changement du volume encombré par l'échantillon.

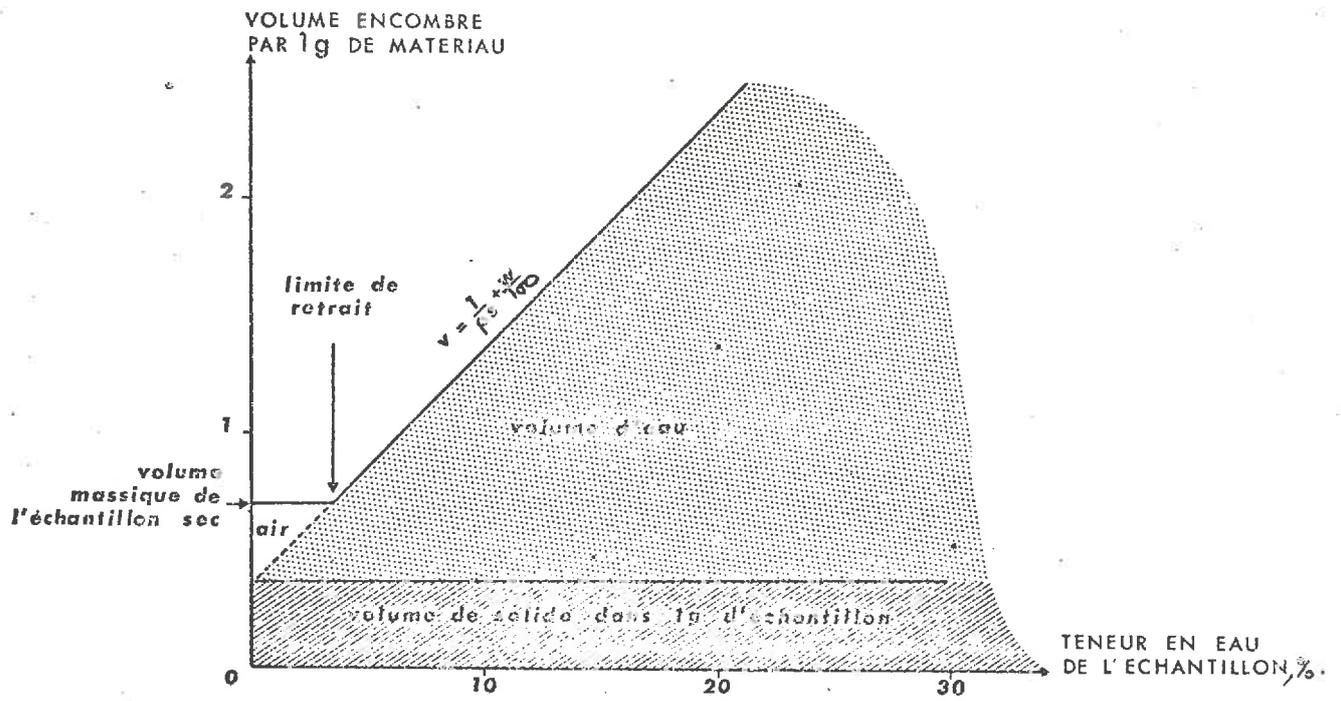
En pratique, connaissant la valeur de v de l'échantillon sec, la construction d'une parallèle à l'axe des abscisses passant par cette valeur permettrait de déterminer la limite de retrait (figure 38).

Nous avons vérifié expérimentalement qu'une partie des variations de v correspondait à la relation $v = \frac{1}{\rho^3} + \frac{W}{100}$. La figure (39) illustre cette variation dans le cas de l'argile HB. C'est également le cas pour les mélanges d'argile et de microbilles dont nous avons étudié le retrait, tant qu'ils vérifient la loi de substitution. Cependant, à partir d'une certaine teneur en eau, la diminution de volume de l'échantillon liée au départ d'eau devient inférieure au volume d'eau perdu. C'est ce qui apparaît au voisinage de 20 p.cent de teneur en eau pour l'argile HB (figure 39). Nous avons également représenté les variations de v dans ce domaine avec deux mélanges d'argile et de microbilles (figures 40 et 41). Les valeurs expérimentales obtenues ne se disposent pas ici selon une parallèle à l'axe des abscisses. On ne peut donc pas parler de limite de retrait et la représentation de HAINES apparaît dans ce domaine comme une première approximation.

Nous allons envisager dans quelle mesure un modèle de fissuration permettrait d'améliorer la prévision du retrait d'un échantillon à partir du moment où, la phase argileuse cessant d'être continue, il apparaît une porosité lacunaire.

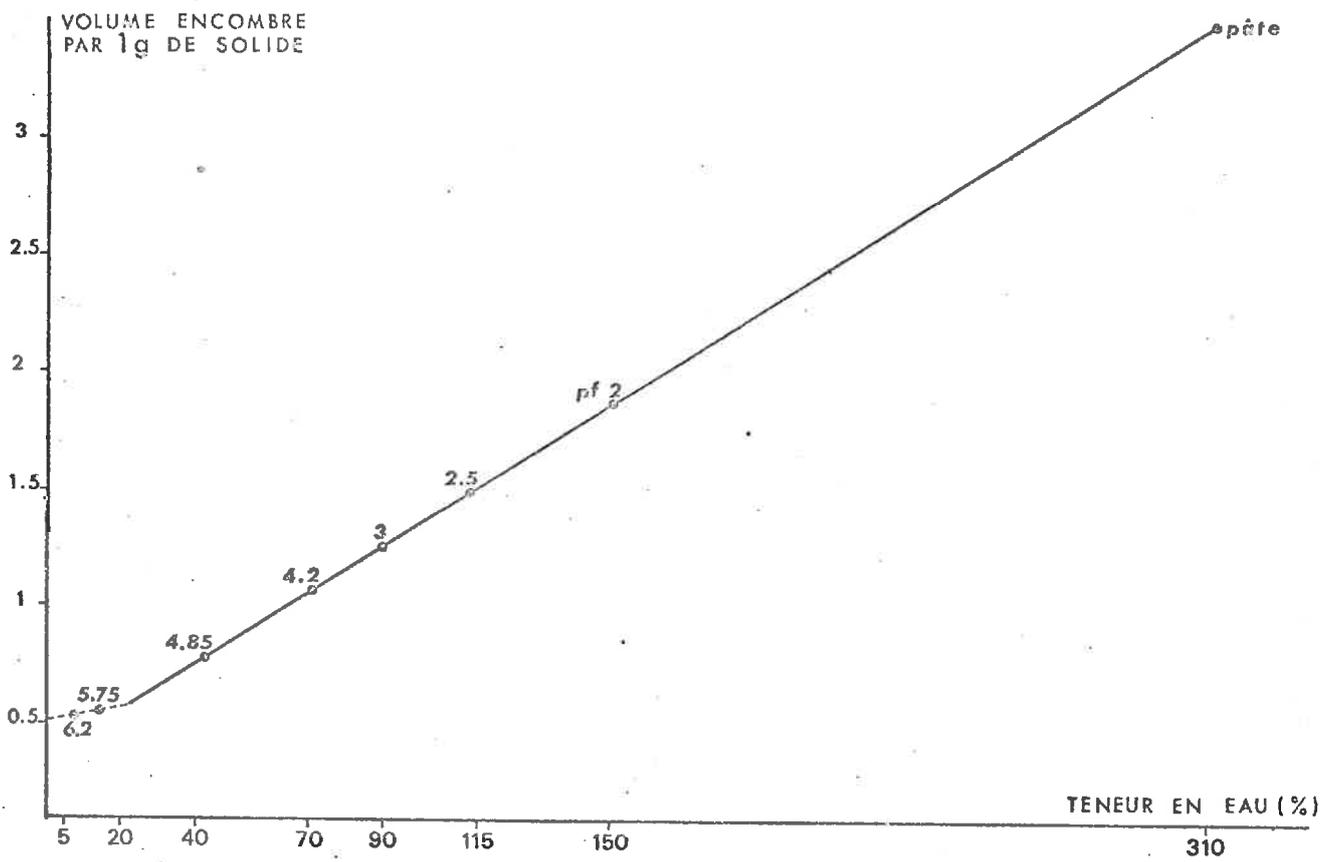
5.4.2. Principe du calcul du volume massique dans le modèle de retrait avec fissuration.

Dans le modèle de retrait avec fissuration tel que nous l'avons envisagé, la variation du volume encombré est directement fonction de la variation d'épaisseur de la phase argileuse à l'endroit où la distance entre particules du squelette est la plus faible. Comme nous avons envisagé le retrait dans la seule direction



③ COURBE DE RETRAIT THEORIQUE D'UN ECHANTILLON TERREUX (d'après HAINES)

COURBE DE RETRAIT DE L'ARGILE H.B. Ca⁺⁺ (39)



O Y, c'est la plus petite distance entre sphères, dans cette direction qu'il convient tout d'abord de définir. Nous appellerons d cette plus petite distance dans une direction donnée.

Considérons sur la figure (42) une section d'un volume élémentaire choisi dans un assemblage de sphères et d'argile, telles que les sphères soient centrées au sommet d'un cube et séparées les unes des autres par la phase argileuse. Cette section, réalisée parallèlement à la direction du retrait, passe par les centres de deux sphères.

Avant retrait, le volume élémentaire v a comme expression :

$$v = a^2 \cdot h$$

si a^2 est la surface de base et h la hauteur du volume considéré.

Soit d la plus petite épaisseur d'argile dans ce volume qui subisse un retrait. Après retrait, d est devenu d' tel que $d' < d$

Par définition en α :

$$\alpha = \frac{d - d'}{d}$$

On tire de cette relation que $\Delta d = \alpha \cdot d$.

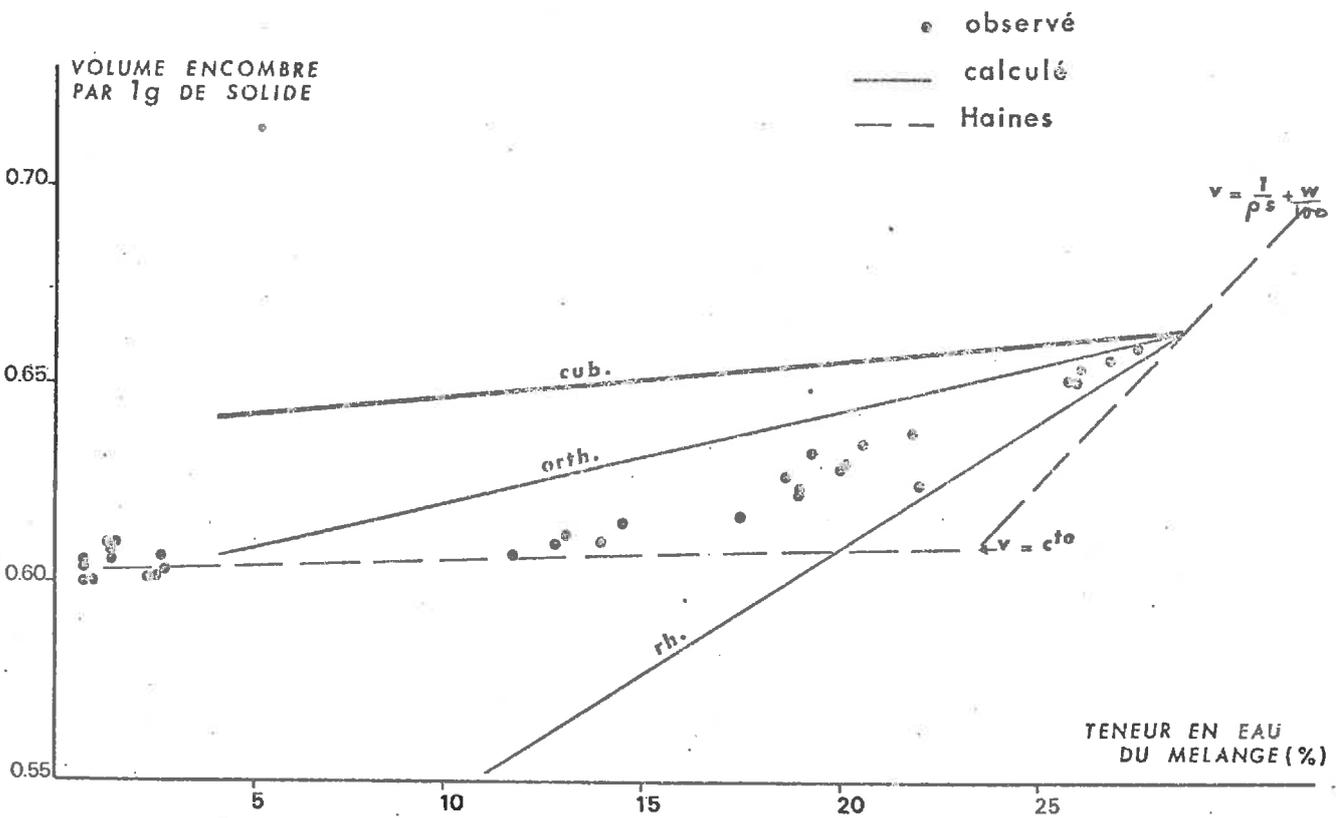
Le volume élémentaire a alors comme expression, après retrait :

$$v = a^2 (h - \Delta d)$$

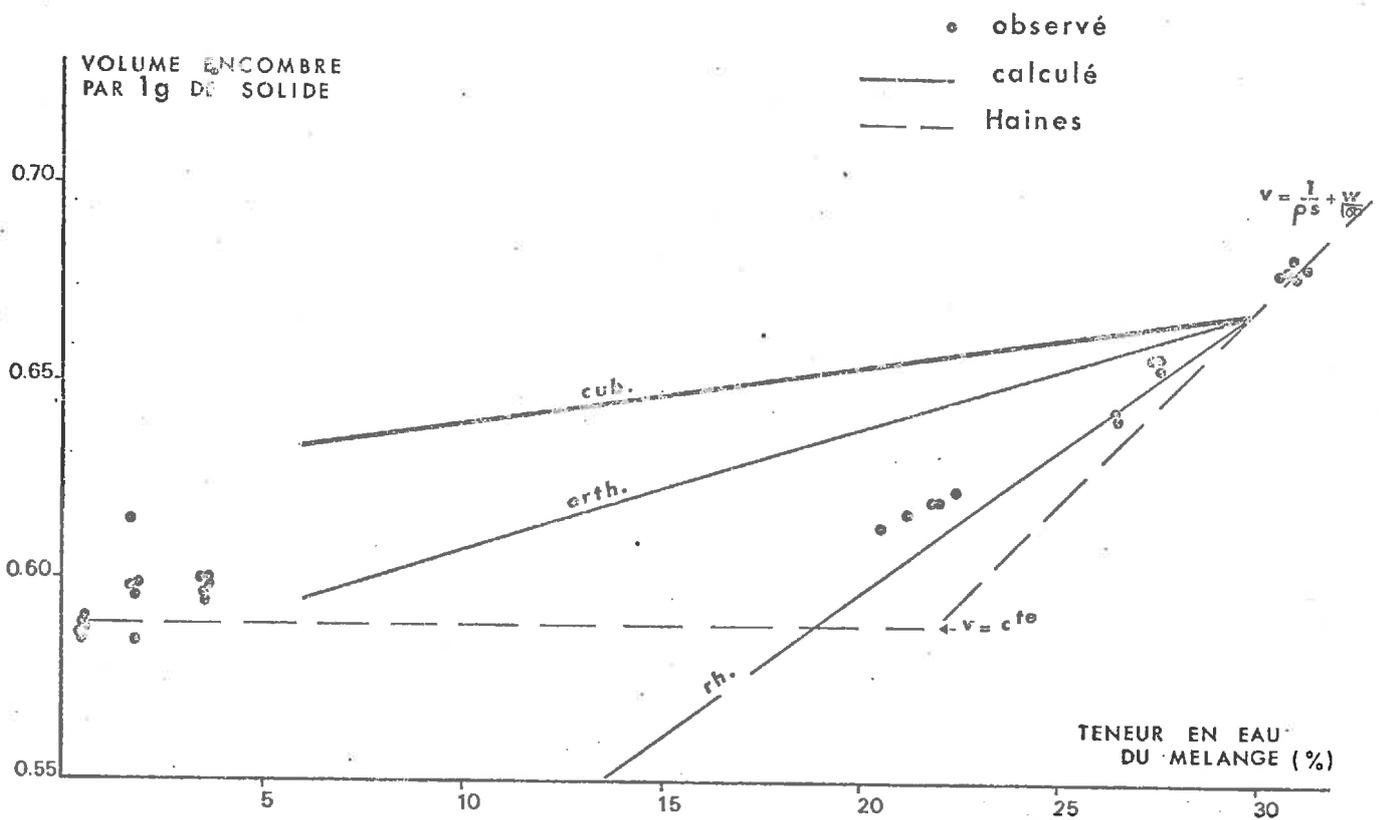
soit :

$$v = a^2 (h - \alpha \cdot d)$$

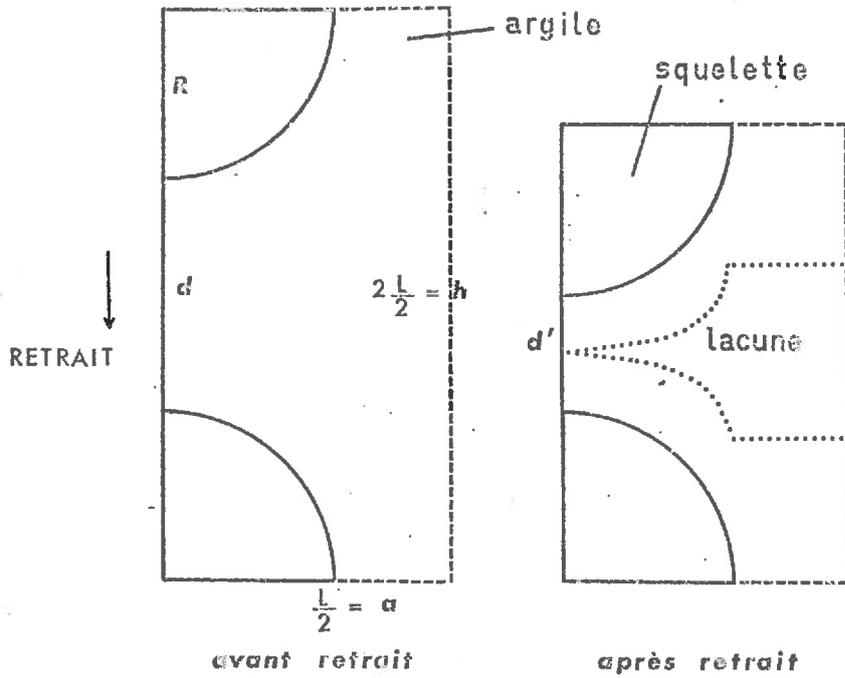
40 COURBE DE RETRAIT DU MELANGE ARGILE H.B. 20 p. cent - MICROBILLES 160 - 200 μ



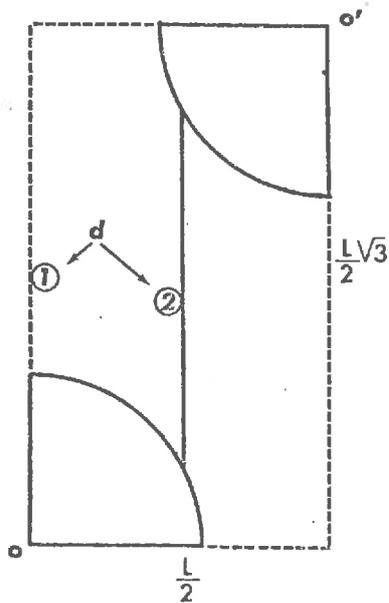
④1 COURBE DE RETRAIT DU MELANGE ARGILE H.E. 30 p.cent - MICROBILLES 160-200 μ



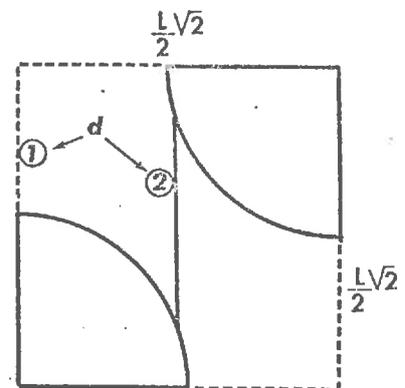
④2 TROIS CAS D'ORGANISATION DU SQUELETTE DANS UNE PATE ARGILEUSE.



Ⓐ ORGANISATION CUBIQUE



Ⓑ ORGANISATION ORTHORHOMBIQUE



Ⓒ ORGANISATION RHOMBOEDRIQUE

Pour définir le volume massique d'un tel système nous appellerons v^s , le volume de solide du squelette et nous pourrions alors écrire :

- le volume encombré par un volume de solide de squelette de 1 cm^3 est égal à $\frac{v}{v^s}$

- dans 1 g de mélange, le volume de solide de squelette est égal à $\frac{S}{100 \rho_s^s}$

- le volume encombré par 1 g de mélange est alors égal à $\frac{v}{v^s} \cdot \frac{S}{100 \rho_s^s}$

Soit, en remplaçant v par la valeur que nous avons déjà définie :

$$U = \frac{a^2 (h - r_d)}{v^s} \cdot \frac{S}{100 \rho_s^s}$$

Nous allons maintenant exprimer le retrait en fonction de la variation de teneur en eau de la phase argileuse. Nous avons admis que le retrait s'effectuait dans une seule direction. Si nous considérons un volume géométrique dans la phase argileuse, la modification de volume liée au départ d'eau correspond à la modification d'une seule de ses trois dimensions.

Dans ce cas le retrait volumique à la même expression qu'un retrait linéaire.

Le volume massique de la phase argileuse avant retrait et après retrait étant respectivement égal à U^a et U'^a , l'expression du retrait est :

$$r = \frac{U^a - U'^a}{U^a}$$

Dans le cas où la variation de volume de la phase argileuse est égale à la perte en eau, et seulement dans ce cas, on peut écrire :

$$U^a = \frac{1}{\rho_s^a} + \frac{W_i}{A} \quad \text{et} \quad U'^a = \frac{1}{\rho_s^a} + \frac{W}{A}$$

Dans ces deux expressions, W_i et W sont respectivement la teneur pondérale en eau de l'échantillon au point d'apparition des lacunes et une teneur quelconque inférieure à W_i et vérifiant la condition d'application de l'expression donnée à r :

Les rapports $\frac{W_i}{A}$ et $\frac{W}{A}$ représentent donc la teneur en eau rapportée à 1 g de phase argileuse, si nous admettons que la rétention en eau propre au squelette est négligeable.

Après simplification, le retrait de la phase argileuse a maintenant une expression :

$$r = \frac{W_i - W}{\frac{A}{\rho_s^a} + W_i} \quad (20')$$

L'expression de volume massique du mélange à l'humidité W devient alors, en remplaçant Γ par la valeur que nous avons calculée :

$$U = \frac{S}{100 \rho_s^s} \frac{a^2}{v^s} \left(h - d \frac{W_i}{\frac{A}{\rho_s^a} + W_i} \right) + \frac{S}{100 \rho_s^s} \frac{a^2}{v^s} \cdot d \frac{W}{\frac{A}{\rho_s^a} + W_i} \quad (21)$$

Selon le modèle proposé, le volume massique va donc décroître nécessairement en fonction de la diminution de la teneur en eau du mélange. Il nous reste maintenant, à exprimer les paramètres du volume élémentaire. Compte tenu de l'influence, déterminante du paramètre d sur la valeur de U , nous considérerons trois types d'organisation initiale du squelette (figure 42), que nous avons appelé respectivement :

- cubique
- orthorhombique
- rhomboédrique

5.4.3. Etude de trois cas de figure pour l'arrangement des grains du squelette dans la pâte argileuse.

5.4.3.1. Organisation cubique

Les sphères de rayon R , ont leurs centres disposés sur les sommets d'un cube à une distance d les uns des autres

Si $2 \frac{L}{2}$ est la distance entre les centres des sphères (figure 42 a), d s'écrit :

$$d = 2 \left(\frac{L}{2} - R \right)$$

Après simplification, le volume élémentaire est égal à :

$$v = \left(\frac{L}{2} \right)^2 \cdot 2 \left(\frac{L}{2} - \left[\frac{L}{2} - R \right] \right)$$

Il est possible de définir la quantité $\frac{L}{2}$ en fonction de R et de la porosité matricielle à l'état initial en reprenant une démarche similaire à celle déjà utilisée pour le calcul du modèle de sphères enrobées.

Si Π est la porosité d'assemblage d'une sphère enrobée de volume v_e^s et Π_M la porosité matricielle propre à la sphère non enrobée de volume v^s dans un même volume v , on peut écrire :

$$\Pi = 1 - \frac{v_e^s}{v}$$

$$\Pi_M = 1 - \frac{v^s}{v}$$

D'où l'on tire

$$v_e^s = v^s \frac{1 - \Pi}{1 - \Pi_M}$$

Dans le volume élémentaire, en remplaçant v_e^s par sa valeur, on peut écrire :

$$v_e^s = \frac{\pi}{3} R^3 \frac{1 - \Pi}{1 - \Pi_M}$$

car le volume élémentaire ne contient que l'équivalent d'un quart de sphère.

Par ailleurs, dans ce même volume élémentaire, le volume d'un quart de sphère enrobée a aussi comme expression :

$$v_e^s = \frac{\pi}{3} \cdot \left(\frac{L}{2}\right)^3$$

De ces deux expressions équivalentes on tire après simplification la valeur de $\frac{L}{2}$:

$$\frac{L}{2} = R \left(\frac{1 - \Pi}{1 - \Pi_M} \right)^{\frac{1}{3}}$$

La porosité d'assemblage de sphère enrobée, dans l'arrangement cubique peut être calculée en considérant la porosité d'une sphère de rayon unitaire inscrite dans un cube. Après simplification il vient :

$$\Pi = 1 - \frac{\pi}{6}$$

En remplaçant Π par cette nouvelle valeur dans l'expression de $\frac{L}{2}$ on obtient, après simplification :

$$\frac{L}{2} = R \left(\frac{\pi}{6(1 - \Pi_M)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

5.4.3.2. Organisation orthorhombique

Le volume élémentaire est à base carrée de côté $\frac{L}{2}$ et de hauteur $\frac{L}{2} \sqrt{3}$ (figure 42 b). Nous considérerons uniquement le cas où le côté est tel que $\frac{L}{2} - 2R < 0$. Ceci correspond à un rapprochement suffisant des sphères centrées en O et O' pour calculer des porosités matricielles dont les valeurs sont celles des mélanges de billes que nous considérerons.

Nous allons maintenant chercher à définir la plus petite épaisseur d'argile qui sera affectée par le retrait vertical.

Compte tenu de la disposition des sphères centrées en O et O' dans le volume élémentaire, deux cas de figure doivent être considérés selon la valeur donnée au côté $\frac{L}{2}$.

Le calcul exposé en annexe conduit aux conclusions suivantes :

- d doit être calculé en position 1 quand $\frac{L}{2}$ est supérieur à $R\sqrt{3}$

- d doit être calculé en position 2 quand $\frac{L}{2}$ est inférieur à $R\sqrt{3}$

Dans ce dernier cas, le calcul montre que l'abscisse de la plus petite distance entre les sphères centrées en O et O' est $\frac{L}{4}$, c'est à dire le milieu du côté de la base du volume élémentaire. En position 1, d a pour expression :

$$d = \frac{L}{2}\sqrt{3} - R$$

Le volume élémentaire est alors :

$$v = \left(\frac{L}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{L}{2}\sqrt{3} - \left(\frac{L}{2}\sqrt{3} - R\right)\right)$$

En position 2, l'expression de d est :

$$d = \frac{L}{2}\sqrt{3} - 2\sqrt{R^2 - \frac{L^2}{16}}$$

et le volume élémentaire devient :

$$v = \left(\frac{L}{2}\right)^2 \cdot \left(\frac{L}{2}\sqrt{3} - \left(\frac{L}{2}\sqrt{3} - 2\sqrt{R^2 - \frac{L^2}{16}}\right)\right)$$

Dans ce volume le volume des sphères est équivalent à celui d'un quart de sphère.

La porosité de sphère enrobée en arrangement orthorhombique se calcule en tenant compte du fait que la distance $0\ 0'$ des sphères de rayon unitaire est égal à $\sqrt{3}$. La porosité est alors égale à :

$$\Pi = 1 - \frac{\pi}{\sqrt{3}}$$

Le côté de la base du volume élémentaire s'écrit alors :

$$\frac{L}{2} = R \left(\frac{\pi}{3\sqrt{3} \cdot (1 - \Pi_M)} \right)^{\frac{4}{3}}$$

5.4.3.3. Organisation rhomboédrique.

Le volume élémentaire a pour base un carré de côté égal à $\frac{L}{2}$ et une hauteur de $\frac{L}{2} \sqrt{2}$.

On a représenté sur la figure (42 c) la disposition des sphères dans le plan parallèle à la direction du retrait et passant par une diagonale du carré de base, diagonale dont la valeur est $\frac{L}{2} \sqrt{2}$.

Comme pour le cas précédent, nous nous plaçons dans les conditions où la valeur de la diagonale du carré de base est telle que $\frac{L}{2} \sqrt{2} - 2R < 0$.

Deux valeurs de d , selon la position retenue, peuvent être envisagées. Nous en présentons le calcul en annexe. La distance d sera calculée en position 1 quand $\frac{L}{2}$ est supérieur à $R\sqrt{\frac{3}{2}}$ et en position 2 quand $\frac{L}{2}$ est inférieur à $R\sqrt{\frac{3}{2}}$.

En position 1, d a pour expression :

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{2} - R$$

Le volume élémentaire est alors égal à :

$$v = \left(\frac{L}{2}\right)^2 \left(\frac{L}{2} \sqrt{2} - R \left(\frac{L}{2} \sqrt{2} - R \right) \right)$$

En position 2, d calculé à l'abscisse $\frac{L\sqrt{2}}{4}$ a comme expression :

$$d = \frac{L}{2} \sqrt{2} - 2\sqrt{R^2 - \frac{L^2}{8}}$$

Le volume élémentaire s'écrit alors comme suit :

$$v = \left(\frac{L}{2}\right)^2 \left(\frac{L}{2} \sqrt{2} - R \left(\frac{L}{2} \sqrt{2} - 2\sqrt{R^2 - \frac{L^2}{8}} \right) \right)$$

Dans ce volume, le volume des sphères est équivalent à un quart de sphère.

La porosité de sphère enrobée est ici égale à :

$$\Pi = 1 - \frac{\pi}{3\sqrt{2}}$$

Le terme $\frac{L}{2}$ a pour expression :

$$\frac{L}{2} = R \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2} (1 - \Pi_M)} \right)^{\frac{1}{3}}$$

5.4.3.4. Expressions du volume massique

L'expression du volume massique d'un échantillon (relation 21) peut alors s'écrire sous la forme suivante, en remplaçant les paramètres des volumes élémentaires par les valeurs que nous avons calculées, et après simplification :

$$v = \frac{S}{\rho_s^s} \left(\frac{1}{1 - n_M} - C \cdot \frac{W_i}{\frac{A}{a} + W_i} \right) + \frac{S}{\rho_s^s} \cdot C \cdot \frac{W}{\frac{A}{a} + W_i}$$

Dans cette expression générale, C sera calculé selon le mode d'arrangement considéré, avec l'une des expressions du tableau suivant :

arrangement initial	d	C
cubique	-	$\frac{1}{1 - n_M} - \frac{6}{\pi} \left(\frac{\pi}{6(1 - n_M)} \right)^{\frac{2}{3}}$
orthorhombique	1	$\frac{1}{1 - n_M} - \frac{3}{\pi} \left(\frac{\pi}{3\sqrt{3}(1 - n_M)} \right)^{\frac{2}{3}}$
	2	$\frac{1}{1 - n_M} - \frac{6}{\pi} \left(\frac{\pi}{3\sqrt{3}(1 - n_M)} \right)^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{1}{4} \left(\frac{\pi}{3\sqrt{3}(1 - n_M)} \right)^{\frac{2}{3}} \right)$
rhomboédrique	1	$\frac{1}{1 - n_M} - \frac{3}{\pi} \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}(1 - n_M)} \right)^{\frac{2}{3}}$
	2	$\frac{1}{1 - n_M} - \frac{6}{\pi} \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}(1 - n_M)} \right)^{\frac{2}{3}} \left(1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi}{3\sqrt{2}(1 - n_M)} \right)^{\frac{2}{3}} \right)^{\frac{1}{2}}$

5.4.4. Confrontation aux résultats expérimentaux

On ne peut à partir du seul modèle géométrique déterminer le seuil de teneur en eau W_i à partir duquel une fissuration se manifeste dans un mélange argile-squelette. Nous avons eu recours aux courbes expérimentales obtenues avec les mélanges argile HB microbilles 160 - 200 μ pour intrapoler la valeur de W_i dans chaque cas. Pour cela nous avons préféré, à la représentation de HAINES (figure 38), porter le terme $(v) + v_d + \frac{100}{W}$ en fonction de W , v_d représentant le volume massique mesuré après séchage de l'échantillon à 105° C.

Dans cette représentation, le domaine où la phase argileuse est une phase continue se traduit par un parallèle à l'axe des abscisses.

Parmi les courbes de retrait obtenues sur les mélanges argile HB microbilles 160 - 200 μ , seules les courbes correspondant aux teneurs en argile de 20 et 30 p.cent ont permis une intrapolation de W_i . Le tableau 22 rassemble les valeurs numériques utilisées pour le calcul des volumes massiques et les équations des droites obtenues.

Les figures 40 et 41 permettent de situer ces droites par rapport aux points expérimentaux. On peut constater que si l'hypothèse d'organisation cubique conduit à des valeurs trop élevées du volume massique les hypothèses orthorhombique et rhomboédrique permettent d'encadrer les résultats expérimentaux, pour les deux mélanges concernés.

Ceci suggère qu'un meilleur ajustement aux courbes expérimentales serait possible par une pondération entre ces deux derniers types d'organisation.

Enfin, par rapport au modèle de HAINES, le modèle de retrait avec fissuration représente déjà une meilleure approximation de l'allure générale du phénomène de retrait.

5.4.5. Conclusions.

Nous avons présenté un modèle de retrait au niveau textural. Ce modèle permet d'expliquer l'apparition de lacunes dans la phase argileuse au cours du dessèchement de l'échantillon. Il rend compte également de la forme générale des courbes de retrait dans le domaine où le matériau n'est plus saturé en eau. Ce modèle est cohérent avec la disposition en revêtement autour des grains du squelette que nous avons constatées sur les mélanges après séchage.

Enfin, il permet de soulever un certain nombre de questions et de suggérer des développements. En effet, la dimension des sphères représentant les grains du squelette n'intervient pas sur la valeur calculée du volume massique. Pourtant, les porosités obtenues sur des mélanges à squelettes limoneux ont des valeurs différentes de celles observées sur les mélanges à squelette sableux, à même teneur en argile.

Une partie de cette différence pourrait être liée à l'arrangement initial du squelette, dont le modèle fait apparaître l'influence. Cet arrangement pourrait être différent d'un squelette à l'autre selon la distribution dimensionnelle des particules.

Cependant, ceci n'explique pas les différences constatées entre les porosités de mélanges dont les squelettes présentent des distributions dimensionnelles voisines mais dont les diamètres sont différents.

Pour 100 g. de mélange			
Teneur en argile		20	30
W_i		29	29,7
n_M		54,56	60,53
Limite de la teneur en eau pour le calcul du retrait de la phase argileuse.		4,10	6,15
Arrangement initial			
cubique $n_M > 47,60\%$	$v = 0,0845 \frac{W}{100} + 0,6375$ d en position 2	$v = 0,1486 \frac{W}{100} + 0,6229$	
orthorhombique $n_M > 39,54\%$	$v = 0,2257 \frac{W}{100} + 0,5966$ d en position 2	$v = 0,2998 \frac{W}{100} + 0,5780$ d en position 2	
rhomboedrique $n_M > 25,95\%$	$v = 0,6111 \frac{W}{100} + 0,4848$ d en position 2	$v = 0,7049 \frac{W}{100} + 0,4577$ d en position 1	

TABEAU 22 : VALEUR NUMERIQUE DES PARAMETRES ET EQUATION DES DROITES DE RETRAIT THEORIQUE.

Il reste aussi à considérer le déterminisme de W_i , humidité à laquelle apparaissent les lacunes.

Il est certain que ce paramètre intègre des caractéristiques de la pâte argileuse et les conditions qui lui sont imposées par le ressuyage et le squelette auquel elle est associée.

Des développements de ce modèle ont été réalisés dans le cadre de l'étude de la fissuration de matériaux terreux. Ils portent sur la prise en compte de la déformation du volume élémentaire à partir de l'humidité de malaxage et sur l'introduction d'un retrait se manifestant dans trois directions de l'espace (STENGEL 1978).

Dans la partie des courbes de retrait pour laquelle l'humidité est supérieure à W_i l'absence de lacune dans la phase argileuse implique, pour le modèle, qu'il y ait un flux compensateur d'argile depuis la zone de plus petite distance entre grains vers la zone où cette distance est très grande. Il semble que la valeur de W_i pourrait être liée aux conditions de flux des particules argileuses et aux variations des propriétés mécaniques de l'argile au fur et à mesure du départ de l'eau (STENGEL 1978).

6. GENERALISATION DE LA NOTION DE POROSITE TEXTURALE.

L'idée qui préside à ce dernier paragraphe est celle de la généralisation de la notion de déterminisme textural de la porosité des sols.

Nous avons vu que la dépendance entre porosité et composition élémentaire recouvre non seulement des effets d'origine stérique mais également des interactions liées au départ de l'eau quand on passe de l'échantillon malaxé à l'échantillon sec. On peut penser à priori que dans ces interactions, la part de l'histoire hydrique extérieure au système soit faible devant celle imposée par la texture du matériau. Ceci nous a conduit à rechercher s'il existait une relation entre la densité texturale mesurée à la suite d'un processus de préparation donné et la densité texturale du même matériau pris en place.

Une série de résultats conforte la possibilité d'une telle démarche.

Ainsi, STENGEL (1976) a montré sur un sol de limon de la région de Boigneville que des variations naturelles de la teneur en argile allant de 20 à 30 p.cent, entraînaient un accroissement de la densité mesurée sur agglomérat secs naturels. Or, comme le montre la figure (43) dans le même intervalle de teneur en argile, le mélange artificiel argile HB - limon 2 - 50 μ , présente une même allure de variation de sa densité. Un tel parallélisme est d'autant plus significatif que sur le plan minéralogique il s'agit vraisemblablement des mêmes minéraux argileux et des mêmes limons.

On peut constater également que les mesures sur agglomérats naturels portent sur deux années consécutives mais ne font pas apparaître de différence significative entre les valeurs de \bar{Y}_d pour une même teneur en argile. Cette constance est encore un argument en faveur de l'importance de la texture, quant au déterminisme de la densité d'un matériau par rapport aux conditions hydriques variées induites par le climat local.

6.1. Méthode d'étude.

6.1.1. Choix des matériaux.

Une grande partie des échantillons naturels a été sélectionnée sur la base des données fournies par la carte pédologique de la vallée du Rhône établie par BORNAND et GUYON (1969). On lui a joint des échantillons de sols déjà utilisés comme matériaux de référence au laboratoire. Le prélèvement d'échantillons d'un volume voisin du litre a été effectué en évitant tout tassement. Les échantillons cohérents ont été, après ajustement, introduits dans des boîtes métalliques. Les échantillons sableux ont, avant d'être dégagés, été scellés en place à l'aide de paraffine, dans des anneaux de 20 cm de diamètre et de 15 cm de hauteur.

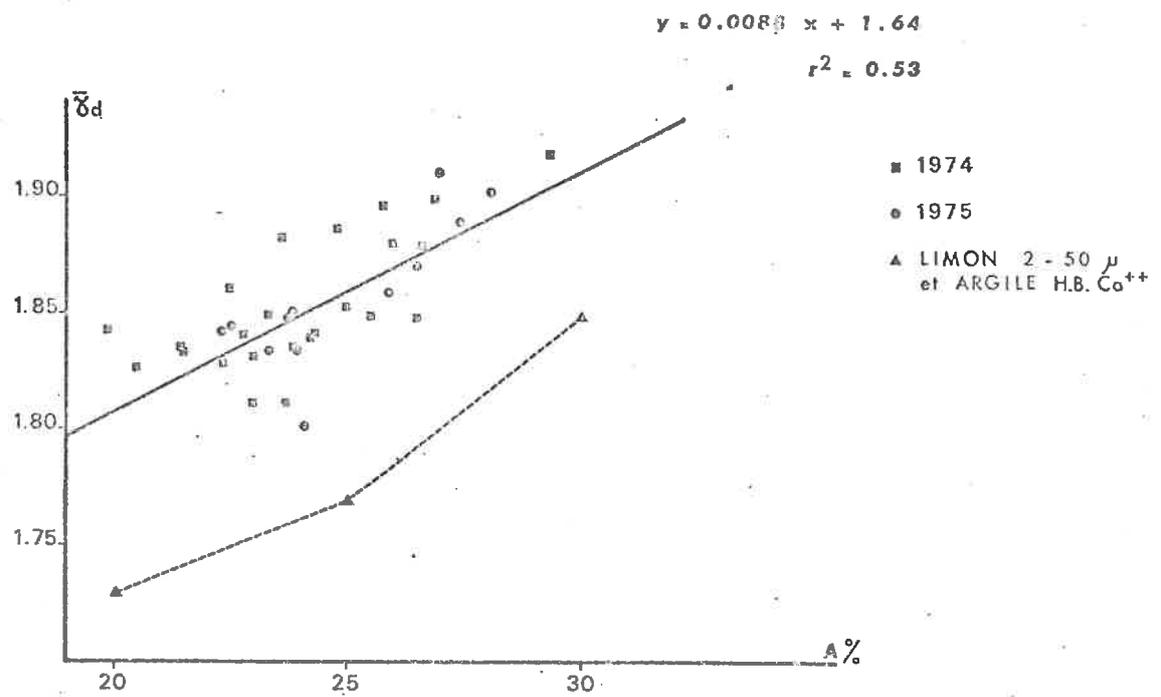
Ces échantillons ont ensuite été séchés à l'atmosphère du laboratoire.

L'ensemble représente 22 types de matériaux différents dont les granulométries sont présentées au tableau (23). On peut constater, figure (44) que ces matériaux représentent un échantillonnage assez large des textures. Ils ont pour caractéristiques d'avoir été prélevé à des profondeurs supérieures à 50 cm afin de pallier à d'éventuels effets de tassement de surface. Par ailleurs leur rapport 100 MO/A est inférieur à 10 afin de minimiser l'importance d'un effet matière organique sur la porosité. Pour la même raison, seuls des sols où la teneur en carbonates est inférieure à 30 p.cent (GUERIF 74) ont été retenus.

6.1.2. Estimation de la densité texturale des échantillons naturels.

Nous retrouvons ici le problème du choix du niveau de mesure évoqué au début de ce chapitre. Comme le montre la figure (45)

INFLUENCE DE LA TENEUR EN ARGILE SUR LA DENSITE D'AGGLOMERATS (43)
 TERREUX NATURELS (d'après STENDEL 1978)



Désignation	Granulométrie %					M.O. %	CO ₃ Ca total %	\bar{Y}_d Ech.nat.	\bar{Y}_d Ech. remaniés	
	A	l	L	s	S				1	2
	11	8,0	16,9	40,0	30,2				4,9	ε
16	41,3	15,6	13,1	13,6	15,1	1,27	0	1,941	1,992	-
55 ₁	12,8	16,5	41,2	17,8	11,4	0,74	ε	1,689	1,809	1,760
55 ₂	24,8	19,9	35,5	14,0	5,8	ε	ε	1,810	1,884	1,882
55 ₃	31,5	15,5	33,5	7,0	12,5	ε	0	1,793	1,919	1,918
75	27,4	24,6	34,5	11,7	1,8	ε	0	1,734	1,845	1,827
102	30,1	16,6	13,7	13,8	25,8	ε	0	1,769*	1,866	1,848
116	50,0	16,5	25,9	5,5	2,1	ε	0	2,007**	1,992	2,042
118	16,7	10,9	38,3	30,0	2,9	1,00	11	1,593	1,755	1,707
128	11,5	21,5	43,7	16,1	7,2	0,64	0	1,741	1,831	1,755
129 ₁	17,3	6,8	35,7	22,4	16,9	0,95	2,5	1,756	1,859	1,787
129 ₂	33,0	24,4	24,5	11,0	7,1	ε	0	1,864	1,873	1,912
131 ₁	12,8	0,3	16,0	3,0	67,2	0,74	0	1,664*	1,808	1,740
131 ₂	5,4	2,8	3,0	12,8	76,0	ε	0	1,695**	1,860	1,825
145 ₁	8,6	4,7	10,5	28,2	46,3	0,53	0	1,711*	1,800	-
145 ₂	10,3	9,5	6,9	18,0	55,4	ε	0	1,735*	1,817	1,825
Vig.	51,2	29,2	6,9	10,6	2,1	1,25	26,9	1,964	2,006	2,014
St.Au	20,6	38,3	33,3	5,0	2,8	2,1	ε	1,719	1,728	1,717
Sar.	13,0	28,0	43,4	11,4	4,2	1,3	ε	1,670	1,644	1,626
Boi.	28,0	31,0	33,0	6,0	1,5	1,8	0	1,853	1,835	1,808
HB	28,5	24,0	45,0	1,5	0,5	0,5	0	1,792	1,811	1,808
Rh.	22,5	25,6	42,9	6,1	3,1	0,1	0	1,740	1,727	-

1 Ressuyage standard

2 Ressuyage modulé

* * mesuré au niveau agglomérat 2-1,25 mm

* mesuré au niveau motte de 15 cm³

TABLEAU 23. CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX NATURELS PRELEVES.

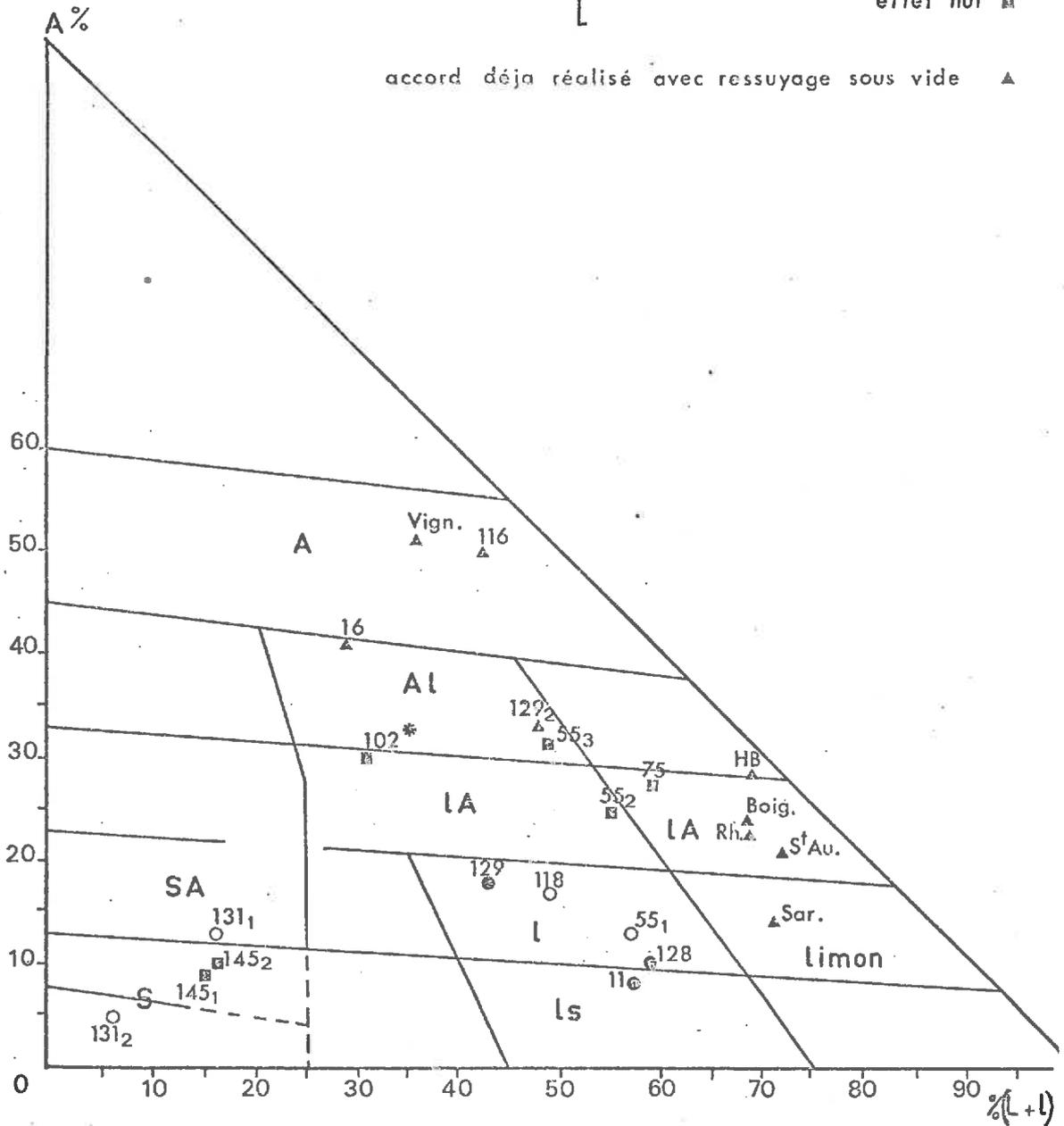
44 DISTRIBUTION DES ECHANTILLONS NATURELS SUR UN TRI-
-ANGLE DE TEXTURE

conséquences du
ressuyage modulé sur
la valeur de δd

effet sensible [coïncidence avec δd naturel

effet nul

accord déjà réalisé avec ressuyage sous vide



* Itage granulométrique

extraite d'une étude sur la porosité structurale (MONNIER et al. 1973), le critère de structure continue n'est pas toujours utilisable. Certains sols présentent en effet, pour des volumes de mesure décroissants, une augmentation progressive de la valeur de $\bar{\gamma}_d$ non imputable, compte tenu de leur granulométrie, à un effet de vidange.

Cependant l'accroissement de la valeur de $\bar{\gamma}_d$ montre qu'il y a élimination progressive des systèmes poreux les plus grossiers, assimilables à la porosité structurale. On peut admettre que pour des tailles suffisamment petites cette dernière devient négligeable et que la valeur de $\bar{\gamma}_d$ soit une bonne estimation de la densité texturale. Il est évident que cette hypothèse a d'autant moins de chance d'être réaliste que le matériau contient des éléments plus grossiers. En pratique, nous avons retenu pour les échantillons sableux des volumes de mesure voisins de 15 cm³. Pour les autres matériaux, les valeurs de $\bar{\gamma}_d$ sont estimées au niveau de prises d'agglomérats de 2 - 3 mm. Enfin pour les échantillons très argileux susceptibles d'être également finement fissurés, le diamètre des agglomérats est compris entre 2 et 1,25 mm.

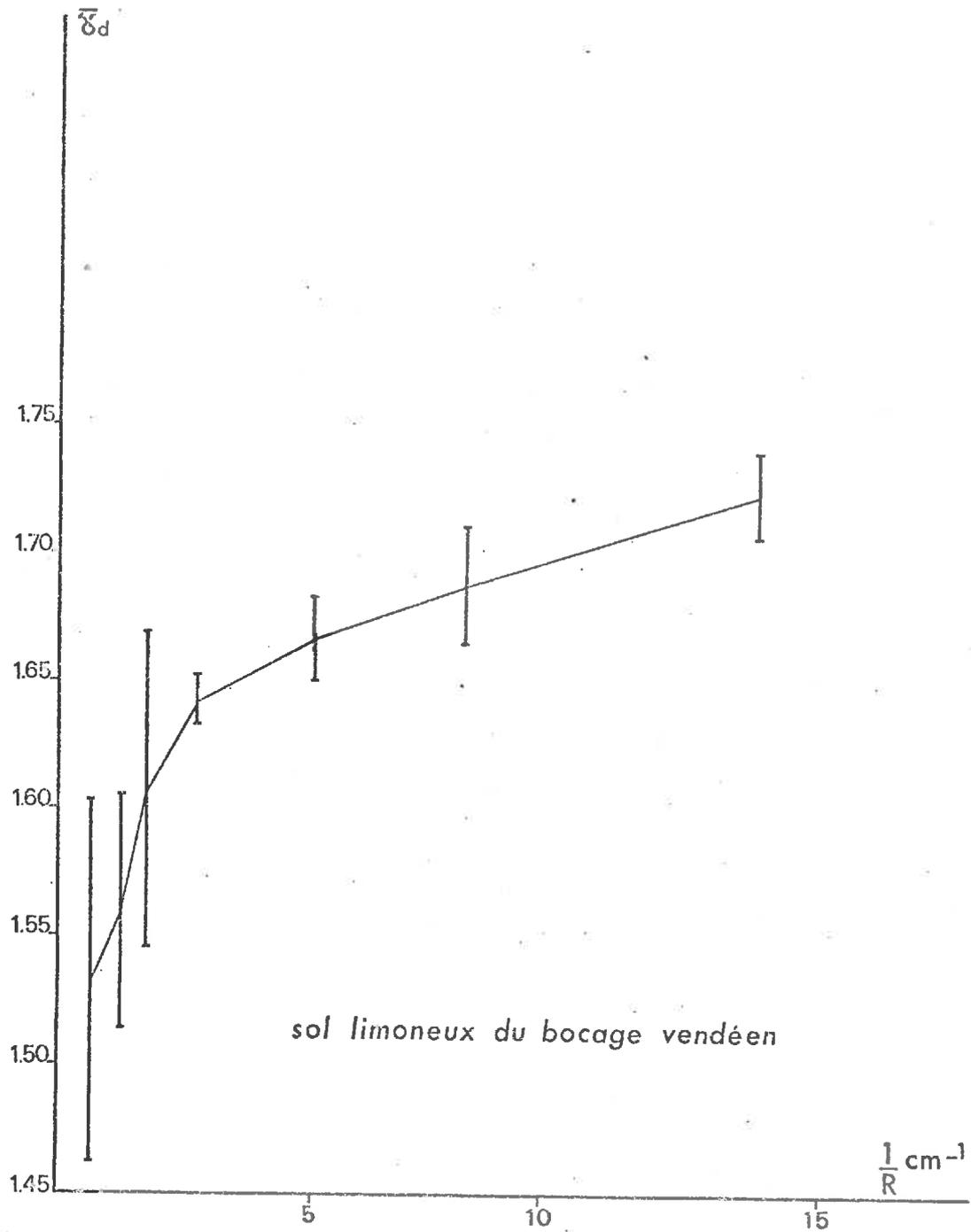
6.1.3. Protocoles de préparation des éprouvettes de terre

Deux processus ont été successivement utilisés pour la réalisation des échantillons en laboratoire.

Le premier est appelé ressuyage standard. Il correspond au processus défini par MONNIER et KHEYRABI (1968), que nous avons déjà utilisé pour les mélanges argile-squelette. Rappelons qu'après malaxage, la pâte est introduite dans un buch-ner, où une dépression de 60 cm de mercure réalisée par la trompe à eau est appliquée pendant 5 heures. L'éprouvette est alors extraite du buchner et séchée à l'air du laboratoire pendant 48 h avant d'être placée dans une étuve à 105°C.

45

VARIATION DE LA DENSITÉ DE MOTTES EN
FONCTION DE LEUR TAILLE

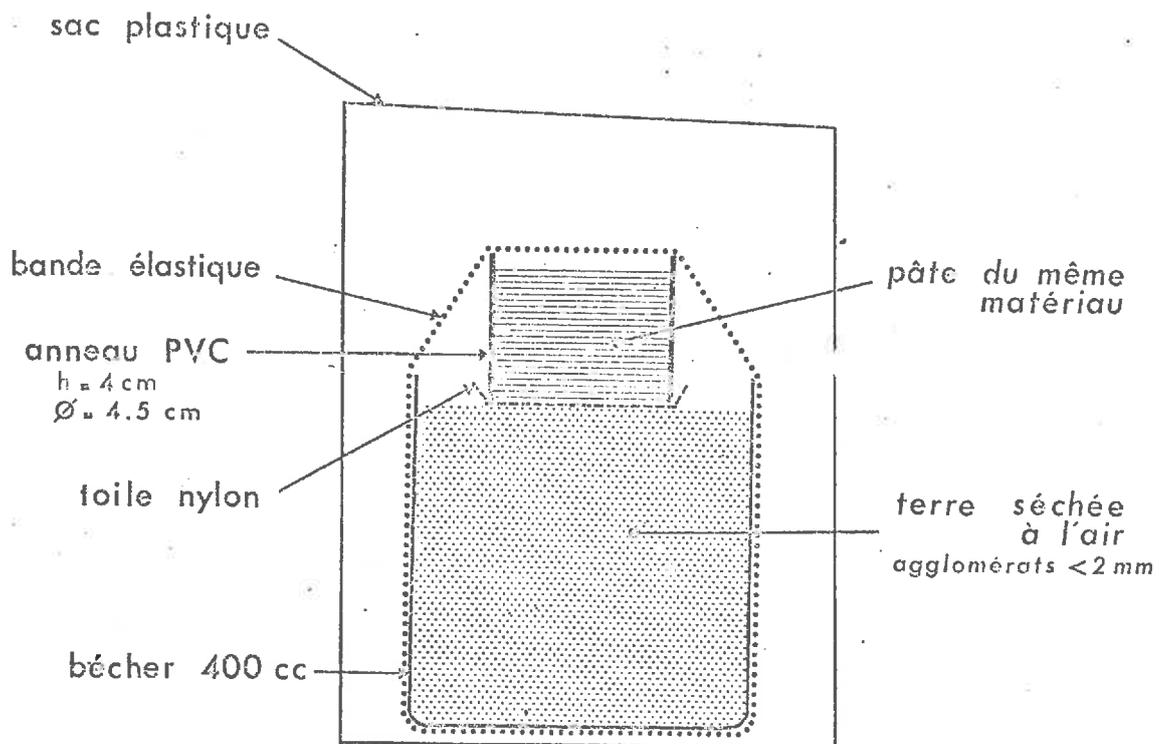


Le second appelé ressuyage modulé répond au souci de réaliser des conditions de ressuyage aussi voisines que possible de celles présentées par le sol en place. Nous avons repris à cet effet le protocole imaginé par FEODOROFF (1964) pour la détermination de la capacité au champ. Dans notre cas, la manipulation consiste à laisser ressuyer le matériau à l'état de pâte sur une quantité suffisante du même sol séché à l'air et tamisé à 2 mm (figure 46). Après 24 h l'éprouvette est extraite de son moule et subit alors un séchage à l'air de 48 h avant le passage à l'étuve.

L'humidité de malaxage est commune aux deux processus. L'échantillon est tout d'abord amené à une teneur en eau proche de 1,9 fois son humidité équivalente. On parachève l'humectation des constituants en abandonnant l'échantillon pendant 12 h dans un sac en plastique pour prévenir toute évaporation. L'échantillon est ensuite repris ; l'eau en excès, si elle existe, sera éliminée avant malaxage. Par contre, il est parfois nécessaire d'apporter à nouveau une certaine quantité d'eau afin de permettre le malaxage. Le but de cet ajustement empirique de la teneur en eau au malaxage est d'une part d'éviter tout excès d'eau favorisant une sédimentation des constituants dans la pâte, d'autre part de permettre cependant une homogénéisation rapide de la pâte par un malaxage d'une dizaine de minutes. Nous avons pu constater lors de répétition espacées dans le temps sur un même échantillon, que l'humidité de malaxage ne différait pas de plus de 2 p. cent d'humidité d'une réalisation à une autre, en valeur absolue.

6.2. Résultats et discussion.

Le tableau (23) rassemble les diverses valeurs obtenues. Chacune de ces valeurs représente la moyenne de 5 à 10 mesures sur des échantillons naturels et concerne au moins deux éprouvettes dans le cas des échantillons préparés en laboratoire.



DISPOSITIF DE RESSUYAGE MODULÉ

Un exemple des écarts types obtenus sur échantillons naturels est présenté au tableau (24). Ces résultats concernent des mesures sur agglomérats 2 - 3 mm à l'exclusion de l'échantillon sableux où il s'agit de mesures sur des petites mottes d'environ 15 cm³ et de l'échantillon argileux où les agglomérats ont une taille comprise entre 2 et 1,25 mm.

On peut constater que la gamme des densités est assez étalée puisqu'elle se situe entre les valeurs de 1,593 et 2,007 en ce qui concerne les échantillons naturels. Sur un même matériau, une telle variation représenterait environ 16 p.cent de porosité en valeur absolue.

6.2.1. Echantillons soumis au ressuyage standard.

Nous allons tout d'abord comparer les résultats obtenus sur échantillons naturels à ceux mesurés sur les mêmes échantillons soumis au ressuyage standard. Sur la figure (47) il apparaît que si tous les échantillons ne se situent pas sur la première bissectrice, il n'y a cependant pas indépendance entre les couples de valeurs de $\bar{\gamma}_d$. L'équation de la droite de regression est :

$$y = 0,9545x + 0,0137 \quad r = 0,811$$

avec :

$$N = 22$$

où y est la densité texturale de l'échantillon naturel.

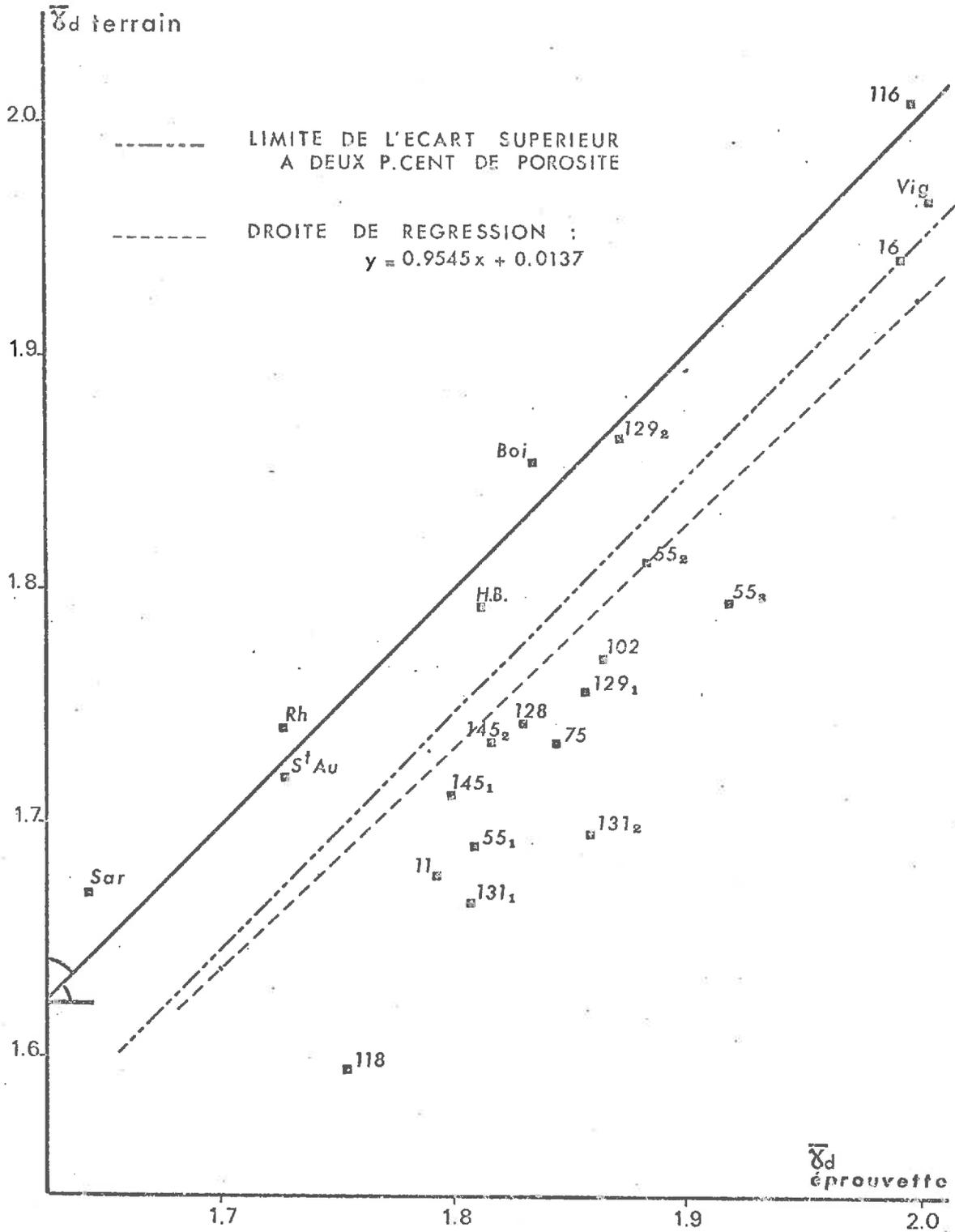
La disposition des points attire plusieurs remarques.

Tout d'abord, on peut constater que le plus souvent les $\bar{\gamma}_d$ d'éprouvettes sont supérieurs aux $\bar{\gamma}_d$ de terrain. Avant de

Echantillon	116 Argileux	129 ₂ argilo- limoneux	55 ₂ Limono- argileux	118 Limoneux	11 Limono- sableux	145 ₂ Sableux
\bar{Y}_d	2,007	1,864	1,810	1,593	1,677	1,735
N	10	10	5	5	10	4
σ	0,015	0,007	0,004	0,009	0,008	0,013

TABLEAU 24 : ECARTS TYPES DES MESURES DE LA DENSITE TEXTURALE D'ECHANTILLONS NATURELS.

47 COMPARAISON DES COUPLES DE VALEURS DE $\bar{\gamma}_d$ DES ECHANTILLONS NATURELS ET PREPARES PAR RESSUYAGE STANDARD



rejeter cette différence sur le mode de préparation, on peut s'interroger encore une fois sur la validité de l'estimation de $\bar{\gamma}_d$ des matériaux à l'état naturel. Les volumes choisis pour une telle estimation, minimisent la représentation de la porosité d'origine structurale, mais n'apportent aucune sécurité quant au critère d'homogénéité des échantillons naturels.

Ainsi, sur certains d'entre eux, nous avons pu distinguer des zones que nous avons qualifiées de massives et des zones apparaissant plus hétérogènes quant à la distribution des pores visibles. Cette différenciation pouvait être à l'origine d'un biais dans la mesure où les agglomérats utilisés représentaient un échantillon complet du matériau initial. Nous avons alors choisi, dans les zones massives, des agglomérats de ces mêmes matériaux et confronté les valeurs obtenues par les deux démarches. La figure (48) montre qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux modes d'échantillonnage pour six échantillons de textures variées (limono argileux à limon sableux).

Ce résultat qui rejette donc l'hypothèse d'un biais lié à l'hétérogénéité de l'échantillon peut s'interpréter lui même de deux manières. On peut considérer que la méthode au pétrole est "autocorrective" en ce sens que dans les agglomérats "tout venant" les pores les plus gros subissent une vidange au cours du ressuyage. On peut aussi admettre que les caractères différents observés sont hors de portée des différences appréciables par la méthode utilisée.

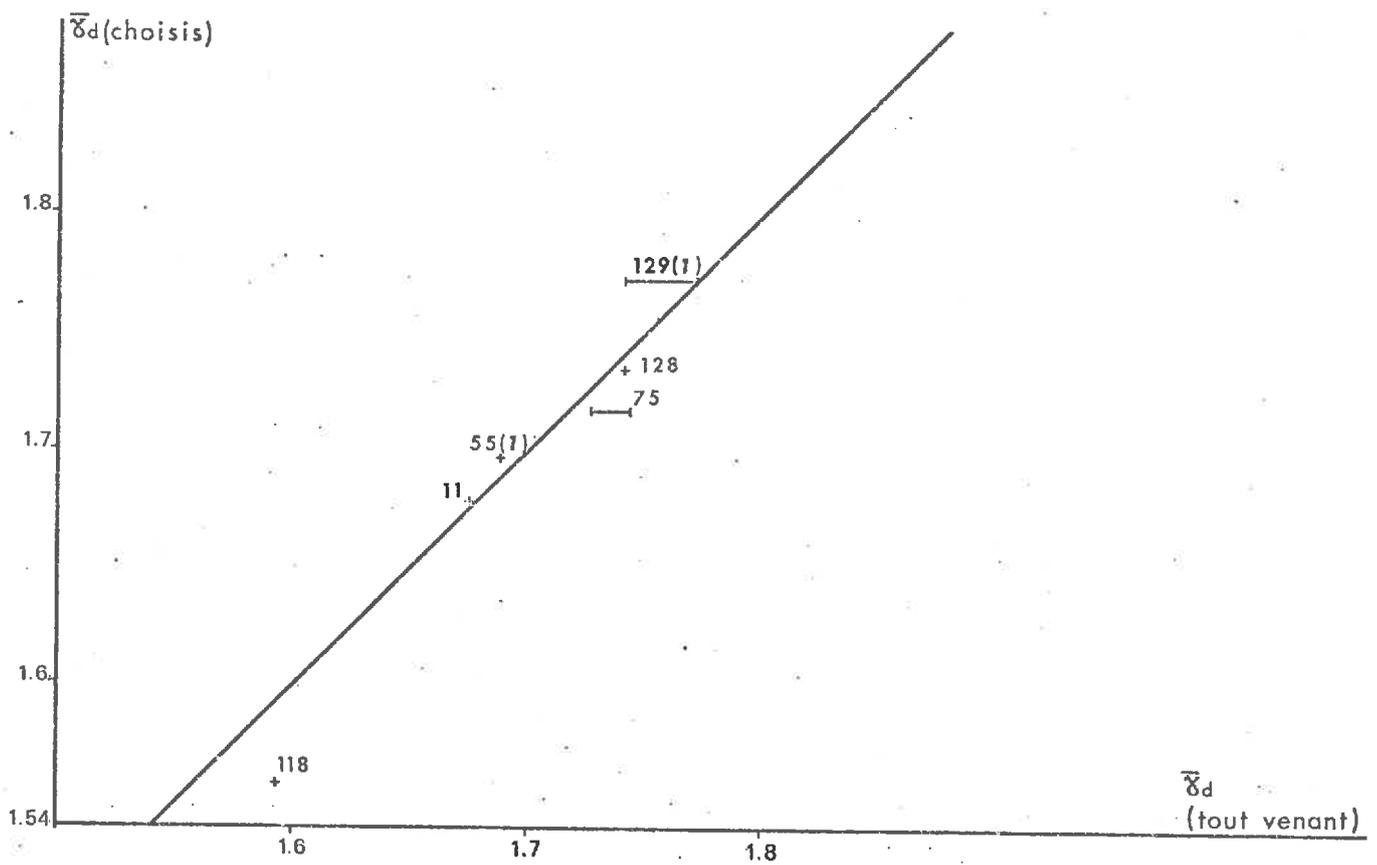
Par contre, l'observation systématique des échantillons nous a permis d'isoler un cas particulier présenté par l'échantillon 102. Ce matériau dont la granulométrie indique une texture limono-argileuse est en fait constitué à l'échelle

millimétrique d'une alternance de bandes sableuses et de bandes argilo-limoneuse. Une telle disposition exige des mesures au niveau de chaque bande, c'est à dire ici dans un domaine de taille d'échantillon qui se situe au delà des possibilités de la méthode au pétrole. Il est par ailleurs évident que la réalisation d'une éprouvette par malaxage conduit à un nouvel échantillon de texture étrangère à l'échantillon naturel.

Enfin, nous avons envisagé la possibilité d'un biais introduit au niveau de la composition granulométrique des échantillons destinés au malaxage, par leur mode de préparation. En effet, les agglomérats naturels destinés aux mesures étaient tamisés à la main entre 2 et 3 mm alors que les éprouvettes et donc les agglomérats préparés en laboratoire étaient issus d'un matériau tamisé mécaniquement à travers un seul tamis de 2 mm. Quelques analyses granulométriques et des mesures de \bar{Y}_d sur éprouvettes réalisées d'une part avec des agglomérats, d'autre part avec de la terre fine ont montré qu'il n'y avait pas de biais introduit à ce niveau.

Dans ces conditions et avec une réserve quant aux processus pédogénétiques ayant pu induire certains types d'organisations ayant échappé à notre niveau d'observation, nous avons émis l'hypothèse que le processus de ressuyage standard pouvait, pour certaines textures, être trop extrême par rapport aux conditions de ressuyage du matériau en place. Cette réflexion s'appuie sur le fait que les points qui se situent le plus près de la première bissectrice, sur la figure (47) correspondent grosso modo soit à des matériaux très argileux ($A > 40\%$ (Vig ; 116 ; 16) soit à des matériaux à texture très fine, limon argileux ou limon (Boi ; HB ; Rh ; St Au ; Sar).

COMPARAISON AGREGATS CHOISIS "MASSIFS" / AGREGATS PRIS AU HASARD. (48)
2 - 3 mm - MATERIAU NATUREL.



6.2.2. Echantillons soumis au ressuyage modulé.

Nous avons donc procédé à la réalisation d'éprouvettes en utilisant le procédé de ressuyage d'un sol sur lui-même. Dans ces nouvelles conditions, une modification de la valeur de $\bar{\gamma}_d$ par rapport au ressuyage standard ne devrait intervenir que pour les textures de type limono-argileux, limoneux, limono-sableux et sableux.

La figure (49) confronte les valeurs de $\bar{\gamma}_d$ des échantillons naturels aux valeurs de $\bar{\gamma}_d$ obtenues avec ce nouveau type de ressuyage. Il apparaît que la relation entre les valeurs des densités est plus étroite que précédemment. La droite de régression a pour équation :

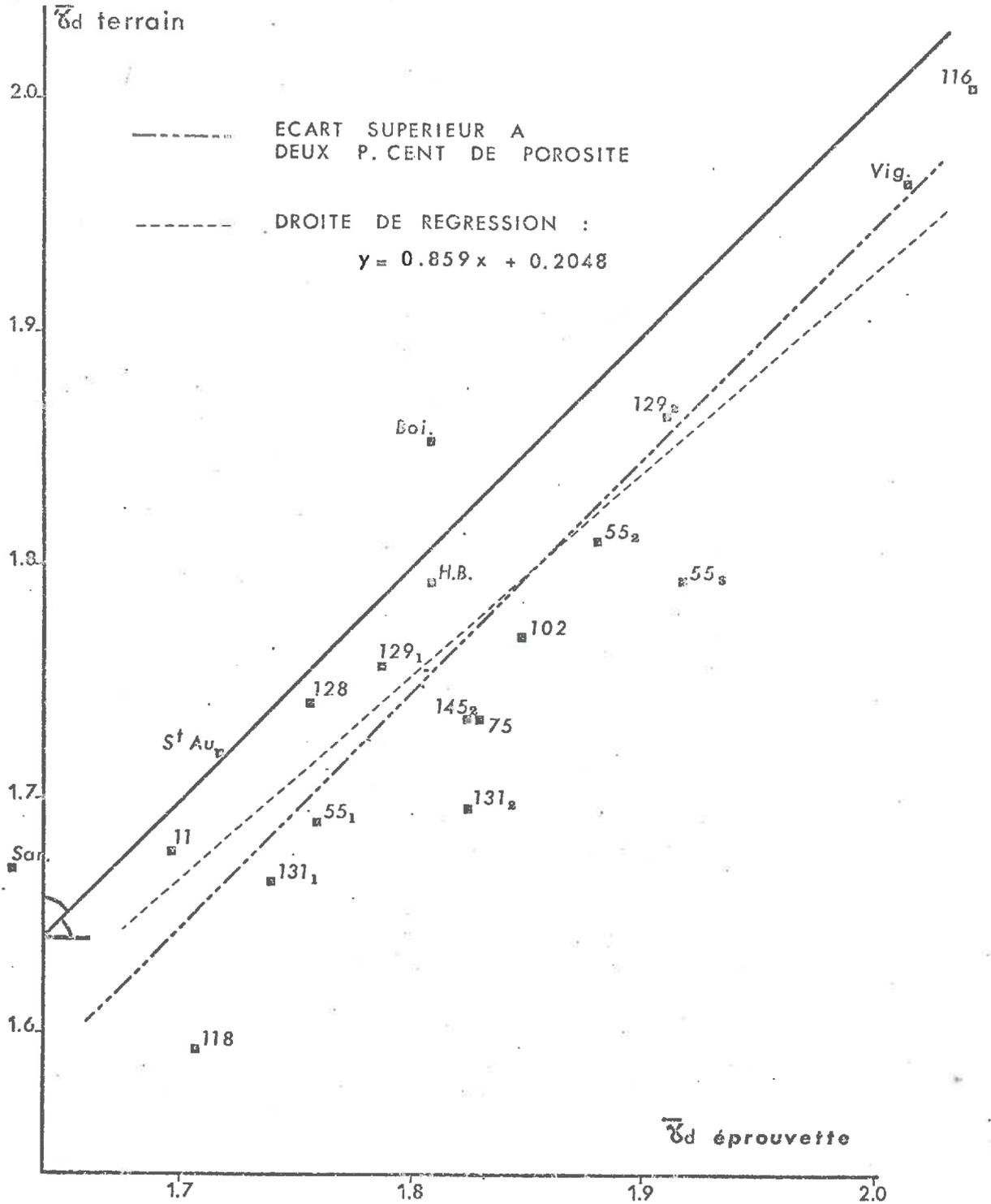
$$y = 0,859x + 0,2048 \quad r = 0,882$$

$$\text{avec } N : = 19$$

Cette amélioration est bien essentiellement liée à un rapprochement vers la première bissectrice des nouvelles valeurs de certains des matériaux à texture limoneuse et limono-sableuse, les échantillons de type limon argileux et argile étant par ailleurs peu affectés par la modification de processus de ressuyage.

Cependant, des échantillons tels que la série 55_{1,2,3}, et les échantillons 118 et 75 présentent toujours des valeurs de $\bar{\gamma}_d$ supérieures à celles mesurées sur échantillons naturels. Enfin, c'est également le cas de tous les échantillons sableux. Ceci soulève une série de questions que nous n'aborderons pas ici mais dont l'étude contribuera à mieux situer les problèmes liés aux facteurs pédogénétiques. Le cas des échantillons sableux ressort davantage semble-t-il des conditions de mise en place plutôt que du processus de ressuyage lui-même.

49 COMPARAISON DES COUPLES DE VALEURS DE $\bar{\sigma}_d$
 DES ECHANTILLONS NATURELS ET PREPARES PAR
 RESSUYAGE MODULÉ



6.3. Conclusions

Il apparaît bien qu'il existe un déterminisme textural de la porosité des sols.

Nous avons pu en effet montrer qu'il y a une relation entre la densité texturale d'un échantillon naturel et celle mesurée après que cet échantillon ait été remanié au laboratoire dans des conditions définies. Mais cette relation n'est pas aussi étroite pour tous les types de matériaux. Pour certaines textures, les modalités de l'histoire hydrique imposée apparaissent jouer sur la valeur de la densité à l'état sec. Un ressuyage modulé en fonction de la composition du matériau se présente alors comme la meilleure façon de procéder quand on cherche à prévoir la densité d'échantillons naturels.

Enfin, certains processus pédogénétiques comme l'illuviation, le mode de dépôt (comme dans le cas de sols alluviaux), la nature de certains constituants (matière organique, calcaire...) sont responsables de dispositions particulières des particules constitutives du sol. Cette influence est certainement à l'origine de certains écarts de densité que nous avons constatés.

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Notre démarche a été de dégager des lois d'assemblage en utilisant ce qu'il y avait d'inéluctable dans l'encombrement de l'espace par des particules : à savoir l'encombrement des espaces ménagés par une matrice de grosses particules (loi de remplissage) ou la substitution d'un volume encombré de petites particules par une grosse (loi de substitution). En l'absence de mélange intime, la juxtaposition des volumes encombrés nous a conduit à la loi d'additivité. Toutefois, la mise en oeuvre de ces principes implique un certain nombre de conséquences qui dépendent des interactions entre les volumes représentant les groupes d'éléments associés. Il est évident en particulier que la coexistence des éléments fins et grossiers ne peut avoir le caractère d'un remplissage ou d'une substitution que si leur association ne modifie pas leurs assemblages respectifs.

Il est possible d'exprimer ces effets à l'aide de coefficients affectant l'efficacité des éléments réunis dans les mélanges à s'arranger sans perturbation. Pour préciser ces effets nous avons utilisé des types d'assemblages réguliers nous permettant de mettre en évidence l'influence de la taille relative des éléments considérés comme grossiers et comme fins. En fonction du rapport de taille, les effets que l'on peut ainsi calculer sur la porosité de mélange correspondent aux ordres de grandeurs des effets que l'on peut observer avec différents matériaux. Il semble que nous puissions conclure que nous avons pu ainsi élaborer une loi de l'association de particules de tailles différentes. Mais ces matériaux n'ont pas d'action propre les uns sur les autres mis à part les effets d'ordre stérique.

Quand on passe à l'association d'une fraction argileuse humide à des fractions limoneuses ou sableuses, les lois d'association sont parfaitement vérifiées tant que le mélange reste fortement hydraté.

Lors de la dessiccation de ce système, deux phénomènes se produisent.

D'une part, la disposition relative de la fraction argileuse et de la fraction limoneuse ou sableuse est modifiée et ceci en fonction des proportions de la fraction argileuse, d'autre part il apparaît une porosité lacunaire due aux différences de retrait dans une masse hétérogène où se juxtaposent des éléments à volume variable (argile hydratée) et des éléments à volume fixe (squelette), aux proportions du mélange et aux conditions de dessiccation.

Il est important de constater que, tant dans la perturbation apportée dans le mélange d'éléments de tailles différentes sans interaction propre, que dans l'association d'une fraction argileuse et de particules inertes, on retrouve l'allure des principaux types d'assemblages décrits par les géomorphologues.

Ainsi apparaît une synthèse entre les concepts qualitatifs de la micromorphologie et les résultats quantitatifs de l'approche physico-géométrique que nous avons suivie. Il semble ainsi que le but très ambitieux que nous nous étions proposé ait été partiellement atteint.

Cette expression restrictive tient à ce que nous avons opéré sur des modèles et que la préparation des éprouvettes de référence qui ont permis les vérifications quantitatives nous imposaient de passer par certaines opérations.

Or si nous avons dû, pour mélanger l'argile et les éléments plus grossiers, passer par une pâte, ce fait impliquait un réarrangement au cours de la dessiccation.

Or, dans les processus illuviaux, au moins pendant une certaine partie du processus, l'argile est introduite dans une matrice d'éléments grossiers qui est immuable. La distribution relative de la fraction argileuse et de la fraction grossière peut être profondément différente de celle réalisée expérimentalement.

C'est par exemple pour de tels matériaux qu'on peut supposer qu'il n'y ait pas accord entre les prévisions que l'on pourrait établir à partir des règles que nous avons formulées et les porosités texturales observées.

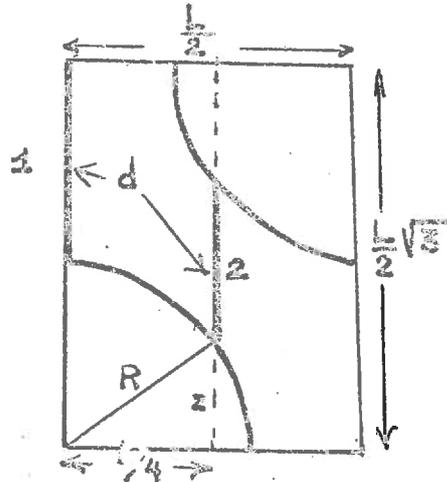
En fait, la comparaison expérimentale des densités entre les valeurs prévues et les valeurs trouvées fait apparaître une corrélation très nette. Il existe toutefois des écarts systématiques pour des lots d'échantillons et ces écarts doivent mesurer les facteurs que nous n'avons pas pris en compte dans l'étude de nos modèles.

Si donc nous croyons pouvoir conclure raisonnablement qu'il est possible désormais de prévoir, à partir de la constitution granulométrique et pour des matériaux non organique et non calcaire, l'ordre de grandeur de la porosité texturale, il semble que l'on puisse affiner cet accord par des études ultérieures portant sur des matériaux naturels dont les conditions de formation pédogénétique seront précisées sans ambiguïté.

Il n'en reste pas moins que nous disposons d'une série de règles qui permet pour les types de matériaux étudiés de disposer de séries de références pour des études futures sur l'organisation des constituants granulométriques dans les sols.

ANNEXE 1

CHOIX DE LA POSITION DE d EN ARRANGEMENT ORTHORHOMBIQUE



en position 1 d est égal à $\frac{L}{2} \sqrt{3} - R$

en position 2 d est égal à $\frac{L}{2} \sqrt{3} - 2z$

$$\text{avec } z^2 = R^2 - \left(\frac{L}{4}\right)^2 \text{ soit } z^2 = R^2 - \frac{L^2}{16}$$

Pour que les deux positions soient équivalentes il faut que :

$$\frac{L}{2} \sqrt{3} - R = \frac{L}{2} \sqrt{3} - 2z$$

soit, en remplaçant z par sa nouvelle expression, et après simplification :

$$R^2 = 4R^2 - \frac{L^2}{4}$$

De cette expression l'on tire la condition suivante :

$$\frac{L}{2} = R \sqrt{3}$$

Pour avoir d en position 1 inférieur à d en position 2 ,
il faut alors que :

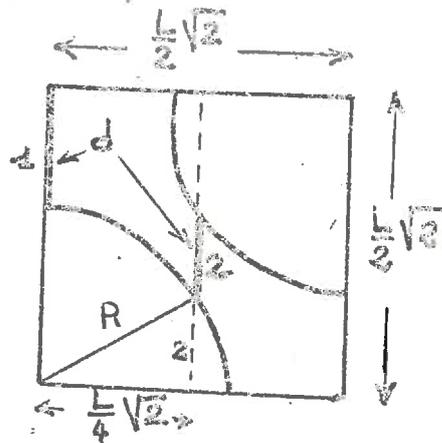
$$\begin{aligned} R &> 2 Z \\ \text{Soit } R^2 &> 4 R^2 - \frac{L^2}{4} \end{aligned}$$

ce qui conduit à :

$$\frac{L}{2} > R \sqrt{3}.$$

ANNEXE 2

CHOIX DE LA POSITION DE d EN ARRANGEMENT RHOMBOEDRIQUE



en position 1 d est égal à $\frac{L}{2} \sqrt{2} - R$

en position 2 d est égal à $\frac{L}{2} \sqrt{2} - 2z$

$$\text{avec } z^2 = R^2 - \frac{L^2}{8}$$

Pour que les deux positions soient équivalentes il faut que :

$$R^2 = 4R^2 - \frac{L^2}{2}$$

soit :

$$\frac{L}{2} = R \sqrt{\frac{3}{2}}$$

Pour que la valeur de d en position 1 soit inférieure à celle calculée en position 2 il faut :

$$R > 2z$$

soit :

$$\frac{L}{2} > R \sqrt{\frac{3}{2}}$$

BIBLIOGRAPHIE

- BERNAL J. D., MASSON J., 1960. Coordination of randomly packed spheres. *Nature* 188, 908-911.
- BORNAND M., GUYON A., 1969. Etude pédologique dans la vallée du Rhône. Région de Tain, Albon, St Sorlin, St Donat (Drôme). S.E.S. n° 106 MONTPELLIER.
- CHRETIEN J., 1971. Essai de caractérisation des sables en tant que squelette minéral du sol. *Ann. Agrom.*, 22 (6), 615-654.
- CURRIE J.A., 1966. The volume and porosity of soil crumbs. *The Journal of soil. Sci.* 17, (1), 24-35.
- FAURE A., 1978. Comportement des sols au compactage : Rôle de l'argile et conséquence sur l'arrangement des grains. Thèse GRENOBLE Fac. Sci. et Med.
- FEODOROFF A., BETREMIEUX R., 1964. Une méthode de laboratoire pour la détermination de la capacité au champ. *Science du sol - 2*.
- FIES J. C., 1970. Recherche de paramètres facilitant l'interprétation de l'analyse granulométrique en physique du sol : influence de la surface spécifique des éléments du squelette sur la stabilité structurale. *Science du Sol*, 2, 27-37.
- FIES J.C., 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. Agrom.* 22, (6), 655-685.
- FIES J.C., HENIN S., MONNIER G., 1972. Etude de quelques lois régissant la porosité de matériaux meubles. *Ann. agrom.* 23, (6), 621-653.
- FURNAS C.C., 1929. Flow of gases through beds of broken solids. *US. Bur. Mines Bull.* 307-139 p.
- FURNAS C.C., 1931. Grading aggregates : Mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. *Ind. Eng. Chem.* 23, (9), 1052-1058.

- GRAS R., 1972. Eléments grossiers et dynamiques de l'eau. I :
Comportement des éléments grossiers poreux vis à vis
de l'eau. Ann. agron. 23, (2), 197-239.
- GRATON L. C., FRASER H. J. 1935. Systematic packing of spheres with
particular relations to porosity and permeability.
J. Géology, 43, 785-909.
- GUERIF J., 1974. Caractéristiques physiques et techniques des
terroirs maraichers du Vaucluse. Mémoire
ES.I.T.P.A. PARIS
- HAINES W.E., 1925. J. of Agr. Sc. Vol. 15.
- HENIN S., 1967. La notion de texture. Consejo superior de Investiga-
ción Científica. An. de Edaf. y Agro. t.26 p. 845.
- HENIN S., 1969. GRAS R., MONNIERS G. Le profil cultural. Masson.
PARIS. 332 p.
- HENIN S., 1976. Cours de physique du sol I. ORSTOM-EDITEST.
PARIS-BRUXELLES. 159 p.
- JOHNSON A. W., SALLBERG J.R., 1962. Factors influencing compaction
test results. Highway Research board Bulletin.
319. 148 p. Nat. Acad. of Sci. Washington D.C.
- KHEYRABI D., MONNIER G., 1968. Etude expérimentale de l'influence
de la composition granulométrique des terres
sur leur stabilité structurale. Ann. Agro. 19
(2) 129-152.
- Mc. GEARY R. K., 1961. Mechanical packing of spherical particles.
J. Am. Ceramic Soc. 44, 513-522.
- MATHERON G., 1967. Eléments pour une théorie des milieux poreux.
Masson, PARIS.
- MONNIER G., 1966. Sur la couleur des terres considérée comme une
caractéristique texturale. C. R. Acad. Sci. 264,
2188-2191.

- MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C., 1973. Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. agron. 24. (5), 533-
- MORVAN A.M., 1975. Application de la morphologie Mathématique dans le domaine de la Science du Sol. Rapport de stage I.N.R.A. Science du Sol.
- OSTY P.L., 1971. Influence des constituants du sol sur son humidité à p F 3. Ann. Agron., 22 (4), 451-476.
- PELTIER R., 1959. Manuel du laboratoire routier. Dunod Ed. Paris
- PARRISH J.R., 1961. Packing of sphères - Nature 190,800.
- RIVIERE R., EYRAUD L., RICHARD M., 1969. Etude de quelques aspects formels relatifs aux problèmes de compacité des matériaux pulvérulents. Bull. soc. franc. de ceram. 84. 53-66.
- SCOTT D. G. 1960. Packing of equal sphères. Nature 188 N° 4754, 908-909.
- SERRA J., 1969. Introduction à la morphologie mathématique. Cahiers du Centre de morphologie mathématique, Fax. 3. Ecole des Mines de PARIS.
- SOUTY N., 1978. (Titre indicatif). Sols calcaires : étude de propriétés physiques en relation avec la granulométrie. Science du Sol (à paraître).
- STAPLE W. J. 1975. The influence of size distribution on the bulk density of uniformly packed glass particles. Soil. Sci. Soc. Amer. Proc. 39 (3) 404-408.
- STENGEL P., 1978. Utilisation de l'analyse des systèmes de porosité pour la caractérisation de l'état physique du sol in situ. Ann. agron. (à paraître).
- STENGEL P., 1978. Retrait des matériaux terreux non saturés : étude d'un modèle géométrique. Science du Sol. (à paraître).

sp. Inv. 590
—

- TERZAGHI K., PECK R.B., 1961. Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment. Paris.
- TESSIER D., 1975. Recherches expérimentales sur l'organisation des particules dans les argiles. Thèse Ingénieur. C.N.A.M. PARIS, 231 p.
- YERAZUNIS S., BARTLETT J.W., NISSAN A.H., 1962. Packing of binary mixtures of spheres and irregular particles. Nature vol. 195, 33-35
- YERAZUNIS S., CORNELL S.W., WINTER B., 1965. Dense random packing of binary mixtures of spheres. Nature vol. 107, 835-837.
- WHITE H.E., WALTON S.F., 1936. Particle packing and particle shape. Bull. Amer. Ceram. Soc. 155-166.