

50376
1986
279

50376
1986
279

N° d'ordre: 121

THESE

présentée à

L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LILLE
FLANDRES-ARTOIS

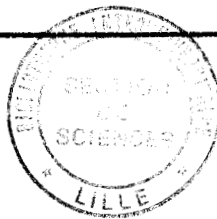
en vue d'obtenir le titre de

DOCTORAT D'UNIVERSITE

par

Pierre ADAMIEC

**CONTRIBUTION A L'ETUDE DE LA MANUTENTION
DES CHARBONS FINS ET HUMIDES :
APPLICATION A L'EGOULEMENT EN SILOS**



Soutenu le 6 Novembre 1986 devant la Commission d'Examen

MEMBRES du JURY :

MM. F. PARSY, Président-Rapporteur

J.P. HENRY, Examinateur

E. MERIAUX, Examinateur

M. NOMINE, Examinateur

H. GRATEPANCHE, Invité

A. TARDY, Invité

REMERCIEMENTS

Les travaux relatifs aux problèmes d'écoulement en silos de matériaux pulvérulents cohésifs ont été effectués au Laboratoire de Mécanique des Sols de l'ENSTIMD.

L'occasion m'est donnée ici de remercier particulièrement son responsable M. TARDY, qui a suivi ce travail avec une bienveillante attention.

Je tiens à remercier très vivement M. PARSY, professeur à l'Université de Lille, qui a bien voulu m'accepter dans ce cycle de recherches et présider cette thèse.

Il m'est agréable aussi de dire combien les remarques judicieuses de M. BASSAL, conseiller scientifique à l'ENSTIMD, m'ont guidées dans la démarche de ce travail.

M. NOMINE, adjoint au Directeur des Recherches au CERCHAR et M. GIRARDEAU, Ingénieur au CERCHAR m'ont toujours beaucoup aidé. Qu'ils trouvent ici toute ma profonde gratitude.

Je tiens aussi à remercier M. HENRY, professeur à l'Université de Lille ainsi que M. MERIAUX, Professeur à l'UFF d'Amiens qui se sont intéressés à cette étude et qui me font l'honneur de participer au jury.

M. GRATEPANCHE, Directeur des Recherches à l'ENSTIMD a toujours facilité l'acquisition des matériels nécessaires. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde reconnaissance.

M. MOREL m'a pas ménagé son temps pour participer activement aux expérimentations. Je tiens à lui exprimer ma reconnaissance.

M. RUDINE m'a apporté une aide précieuse lors de la réalisation du modèle. Je le remercie amicalement.

Mme DELSERT s'est occupée de la dactylographie de ce mémoire avec efficacité et bonne humeur. Qu'elle veuille bien accepter mes remerciements (et mes excuses pour mon écriture).

Je tiens à remercier aussi M. DEGRUGILLIERS de sa sympathique collaboration concernant la partie géologique, ainsi que les personnels des laboratoires BTP, Chimie et Electronique de l'ENSTIMD dont l'assistance scientifique et technique m'a été particulièrement utile.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	p 1
CHAPITRE I : GEOLOGIE DES CHARBONS	p 9
1 - 1 Substances organiques à l'origine des charbons.	p 10
1 - 1 - 1 Eléments principaux .	p 10
1 - 1 - 2 Eléments secondaires.	p 10
1 - 1 - 3 Climat à l'époque des formations des dépôts.	p 11
1 - 2 Origine de l'accumulation végétale.	p 11
1 - 2 - 1 Théorie autochtone .	p 12
1 - 2 - 2 Théorie allochtone.	p 12
1 - 3 Conditions de sédimentation des charbons.	p 13
1 - 4 La houillification.	p 15
1 - 5 Les différentes catégories de combustibles.	p 17
1 - 6 Constitution des houilles.	p 18
1 - 6 - 1 Constituants macroscopiques.	p 18
1 - 6 - 2 Constituants microscopiques.	p 19
1 - 7 Classification des charbons.	p 20
1 - 7 - 1 La classification chimique.	p 21
1 - 7 - 2 La classification biologique.	p 21
1 - 7 - 3 La classification pétrographique.	p 21
1 - 7 - 4 La classification commerciale.	p 21
CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES CHARBONS	p 25
I - INTRODUCTION	p 26
II - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES CHARBONS	p 29
II - 1 Constitution des charbons.	p 29

II - 2	Caractéristiques physiques mesurables.	p 30
II - 2 - 1	Représentation symbolique d'un volume élémentaire de charbon.	p 30
II - 2 - 2	Définition des grandeurs mesurables.	p 30
II - 2 - 2 - 1	Teneur en eau W.	p 30
II - 2 - 2 - 2	Poids volumique des grains	p 31
II - 2 - 2 - 3	Dimension des grains.	p 33
II - 2 - 2 - 4	Valeurs au bleu de méthylène.	p 36
II - 2 - 2 - 5	Equivalent de sable.	p 37
III -	CONCLUSIONS SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DES CHARBONS	p 38
IV -	CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES CHARBONS	p 39
IV - 1	Les essais oedométriques.	p 39
IV - 1 - 1	Définition de l'essai.	p 39
IV - 1 - 2	But de l'essai.	p 41
IV - 1 - 3	Matériel utilisé.	p 41
IV - 1 - 4	Résultats obtenus.	p 43
IV - 2	Caractéristiques mécaniques à la rupture.	p 44
IV - 2 - 1	Définition de l'essai.	p 44
IV - 2 - 2	But de l'essai.	p 44
IV - 2 - 3	Principe de l'essai.	p 45
IV - 2 - 4	Résultats obtenus.	p 45
V -	CONCLUSION SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES CHARBONS	p 46
CHAPITRE III :	SIMULATION D'UN ECOULEMENT EN TREMIE SUR MODELE ANALOGIQUE A ROULEAUX	p 48
I -	INTRODUCTION	p 49
II -	CARACTERISTIQUES DES MODELES	p 50

III - ESSAIS EFFECTUES	p 51
IV - INTERPRETATION DES RESULTATS DES ESSAIS	p 55
V - CONCLUSIONS	p 56
 CHAPITRE IV : ECOULEMENT EN TREMIE DU SABLE D'OISE	 p 57
I - INTRODUCTION	p 58
II - OBJECTIFS ET METHODE ENVISAGEE	p 59
II - 1 Influence de l'eau sur le comportement du matériau ensilé.	p 59
III - LA STATION EXPERIMENTALE	p 62
III - 1 Préparation du matériau.	p 64
III - 2 Transport du matériau.	p 65
III - 3 Le silo expérimental.	p 66
III - 4 La trémie de vidange.	p 67
III - 5 Instrumentation du modèle.	p 68
III - 5 - 1 Système de pesée en continu.	p 68
III - 5 - 2 Pressions exercées sur les parois inclinées.	p 69
III - 5 - 3 Le système d'acquisition de données.	p 71
IV - RESULTATS OBTENUS	p 72
IV - 1 Introduction.	p 72
IV - 2 Interpretation des essais.	p 72
IV - 2 - 1 Courbes de foisonnement.	p 72
IV - 2 - 2 Pressions exercées sur les capteurs.	p 74
IV - 2 - 2 - 1 Pressions en fin de remplissage.	p 74
IV - 2 - 2 - 2 Pressions à l'ouverture de la trémie.	p 75

IV - 2 - 2 - 3 Pressions au début de l'écoulement.	p 76
IV - 2 - 3 Commentaires de ces résultats.	p 76
IV - 2 - 4 Débits massiques obtenus.	p 78
IV - 2 - 5 Allure des écoulements.	p 79
IV - 2 - 6 Allure des courbes de pression.	p 79
IV - 2 - 7 Angles d'ouverture de la trémie.	p 84

PROSPECTIVES	p 85
--------------	------

BIBLIOGRAPHIE	p 89
---------------	------

ANNEXE I	p 95
----------	------

ANNEXE II	p 103
-----------	-------

Essais granulométriques.	p 104
--------------------------	-------

Essais oedométriques.	p 114
-----------------------	-------

Essais de cisaillement à la boîte.	p 120
------------------------------------	-------

ANNEXE III	p 126
------------	-------

Trémie n° 1 (70°).	p 127
--------------------	-------

Trémie n° 2 (45°).	p 132
--------------------	-------

INTRODUCTION

Depuis la crise énergétique de 1973 la plupart des pays industrialisés ont pris conscience de leur dépendance et ont essayé d'exploiter leurs ressources énergétiques de façon compétitive.

Ce fut notamment le cas de la France qui s'est engagée dans la construction et l'exploitation de centrales nucléaires, au détriment du charbon national d'exploitation déficitaire.

Par contre le charbon, essentiellement importé, peut avantageusement remplacer le pétrole dans l'industrie chimique ou le fuel, comme combustible dans certaines industries telles les cimenteries ou les briqueteries.

Même si les charbons fins et humides ont longtemps été considérés comme rebuts, surtout aux U.S.A. et en EUROPE, leur prix de revient imputable pour 50 % à leur manutention, est actuellement inférieur aux charbons de qualité et leurs rendements énergétiques de chaînes de gisement à l'utilisateur (Français) sont très intéressants. (Fig. 1) [66]

CHAINE	RENDEMENT en%
Pétrole : Moyen - Orient	83
Gaz Naturel : Mer du Nord	85
Gaz Naturel : Sibérie	70 - 75
Gaz de synthèse en France : Charbon Américain ou Sud Africain	40 - 50
Liquide par hydrogénation sur la Mine Américaine ou Sud Africaine	50 - 55
Gazogènes simples en France : Charbon Américain ou Sud Africain	65 - 70
Charbon importé pour combustible direct	80

FIG. 1 : Comparaison des rendements énergétiques de chaînes de gisement à l'utilisateur français en % - (d'après M. TURPIN)

Leurs manutentions restant très lourdes ainsi que les difficultés survenant encore fréquemment dans les circuits d'utilisation (Fig. 2), les charbons demeurent toujours peu utilisés. [9] ; [63]

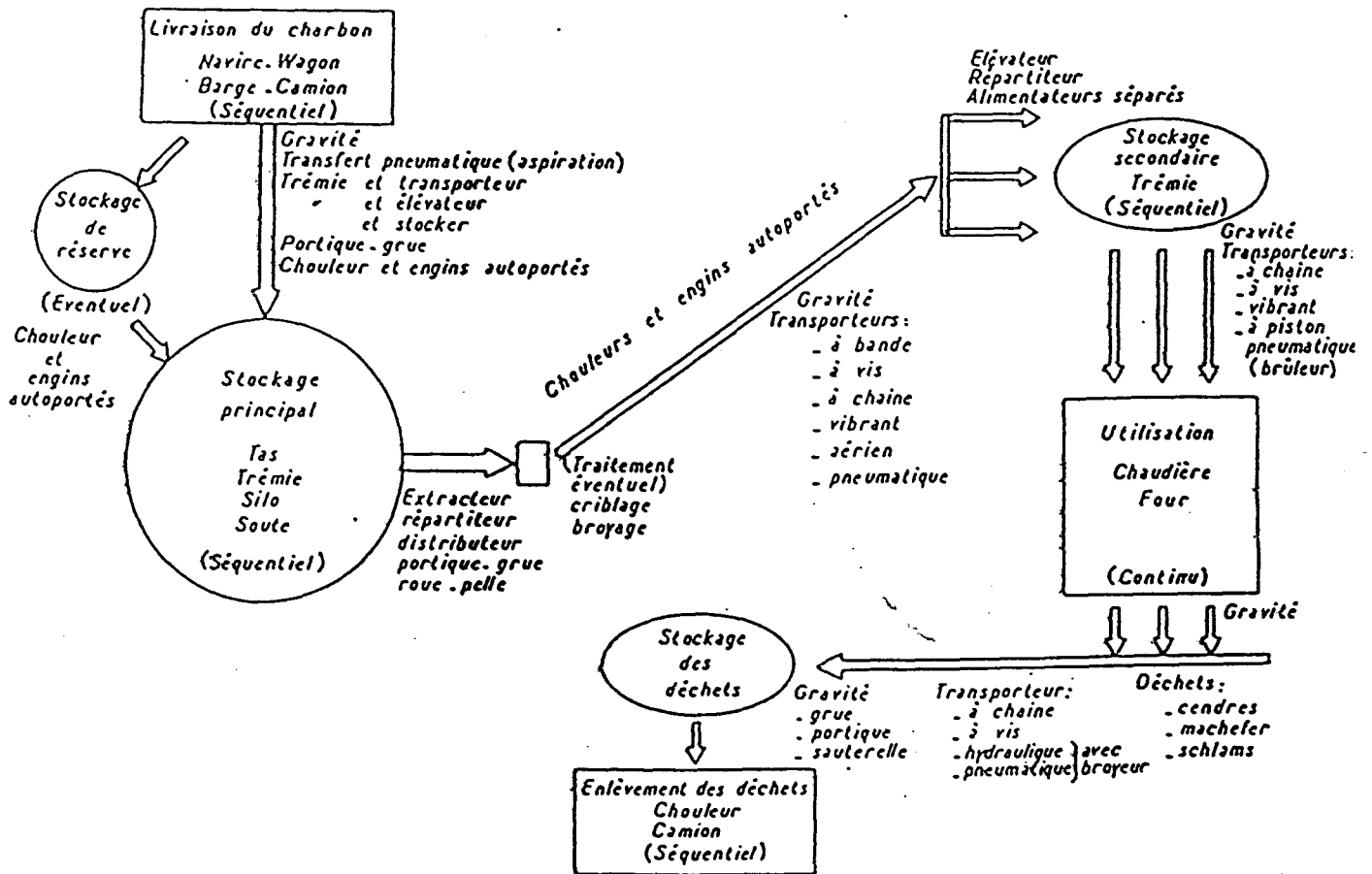


FIG. 2 : Schéma général des circuits d'utilisation des charbons industriels

Toutefois l'homme ayant des besoins énormes en combustible, il sera amené à utiliser toutes les énergies possibles, qu'elles soient liquides, solides ou gazeuses. [16] ; [23] ; [27] ; [32] ; [62] ; [64]

Nous pouvons remarquer néanmoins que les quantités connues de combustibles solides (charbon essentiellement) sont bien supérieures aux autres types d'énergies (Fig 3).

TYPES D'ENERGIE	RESERVES en G. tec *
Charbon	637
Pétrole	130
Gaz Naturel	95
Uranium	57

FIG. 3 : Réserves énergétiques mondiales

Les ressources géologiques mondiales de toutes les variétés de charbon s'élèvent à environ 10 125 G. tec dont plus de 630 sont techniquement et économiquement récupérables de nos jours (Fig. 4 et Fig. 5). [21]

TYPES d'ENERGIE	Réserves techniquement et économiquement récupérables		Ressources géologiques connues	
	G. tec	Production courante (années)	G. tec	Production courante (années)
Charbon	637	245	10 125	3 894
Pétrole	130	30	440	100
Gaz Naturel	95	56	360	210
Uranium	57	100	153	260

FIG. 4 : Réserves et Ressources énergétiques mondiales

.../...

* 1 G. tec = 1 gigatonne d'équivalent charbon = 1 milliard de tonnes.
1 tec = 6 600 thermies = 2 640 KWh

EVALUATION de la PRODUCTION (M. tec)				
PAYS	1978	1985	2000	2020
Chine	600	725	1200	1800
U S A	565	842	1340	2400
U R S S	556	851	1100	1800
Pologne	193	200	270	290
Gde Bretagne	122	137	173	173
Inde	101	135	235	500
Afrique du Sud	91	119	233	300
Allemagne Ouest	90	129	145	155
Australie	75	130	200	300
Canada	24	35	115	200
Autres pays	197	495	639	771
TOTAL	2614	3798	5650	8689

FIG. 5 : Production de Charbon dans le monde et estimation de la production dans les prochaines années

Ces seules réserves représentent près de 2.5 siècles de production; quant aux ressources géologiques, elles constituent l'équivalent de près de 39 siècles de la production annuelle (2600 M. tec). [21]; [66]

Nous pouvons constater avec étonnement que la plupart des réserves mondiales de charbon se trouvent dans l'hémisphère Nord (U R S S, USA, Chine, Europe) Fig 6 et Fig 7. Néanmoins, les pays en voie de développement sont préoccupés par la recherche de charbon; les études géologiques montrent d'ailleurs que de nombreuses régions de l'hémisphère Sud ont un potentiel minier important.

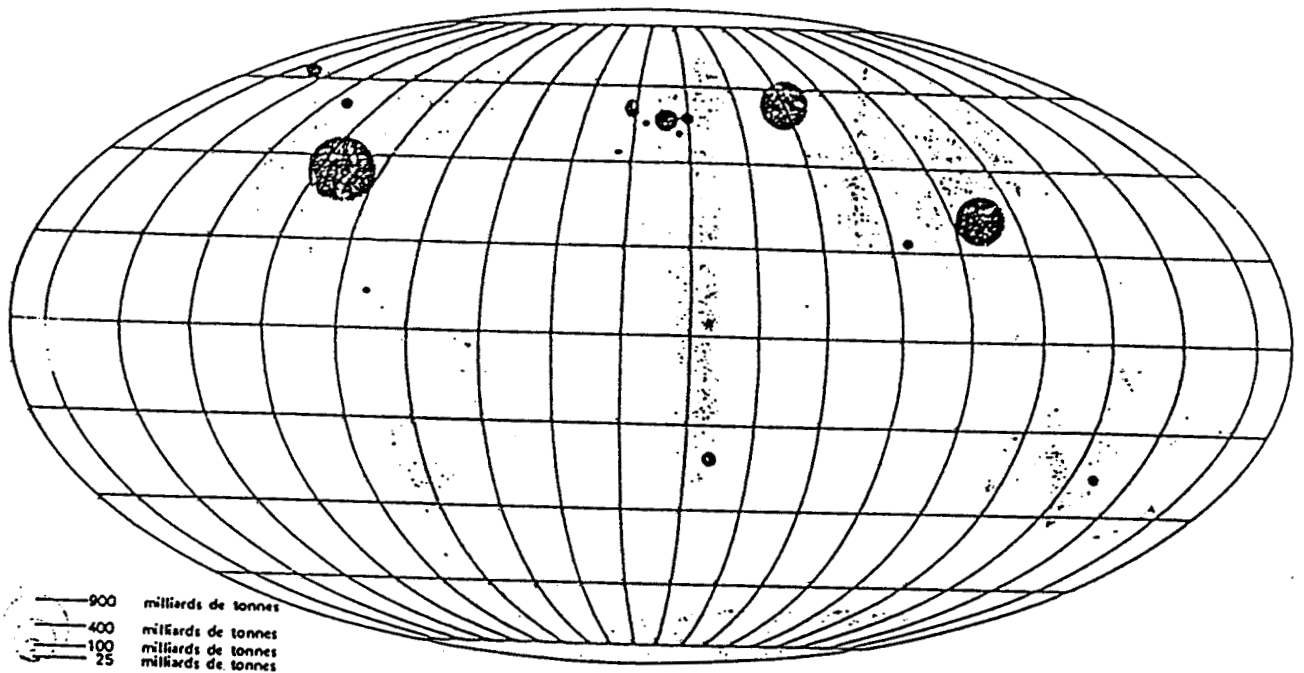


FIG. 6 : Répartition de la Houille dans le Monde



CONTINENTS	Ressources géologiques		Réserves techniquement et économiquement récupérables	
	M. tec	%	M. tec	%
ASIE	6 381 152	63,0	248 852	39,1
AMERIQUE	2 717 379	26,8	197 920	31,1
EUROPE	590 905	5,9	127 972	20,1
AUSTRALIE	262 924	2,6	27 497	4,3
AFRIQUE	172 904	1,7	34 123	5,4

FIG. 7 : Réserves Mondiales de Charbon
(Source : Bergbau - Forschung GmbH 1978) [211]

Actuellement 60 % de la production charbonnière proviennent de 4 pays : Etats Unis, Union Soviétique, Chine et Australie. Ces pays disposent de près de 90 % des réserves exploitables et d'environ 60 % des réserves géologiques connues. [14] ; [21] ; [25] ; [34] ; [66]

Si l'atout majeur du charbon réside dans son abondance, il présente néanmoins des inconvénients. En effet, l'exploitation minière nécessite :

- Une amenée de matériels importants et longs à mettre en place, donc des investissements conséquents ;
- L'embauche d'une main d'oeuvre nombreuse et par la même, la construction de logements en rapport avec ce nombre,
- La réalisation d'infrastructures de transports.

D'une façon générale, les installations utilisant le charbon sont plus difficilement mécanisables, plus onéreuses en investissements, en frais divers (entretien, personnel) que ne le sont les équipements au gaz, à l'électricité ou au pétrole. Ceci rend difficilement envisageable un retour dans certains secteurs, comme les foyers domestiques par exemple. Toutefois la production d'électricité demeure le principal marché du charbon. Dans la zone OCDE, la capacité des centrales installées passerait de 350 G.W en 1977 à plus de 1000 G.W en l'an 2000 ; le charbon à coke : 250 M tec en 1977 passerait à 350 M tec environ à la fin du siècle. Enfin le charbon destiné à la gazéification ou la liquéfaction représentera environ 335 M tec en l'an 2000.

Cette source d'énergie maîtrisée depuis longtemps, demeure une solution pour l'avenir immédiat, car parmi les autres sources d'énergie connues, certaines se réduisent alors que d'autres restent encore bien marginales par rapport aux besoins croissants.

Malheureusement les installations utilisatrices connaissent encore pour certaines qualités de charbons, des difficultés d'exploitation relatives notamment au criblage et à différentes phases de manutention, en particulier le transport par bande d'une part, à l'écoulement en silo ou en trémie d'autre part.

La diversité des origines des charbons et les traitements préalables éventuels, tel que le lavage, conduisent à l'utilisation de matériaux dont le comportement est extrêmement variable.

Notre étude se limitera à apporter quelques éléments sur le comportement du charbon lors de la vidange d'un silo.

Afin d'atteindre cet objectif, il sera donc nécessaire de connaître ce matériau particulier qu'est le charbon : nous en verrons son origine et nous en déterminerons ses caractéristiques physiques et mécaniques par le biais de la mécanique des sols.

Mais avant de concevoir notre modèle réduit de trémie et d'effectuer nos essais d'écoulement, nous visualiserons le phénomène sur un modèle analogique à rouleaux.

CHAPITRE I
GEOLOGIE DES CHARBONS

Le charbon est une roche solide caractérisée par une forte teneur en carbone. Son origine est attribuée à de grandes accumulations de matières végétales.

Etant donné la similitude entre les constitutions des différentes catégories de charbons, nous pouvons penser que les conditions de transformation des substances végétales ainsi que leur mode de dépôt ont dû être identiques. [2] ; [3] ; [5] ; [7] ; [24] ; [29] ; [43] ; [67]

I - 1 - SUBSTANCES ORGANIQUES à L'ORIGINE DES CHARBONS

I - 1 - 1 ELEMENTS PRINCIPAUX

Trois éléments jouent un rôle essentiel dans la constitution des charbons.

- les polysaccharides : où les celluloses ont un rôle important.
- la lignine : composé complexe à fonction alcool
- la cutine : composé complexe d'acide gras

Nous trouverons aussi des hydrocarbures, des dérivés d'acides gras, des gommes...

I - 1 - 2 ELEMENTS SECONDAIRES

Signalons également la présence de matières minérales

- dérivant des végétaux eux-mêmes : tels que silice, sels minéraux divers (certaines plantes contiennent jusqu'à 25 % de cendres par rapport au poids sec)

- apportées par le vent ou les courants : et ayant une place importante dans certains charbons (schistes carbonneux). Il s'agit essentiellement des argiles, mais aussi des sulfures, des carbonates...

- se trouvant dans les fissures du sol : tels que calcite, gypse, pyrite et marcassite.

L'accumulation de ces matières végétales s'est faite en milieu aqueux.

Après une première phase d'oxydation très réduite qui s'est produite soit à l'air, soit dans l'eau aérée, une décomposition plus ou moins complète des tissus végétaux provoquée par l'action des bactéries anaérobies, a enrichi la "bouillie végétale" en carbone et l'a par contre appauvrie en hydrogène et surtout en oxygène.

Lors de la destruction des bactéries par les composés humiques*, les transformations essentielles s'arrêtent et seules les actions de la chaleur et ou de la pression modifieront la nature des charbons.

* Suivant les auteurs ces composés humiques pourraient provenir des celluloses qui sont les premières à se décomposer, ou de la lignine, ou même de la cutine (DUPARQUE). [3]

1 - 1 - 3 CLIMAT A L'EPOQUE DES FORMATIONS DES DEPOTS

D'après les observations essentiellement botaniques de H. POTONIE, [3] les bassins houillers dont leurs formations remontent au Carbonifère (250 à 300 millions d'années avant notre ère), se constituaient dans des conditions climatiques tropicales. Néanmoins les flores de crétacé, dans certaines régions et celles du tertiaire, indiquent un climat différent aux saisons bien marquées.

L'annexe I (p 96) relate les principales formations charbonneuses, leur âge, ainsi que la faune et la flore correspondante.

D'autres théories apparaissent à ce sujet mais il est vraisemblable que les plantes des marécages carbonifères vivaient "les pieds dans l'eau et la tête au soleil".

1 - 2 - ORIGINE DE L'ACCUMULATION VEGETALE

L'origine de l'accumulation végétale dans les bassins houillers trouve une explication dans les deux théories principales suivantes : [3] : [67]

- Théorie de l'origine autochtone : ou accumulation de végétaux sur le lieu même de leur développement.

- Théorie de l'origine allochtone : ou accumulation de végétaux ayant subit un transport.

I - 2 - 1 THEORIE AUTOCHTONE

La houille s'est formée dans de très grands bassins terrestres, les uns lacustres (bassins LIMNIQUES) les autres marécages littoraux (bassins PARALIQUES).

A la suite de crues importantes ou d'affaissement du sol, ces marécages ont été recouverts par d'importantes hauteurs d'eau, interrompant la croissance de la végétation. Puis des dépôts détritiques ou argileux ont recouvert les matières végétales.

Un rétablissement des conditions initiales entraîne de nouveau la formation d'un sol de végétation et la poursuite de ce cycle.

I - 2 - 2 THEORIE ALLOCHTONE

Les alluvions des cours d'eau (argiles, sables, galets et débris végétaux) s'accumulent dans les zones d'eau calmes et ces débris sont triés par nature d'organes (feuilles, débris de tiges, écorces...) en couches différentes par suite d'une séparation par flottage.

Les débris végétaux constituant les couches de houilles sont généralement réduits à l'état de petits fragments, de plus ils sont triés et classés par nature de tissus et grosseurs de ces fragments.

Des intercalations de sédiments d'origine marine se rencontrent dans les couches de houille.

Actuellement cette seconde théorie est celle admise le plus généralement en association avec la théorie autochtone.

1 - 3 CONDITIONS DE SEDIMENTATION DES CHARBONS [3] ; [67]

Les charbons sont stratifiés en couche plus ou moins importantes (1 cm à quelques mètres) et souvent régulières. Dans les bassins paraliques les couches de houilles sont souvent régulières, nombreuses et peu épaisses.

Dans les bassins limniques au contraire, les couches sont souvent nombreuses, irrégulières mais parfois épaisses. Dans tous les cas on distingue un MUR et un TOIT.

Le MUR est la formation sédimentaire qui supporte la couche de charbon alors que le TOIT c'est celle qui la recouvre.

Le TOIT est souvent constitué de schistes fins de couleur sombre, bien stratifiés. Le mur au contraire est hétérogène, c'est l'ancien sol de végétation (Fig 1).

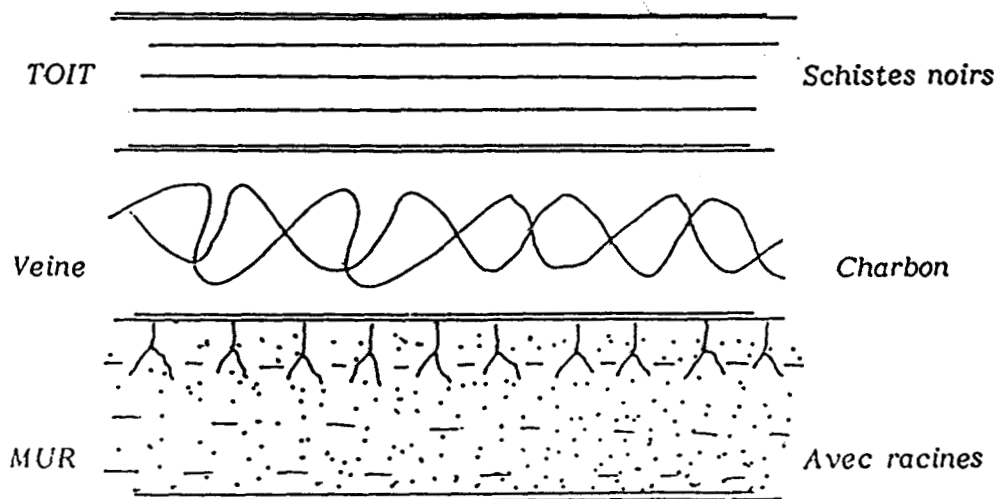


FIG. 1

Certaines irrégularités des couches de houille sont toutefois dues à la destruction et à l'entraînement par érosion.

Cette rythmicité de la sédimentation est liée au phénomène de subsidence qui correspond à un enfoncement par saccades du fond des bassins sédimentaires. Cet enfoncement est compensé non pas en profondeur mais en surface par l'apport de dépôts détritiques sur lesquels la forêt se réinstalle avant d'être détruite par un nouvel effondrement (Fig 2).

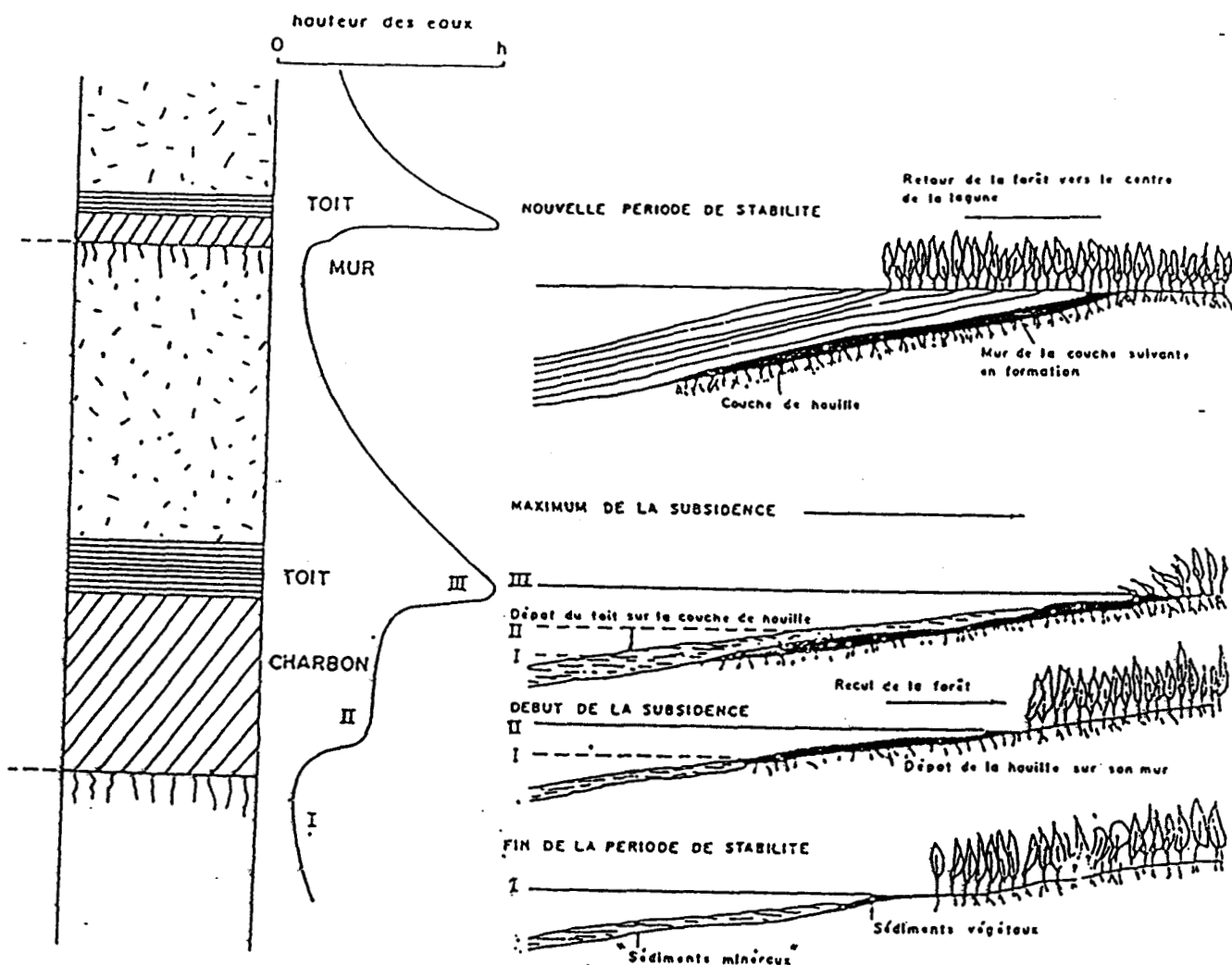
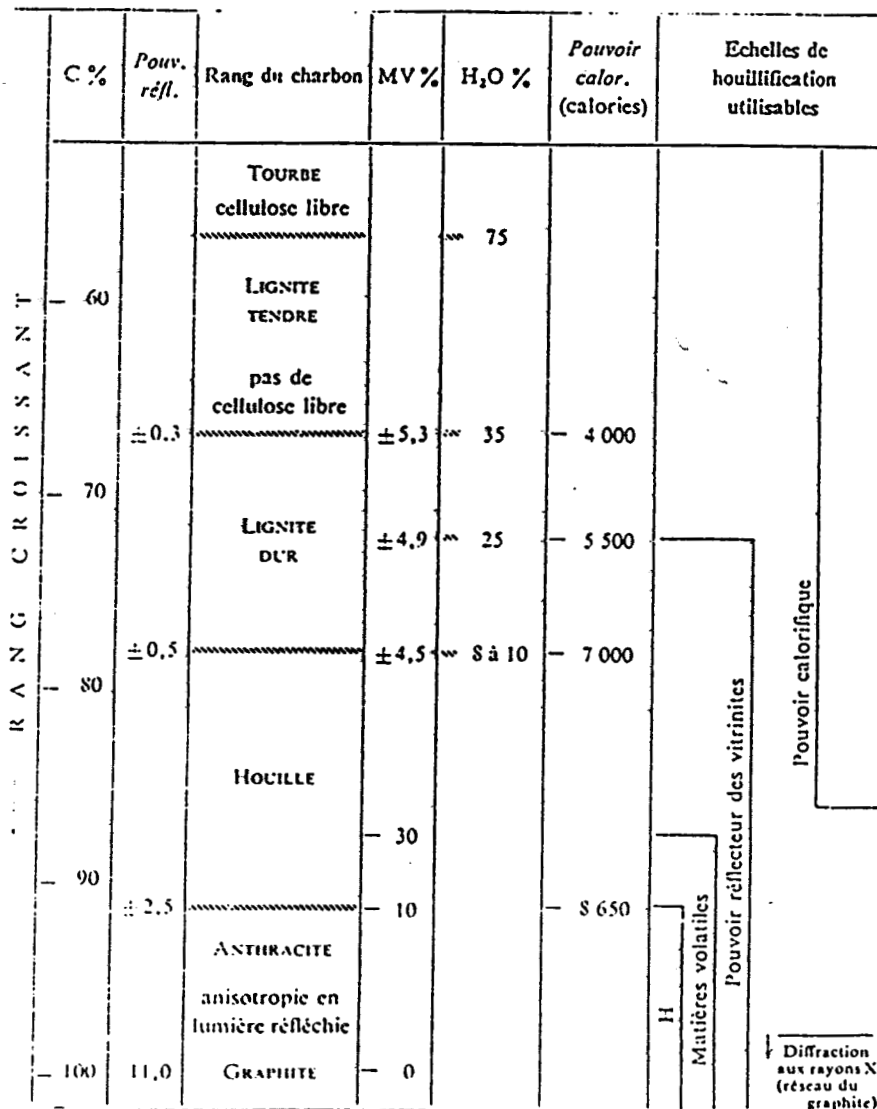


FIG. 2 : Cyclothème des terrains carbonifères du Nord de la France
(d'après P. Pruvost, 1951) [3]

Le Mur des Veines de houille est un ancien sol de végétation forestière et possède de nombreuses radicelles de stigmaria alors que le Toit est finement stratifié et tient des empreintes d'organes aériens de plantes et quelques bois charriés. Le charbon représente le début de la phase de sédimentation qui accompagne une transgression (II) des eaux sur les forêts bordières ; cette transgression atteignant son maximum : (III) lors du dépôt des sédiments du toit. Au total, une sorte de rythme de transgressions suivies de comblements puis d'effondrements amenant de nouvelles transgressions impose une répétition du thème mur-veine-toit. Comme dans le bassin houiller, on compte 400 sols de végétation sur une hauteur totale de 2 000 m de sédiments, ce sont donc 400 transgressions survenant dans un bassin s'effondrant de 5 m seulement à chaque spasme subsident.

I - 4 - LA HOUILLIFICATION [3]; [67]

Les différentes étapes de transformation de la "bouillie végétale" originelle se nomme la houillification et l'on désigne par RANG d'un charbon le degré de houillification atteint par celui-ci. Il y a dans le processus une augmentation de la teneur en carbone, ainsi que du pouvoir calorifique (jusqu'à un certain stade), par contre une diminution de la teneur en matières volatiles, en hydrogène et en oxygène (Fig 3 et Fig 4).



xxxxx Limites relativement peu précises

FIG. 3 : Schéma des grands stades de houillification et de chacune des échelles de rang sur la base de la vitrinite (D'après PATTEISKY et TEICHMÖLLER)[3]

	C	H	N	O
Bois	49,65	6,23	0,92	43,20
Tourbe	55,44	6,28	1,72	36,56
Lignite	72,95	5,24	1,31	20,50
Charbon bitumineux	84,24	5,55	1,52	8,69
Anthracite	93,50	2,81	0,97	2,72

FIG. 4

Composition moyenne des combustibles (d'après CLARKE) [3]



1 - 5 - LES DIFFERENTES CATEGORIES DE COMBUSTIBLES

On distingue plusieurs types de sédiments organiques d'origine végétale : la tourbe, le lignite, la houille, l'antracite et le graphite. [17] ; [18] ; [35] ; [36] ; [58] ; [67].

1 - 5 - 1 LA TOURBE

Est un sédiment brun très riche en eau, constitué par l'accumulation compacte de débris végétaux. Il s'en forme dans d'actuelles prairies marécageuses appelées tourbières.

La végétation de ces tourbières (mousses, cypéracées) s'entretient d'elle-même, par décomposition dans l'eau, constituant ainsi les couches de tourbe.

1 - 5 - 2 LE LIGNITE

De teinte brune à noire mate est compact, parfois fibreux ou feuilleté. Comme la tourbe, il a été formé par des débris végétaux variés, mais il est moins riche en eau, par contre sa teneur en carbone est plus élevée.

1 - 5 - 3 LA HOUILLE

Est également formée de débris végétaux, mais correspondant à un stade d'évolution de la matière organique beaucoup plus poussé, comme en témoigne l'existence d'une cassure brillante.

1 - 5 - 4 L'ANTHRACITE

Est une variété supérieure de la houille. Plus massive, plus homogène, avec une teneur en matières volatiles réduite ; elle présente une dureté plus grande.

1 - 5 - 5 LE GRAPHITE

Est quant à lui du carbone d'origine végétale, presque pur.

On admet généralement que ces catégories de combustibles qui ont tous pour origine la décomposition de débris végétaux sous l'eau, correspondent à des stades successifs d'évolution de la matière organique végétale.

Cette évolution se fait sous l'effet de pressions et/ou de températures croissantes, dans le sens d'un appauvrissement en matières volatiles et en produits oxydés. Il en résulte un enrichissement relatif important en carbone. Le facteur temps joue un rôle important aussi, mais pas toujours net : un charbon sous pression et température faible pendant longtemps peut être très évolué, un charbon sous pression et température élevées pendant un temps court peut être aussi évolué. C'est un jeu de 3 facteurs (la pression et la température étant liés).

Le graphite, carbone presque pur, correspond bien au stade le plus évolué de cette transformation.

I - 6 - CONSTITUTION DES HOUILLES

I - 6 - 1 CONSTITUANTS MACROSCOPIQUES

[17] ; [18] ; [35] ; [36] ; [67]

Ce n'est qu'en 1919 que Mrs M.C. STOPES a défini clairement 4 constituants essentiels des houilles :

Le Fusain : qui se présente en lentilles aplaties parallèles au plan de stratification. Sa structure est fibreuse. Il est pulvérulent et rappelle le charbon de bois.

Le Durain : qui est compact, à cassure mate et granuleuse. Il est dur. Il est formé de lits parallèles au plan de stratification. Il est constitué en majeure partie de spores et fragments de cuticules peu transparentes.

Le Clarain : qui est compact, à cassure unie, légèrement brillante ; sa structure est vaguement stratifiée, mais il forme des lits épais parallèles au plan de stratification. Il est beaucoup plus transparent et présente aussi des débris de tissus variés, surtout cutiles et spores.

Le Vitrain : qui est compact, homogène, sans stratification visible ; sa cassure est vitreuse, brillante, conchoïdale. Il est transparent et homogène avec de rares débris tels que spores.

1 - 6 - 2 CONSTITUANTS MICROSCOPIQUES

[17] ; [18] ; [35] ; [36] ; [67]

Le développement des techniques d'investigation microscopique soit en lumière transmise, soit par réflexion a permis d'identifier de façon plus précise encore les éléments constitutifs d'origine végétale des charbons, assimilés aux éléments minéraux des roches éruptives ou sédimentaires : ce sont les macéraux. Le terme macéral provenant de macération (des tissus végétaux) et de minéral, c'est M. C. STOPES qui a proposé dès 1935 de désigner ces constituants sous ce nom.

Macéral trouvant son origine dans le bois

La Vitrinite : principal macéral, c'est le plus riche en oxygène. Sa couleur est grise en lumière réfléchie. Elle porte le nom de "Télinite" lorsqu'elle présente des traces de structure cellulaire et de "collinite" dans le cas contraire.

La Fusinite : tissus ligneux à structure cellulaire bien visible, de couleur noire mate, elle est dure mais fragile.

La Semi Fusinite : structure cellulaire difficilement reconnaissable et qui possède un pouvoir réflecteur intermédiaire entre celui de la fusinite et celui de la vitrinite.

Macéral trouvant son origine dans les plantes

Il est constitué de l'ensemble des cutines, des éxines de spores et grains de pollen, ces cuticules de feuilles, des algues.

De couleur sombre en lumière réfléchie et ayant une forte teneur en hydrogène, il porte d'exinite qui regroupe la sporonite, la cutinite, l'alganite, la résinite, la sclérotinite (sclérote de champignons).

Macéral n'ayant pas de trace spécifique de tissu végétal

La Micrinite : Totalemment sans structure : provenant vraisemblablement d'une boue humique. Pratiquement opaque en lumière transmise.

Fusinite, semi fusinite et micrinite sont regroupés sous le terme de "Inertinite" (car ils se trouvent être inertes à la cokéfaction, à noter toutefois que la semi fusinite ne l'est pas toujours).

Selon les propriétés pétrographiques et technologiques (pouvoir cokéfiant en particulier) les macéraux sont rassemblés en trois groupes. Ce sont la vitrinite (symbole V), l'exinite (symbole E) et l'inertinite (symbole I) (Fig 8).

MACERAUX	GROUPES de MACERAUX
Collinite Télinite	Vitrinite (V)
Sporinite Cutinite Alginite Résinite	Exinite (E)
Sclérotinite Fusinite Semi Fusinite Micrinite	Inertinite (I)

FIG. 8 : Les macéraux des charbons

En annexe I (p 97) on trouvera quelques clichés des principaux macéraux extraits des annales de la Société Géologique du Nord (tLXXXIX).

I - 7 - CLASSIFICATION DES CHARBONS

De multiples classifications ont été proposées afin de caractériser chacune des variétés de charbon. [3] ; [17] ; [18] ; [35] ; [36] ; [67]

Nous pouvons néanmoins en retenir quatre :

- chimique
- biologique
- pétrographique
- commerciale

I - 7 - 1 LA CLASSIFICATION CHIMIQUE :

Basée sur des données fournies par une analyse sommaire :

- perte en eau
- détermination des matières volatiles
- carbone fixe
- poids spécifique.

I - 7 - 2 LA CLASSIFICATION BIOLOGIQUE :

Basée sur la nature des organismes qui ont joué un rôle essentiel dans la formation des charbons.

I - 7 - 3 LA CLASSIFICATION PETROGRAPHIQUE :

Qui repose sur l'étude de l'état de transformation plus ou moins avancé des débris organiques.

I - 7 - 4 LA CLASSIFICATION COMMERCIALE :

Qui se doit d'être facile d'utilisation et qui reprend des caractéristiques des trois précédentes.

Jusqu'en 1800, on se contentait de distinguer les charbons d'après leur aspect : charbon brillant, noir, brun.

En 1826, KASTEN, ayant étudié la consistance du résidu de charbon chauffé à l'abri de l'air propose les groupes suivants :

- Les sandkohlen (résidu pulvérulent)
- Les sinterkohlen (résidu fritté)
- Les backendekohlen (résidu fondu, compact) [3] ; [67]

- En 1837 apparut la première tentative de classification scientifique basée sur la teneur en oxygène (REGNAULT) [3] ; [67]

- En 1875 apparaissent les classifications de REGNAULT, GRUNER et SCHONDORFF basées sur l'indice des matières volatiles (l'Indice des Matières Volatiles est défini comme étant la perte de poids subie lors d'un essai de carbonisation. Il varie en sens inverse de rang). [3] ; [67]

- En 1906, première classification à partir de pouvoir calorifique (CAMP-BELL) (le pouvoir calorifique est la quantité de chaleur dégagée par la combustion d'1 kg de charbon). [3] ; [67]

- En 1913, au Congrès Géologique International de TORONTO, proposition d'une synthèse de différents systèmes existants (Fig 9). [3] ; [67]

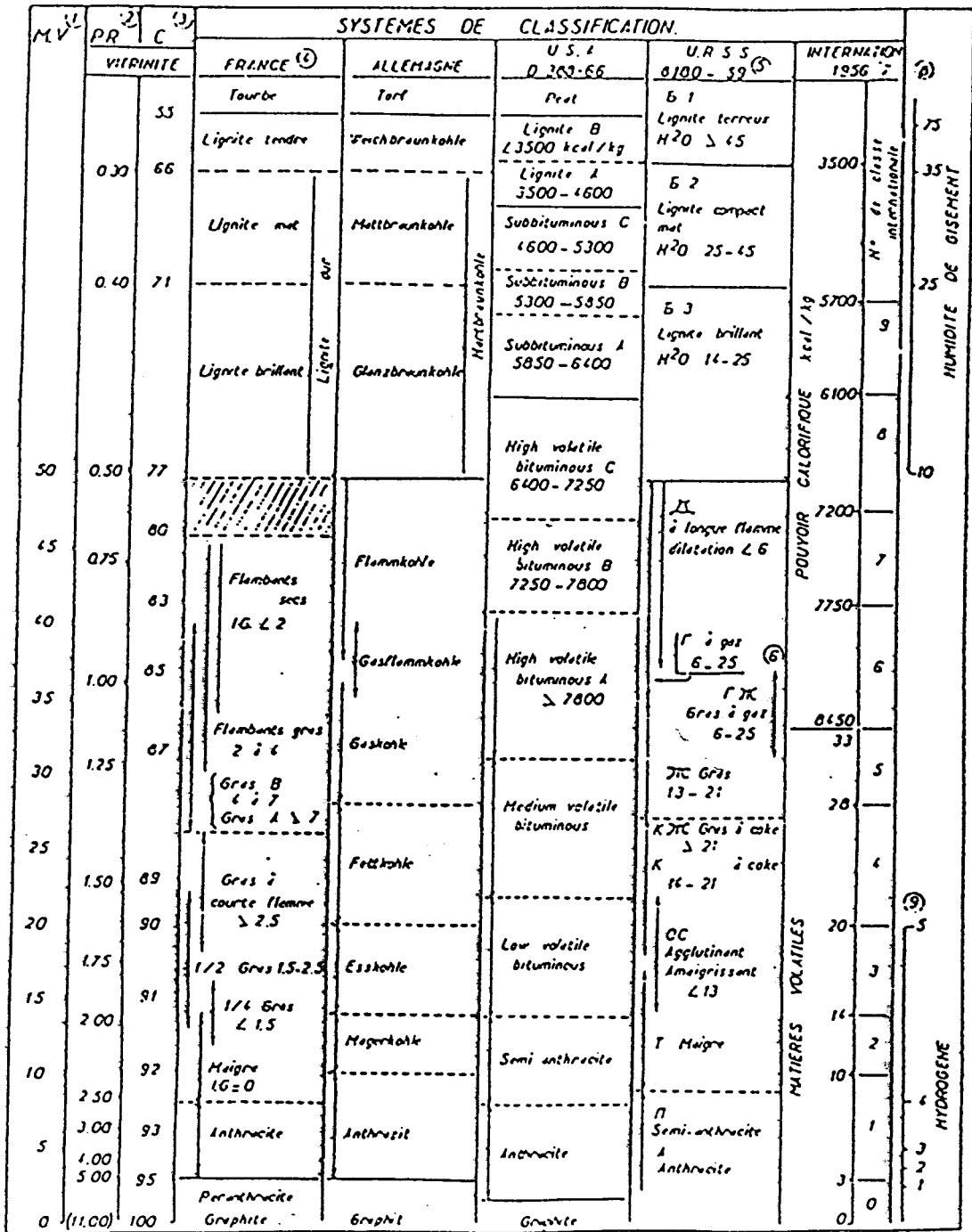
MV ↑ 30 à 40	D ₂ lignites au sens strict D ₁ lignites et charbons subbitumineux
26 à 35	C Carrel - coals B ₃ Houilles bitumeuses à faible teneur en carbone fixe FR : 2,5 à 3,3
12 à 26	B ₂ Houilles bitumeuses moyennes FR : 1,2 à 7
12 à 15	B ₁ Houilles anthraciteuses et bitumeuses à forte teneur en carbone fixe FR : 4 à 7
7 à 12 3 à 5	A ₂ Houilles semi anthraciteuses FR : 7 à 12 A ₁ Anthracites FR > 12



FIG. 9 : Classification de TORONTO

D'autres classifications à caractère beaucoup plus scientifique ont vu le jour : classifications de STOPES, DUPARQUE, SEYLER. Toutefois, celle en usage actuellement est la classification internationale de 1956 où les charbons sont répartis en classes (fonction du rang), en groupes (fonction du pouvoir agglutinant) et en sous groupes (fonction du pouvoir cokefiant) (Fig 10 et 11) [3] ; [67]

Nous trouverons en annexe I (p101 à 102) différents types de classifications commerciales encore utilisées.



- (1) Matières volatiles (960°) sur charbon pur et sec
- (2) Pouvoir réfecteur, courbe ALPERN 1969
- (3) Carbone d'après PATTEISKY et TEICHMÜLLER 1957, KÖTTER 1960
- (4) Norme NF 10001 (Nouvelles)
- (5) Norme du Donetsk (Nouvelles)
- (6) Norme du Kouznets (Nouvelles)
- (7) d'après la classification de Genève
- (8) d'après PATTEISKY et TEICHMÜLLER 1957
- (9) d'après ERGUN et al 1960, FRANCIS 1961

FIG. 10: Classification d'un charbon selon divers indices



G R O U P E S (déterminés d'après le pouvoir agglutnant)		N O M B R E S C O N V E N T I O N N E L S Le premier chiffre du nombre conventionnel indique la classe déterminée d'après l'indice M.V. (charbons contenant jusqu'à 33 % de M.V.) ou par paramètre du pouvoir calorifique (charbons contenant plus de 33 % de M.V.) Le deuxième chiffre indique le groupe, déterminé d'après le pouvoir agglutnant Le troisième chiffre indique le sous-groupe, déterminé d'après le pouvoir cokéfiant										S O U S - G R O U P E S (déterminés d'après le pouvoir cokéfiant)					
N° du Groupe	Paramètre de détermination du groupe (au choix)	Indice de gonflement au creuset	Indice Roga										N° du sous groupe	Paramètre de détermination du sous-groupe (au choix)	Essai dilatométrique	Essai Gray-King	
3	> 4		> 45						435	535	635		5	> 140	> G8		
						334			434	534	634		4	> 50 - 140	G5 - G8		
						333			433	533	633	733	3	> 0 - 50	G1 - G4		
						332	322		432	532	632	732	2	< 0	E - G		
						(*)	323		423	523	623	723	3	> 0 - 50	G1 - G4		
2	2 1/2 - 4		> 20 - 45						422	522	622	722	2	< 0	E - G		
									421	521	621	721	1	contraction seulement	B - D		
1	1 - 2		> 5 - 20					212	412	512	612	712	2	< 0	E - G		
									411	511	611	711	1	contraction seulement	B - D		
0	0 - 1/2		0 - 5					200	400	500	600	700	0	ne se ramollissent pas	A		
								100 A B	300	400	500	600	900				
								0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
									>3-10	>10-14	>14-20	>20-28	>28-33				
									>3-10	>10-14	>14-20	>20-28	>28-33				
									65	70	75	80	85	90	95	100	

C L A S S E S
(déterminés d'après l'indice de matières volatiles (charbons contenant jusqu'à 33 % de M. V. ou par paramètre de pouvoir calorifique (charbons contenant plus de 33 % de M. V.))

332 a 14 - 16 % de M. V.
 332 b 16 - 20 % de M. V.
 Pouvoir calorifique supérieur de produit humide, en kcal/kg. Humidité correspondant à l'eau de rétention dans une atmosphère à 30° et 96 % d'humidité.

FIG. 11 : Classification internationale de 1956

CHAPITRE II
CARACTERISTIQUES PHYSIQUES
ET
MECANIQUES DES CHARBONS

I - INTRODUCTION

Les charbons qui ont été mis à notre disposition se présentent sous la forme d'un matériau granulaire tout venant 0 - 40 mm. Ce sont essentiellement des charbons importés. On leur attribue le nom du bateau qui les transporte, le nom du port de déchargement ou encore celui du puits d'extraction.

Sous la même appellation, ils ne possèdent toutefois pas toujours des caractéristiques rigoureusement identiques (taux d'humidité, pouvoir calorifique, taux en cendres...) excepté certains d'entre eux, comme le METIKI, pour lesquels un cahier des charges très précis a été fixé, tenant compte de leur utilisation particulière (en cimenterie par exemple).

Le tableau Fig. 1 nous indique les références et les provenances de certains charbons que nous avons testés.

PAYS ou REGION d'ORIGINE	NOM du CHARBON
Afrique	Bostwana
Afrique du Sud	Ermelo
Amérique	Ville du Havre
	Metiki
Australie	Blair Athol
France (Lorraine)	La Houve
	Wendel 2
	Wendel 3



FIG. 1 : Provenance de nos charbons

Trois des charbons ainsi caractérisés, proviennent de l'hémisphère Sud, les autres de l'hémisphère Nord, parmi lesquels un charbon entièrement fabriqué : le Metiki.

Ce charbon provenant des Etats Unis est en fait un mélange de différents charbons bien spécifiques et qui finalement lui confèrent des caractéristiques particulières nécessaires à son utilisation en cimenterie : à savoir un taux de cendres constant ainsi qu'un certain pouvoir calorifique. [45] ; [48] ; [49]

Les analyses macérales (Fig. 2) ont été effectuées selon les conditions habituelles du laboratoire du CERCHAR sur 500 points de charbon. [17] ; [18] ; [35] ; [36] ; [67]

Référence des charbons	% VOLUMIQUE			
	Vitrinite	Exinite	Inertinite	Matières Minérales
Blair Athol	33	2,6	61,6	2,8
Bostwana	37	7,3	52,7	3
Ermelo	47	4	45	4
La Houve	60	7,8	4,4	27,8
Ville du Havre	60	10,2	19,6	10,2
Wendel 2	64,2	3,2	10,4	22,2
Wendel 3	59,2	3,4	8,0	29,4

FIG. 2 : Composition Macérale des charbons étudiés



Deux remarques sont à formuler sur ces premiers résultats. D'une part, l'Inertinite semble être beaucoup plus abondante dans les charbons de l'hémisphère Sud et d'autre part les trois charbons lorrains et le "Ville du Havre" contiennent énormément de matières minérales (essentiellement argiles et carbonates).

Les résultats des analyses par fluorescence X (Fig. 3) nous montrent que les rapports des hauteurs de pic du Silicium et de l'Aluminium restent à peu près constants : les éléments Si et Al étant combinés entre eux pour donner des argiles (surtout de la kaolinite). [1]

Référence des charbons	Pic Si (mm)	Pic Al (mm)	$\frac{\text{Si}}{\text{Al}}$
Blair Athol	43	9	4,8
Bostwana	45	9	5
Ermelo	42	10	4,2
La Houve	120	27	4,4
Metiki	30	7	4,3
Ville du Havre	90	16	5,6
Wendel 2	108	22	4,9
Wendel 3	82	15	5,5

FIG. 3 : Recherche des éléments Al et Si en fluorescence X

Les charbons provenant de l'hémisphère Sud contiennent eux peu d'argile.

Des proportions deux à trois fois plus importantes sont à noter pour les autres charbons, venant de l'hémisphère Nord, excepté le Metiki qui, répétons le, est un charbon entièrement reconstitué.

II - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES DES CHARBONS

II - 1 - CONSTITUTION DES CHARBONS

[4] ; [6] ; [8] ; [15] ; [22] ; [31] ; [53]

Nous pouvons considérer ce matériau comme étant un mélange de 3 phases :

- une phase solide constituée de grains (macéraux + minéraux),
- une phase liquide constituée d'eau qui comble partiellement les vides existants entre les grains et dans les particules solides,
- une phase gazeuse constituée essentiellement d'hydrocarbures (méthane, propane...) et d'air comme l'a montré l'analyse chromatographique en phase gazeuse (Fig. 4) [47]

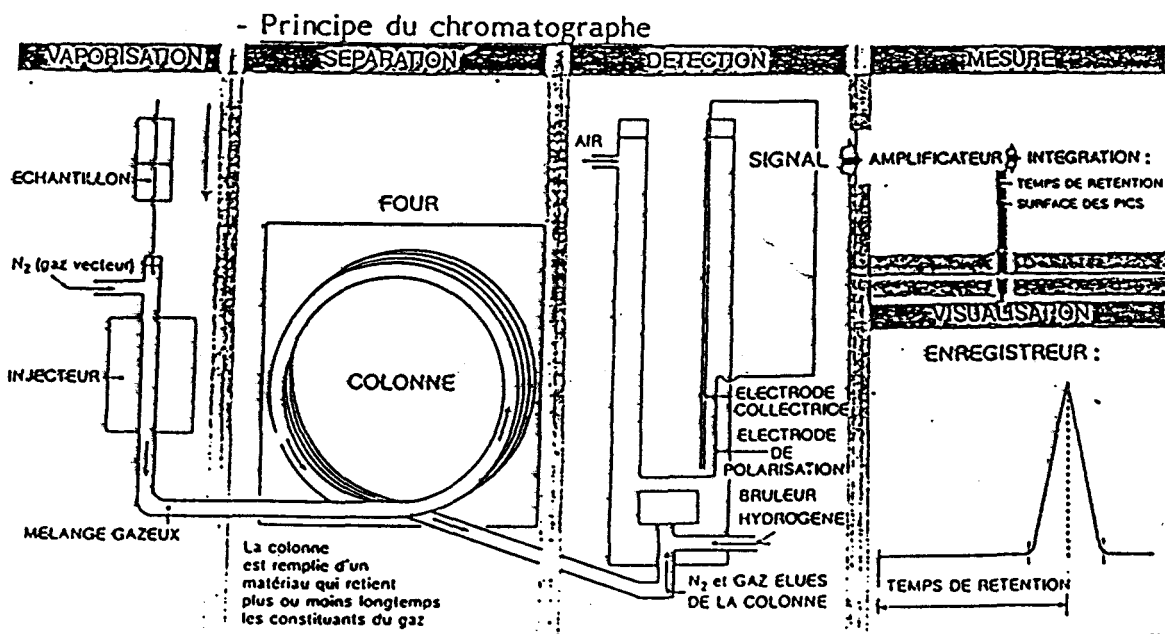


FIG. 4 : Principe du chromatographe en phase gazeuse

L'échantillon est introduit en tête d'une colonne où il peut être vaporisé s'il est liquide.

Les différents constituants gazeux sont alors entraînés à travers la colonne par un gaz vecteur appelé phase mobile. La colonne est un tube rempli d'un support poreux imprégné d'un liquide appelé phase stationnaire. Son rôle est de retenir plus ou moins longtemps les différents composés du mélange à analyser. Tout le long de cette colonne il s'établit, pour chaque composé, un équilibre dynamique entre la fraction de composé dissout dans la phase stationnaire et celle présente dans la phase mobile.

Les constituants ainsi séparés sont mis en évidence en sortie de colonne par un détecteur.

Il délivre un signal électrique se traduisant, sur un enregistreur, par

un pic dont la surface ou la hauteur est proportionnelle à la quantité de composé injecté.

Le temps écoulé entre l'injection et l'apparition du sommet du pic, appelé temps de rétention, caractérise un composé pour des conditions opératoires données. Le nombre de pics étant égal au nombre de constituant du mélange initial.

II - 2 - CARACTERISTIQUES PHYSIQUES MESURABLES

II - 2 - 1 - Représentation symbolique d'un volume élémentaire de charbon (Fig.5)

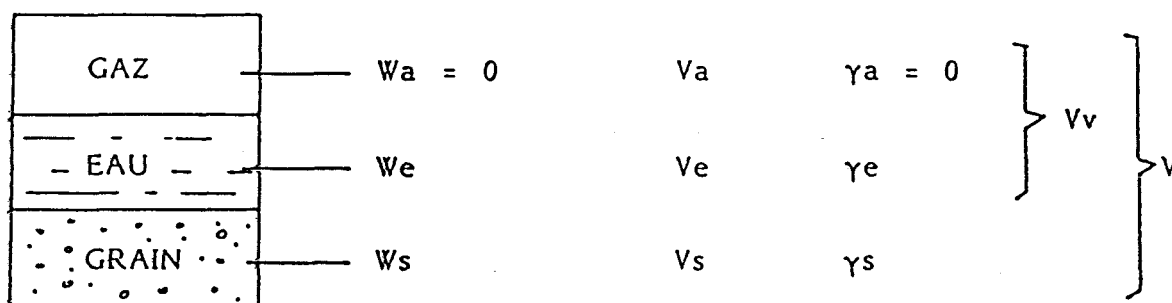


FIG. 5

II - 2 - 2 - Définition des grandeurs mesurables

II - 2 - 2 - 1 - Teneur en eau : W [46]

C'est le rapport du poids de l'eau au poids des grains solides.

Il convient dans cette définition de prendre en compte l'eau qui s'est évaporée après séchage de l'échantillon en étuve à une température légèrement supérieure à 100° C et ceci jusqu'à poids constant.

$$W \% = \frac{W_e}{W_s} \times 100$$

Les teneurs en eau mesurées sur nos charbons se trouvent rassemblées dans les tableaux (Fig. 6) en ce qui concerne les tout-venant et (Fig. 7) pour la coupure 0/4 mm (fraction granulométrique utilisée pour tous nos essais en laboratoire compte tenu de la taille de notre matériel). Les valeurs mesurées sont très dispersées car elles dépendent des conditions de stockage (généralement à l'air libre).

II - 2 - 2 - 2 Poids volumique des grains : γ_s [57]

C'est le rapport du poids des grains au volume qu'ils occupent.

Pour cela on utilise un picnomètre. Il s'agit d'un flacon de volume V_p connu et de poids W_1 lui aussi connu lorsqu'il est rempli de liquide (généralement de l'eau).

Ensuite on y introduit un poids W_s de matériau sec et on complète avec le liquide ce qui nous donne W_2 .

$$V_p = \frac{W_1}{\gamma_e}$$

$$W_2 = W_s + (V_p - V_s) \gamma_e$$

$$W_2 = W_s + W_1 - V_s \gamma_e$$

$$V_s = \frac{W_1 + W_s - W_2}{\gamma_e}$$

$$\text{donc } \gamma_s = \frac{\gamma_e W_s}{W_1 + W_s - W_2} \quad \text{en g/cm}^3$$

La figure 8 répertorie les résultats des poids volumiques des charbons.

Nous pouvons constater une assez bonne homogénéité dans les moyennes obtenues ($1,52 \text{ g/cm}^3 \pm 10 \%$)

Seul le La Houve sort de cette fourchette. Un examen macroscopique rapide de ce matériau, laissait d'ailleurs présager, par la présence de grains schisteux et gréseux, à la fois une dispersion et des valeurs élevées.

Référence	Teneurs en Eau en%	Moyennes en %
Blair Athol	24 - 23,6	23,8
Bostwana	5,2 - 5,6	5,4
Ermelo	9,6 - 9,7 - 11,8 - 11,6 - 11,5 - 10,4 - 10,2 - 9,6	10,6
La Houve	10,5 - 10,5 - 10,4 - 11,5 - 10,3 10,9 - 10,3 - 10,4 - 10 - 9,7 -	10,4
Metiki	10,1 - 9,9	10
Ville du Havre	11,8 - 12,3 - 13,9 - 14,2 - 11,9 - 11,2	12,6
Wendel 2	8 - 8,5 - 7,8 - 8,2	8,1
Wendel 3	7,9 - 8,4 - 7,1 - 7,2 - 7,5 - 7,5	7,5

FIG. 6 : Teneurs en Eau des Charbons tout venant

Référence	Teneurs en %	Moyennes en %
Blair Athol	29,6 - 29,8	29,7
Bostwana	7,3 - 7,7 - 7,7	7,6
Ermelo	12,8 - 13,6 - 13,5	13,3
La Houve	14,3 - 15,1 - 15,1 - 13,8 - 13,8	14,4
Metiki	7,2 - 11,6 - 11,5	10,1
Ville du Havre	13,2	13,2
Wendel 2	12 - 10,2 - 10,2	10,8
Wendel 3	8,7 - 8,5 - 9,9 - 9,6 - 9,3	9,2

Référence	Poids volumique γ_s (en g/cm ³)	γ_s moyen (en g/cm ³)
Blair Athol	1,57 - 1,53	1,55
Bostwana	1,53 - 1,55	1,54
Ermelo	1,56 - 1,55	1,55
La Houve	1,99 - 1,58	1,79
Metiki	1,52 - 1,41	1,47
Ville du Havre	1,50 - 1,46	1,48
Wendel 2	1,68 - 1,68	1,68
Wendel 3	1,56 - 1,55	1,55

FIG. 8 : Poids Volumique des Charbons



II - 2 - 2 - 3 Dimension des grains [41] ; [52] ; [53] ; [61]

Le squelette solide d'un charbon est formé de grains de dimensions très variables pouvant aller du micron à quelques centimètres.

La granulométrie est la mesure de la distribution des dimensions des grains solides de l'échantillon. Les grains n'ayant pas de forme géométrique simple, nous devons faire appel à une définition empirique : la dimension d'un grain de charbon est égale au côté de la maille du tamis le plus fin (maille carrée) par lequel il a pu passer.

Pour les particules inférieures à 80 microns, les forces de surface inter-particulaires sont trop importantes (cohésion) et les grains tendent à s'agglomérer, on procède alors à la sédimentométrie.

Pour cette fraction granulométrique, nous avons utilisé le "granulomètre" au laser du CERCHAR dont le principe est le suivant :

.../...

Un laser de faible puissance éclaire en faisceau parallèle une cuve contenant l'échantillon en suspension dans un liquide. Le faisceau sortant de la cuve est focalisé par un système optique convergent. On analyse alors la répartition de l'énergie lumineuse dans le plan focal du système à l'aide d'un ensemble de détection à multicellules.

Les données fournies par les cellules sont traitées par un ordinateur incorporé (Fig. 9).

GRANULOMETRE 715 E238
LA HOUE

R

1	004,8 %
1,5	006,4 %
2	012,1 %
3	021,8 %
4	030,7 %
6	042,1 %
8	050,8 %
12	059,3 %
16	067,5 %
24	075,8 %
32	082,5 %
48	091,9 %
64	093,9 %
96	098,4 %
128	099,2 %
192	100,0 %

FIG. 9 : Résultats obtenus sur le granulomètre au laser

Les courbes granulométriques globales de la fraction 0/4 mm ou sédimentométriques sont obtenues en portant en abscisse le diamètre des grains et en ordonnées les proportions en pourcentage du poids total des grains inférieures (le passant) ou supérieures (refus) à un diamètre donné. (voir annexe II - p 104 à 112)

Quelques résultats particuliers obtenus sur les matériaux tout venant sont consignés dans le tableau Fig. 10.

Repère	% de Passant		
	<80 microns	<16 microns	<4 mm
Blair Athol	8	5	35
Bostwana	1	0,5	56
Ermelo	6	3	43
La Houve	11	7,3	46
Metiki	12	6,3	73
Ville du Havre	13,5	8	46
Wendel 2	8	4,5	45
Wendel 3	5	7,3	45

FIG. 10 : Caractéristiques particulières granulométriques

Il faut remarquer que le matériau étant très friable, nous avons conduit nos essais de façon identique : quantité et temps de séchage en étuve similaires, temps d'agitation et quantité agitée sur tamiseuse identiques, ceci après séparation des éléments inférieurs à 80 microns par voie humide.

Nous pouvons constater sur le cliché fig. 11 que les morceaux de charbon lavés (partie droite de la photo) sont assez anguleux, parfois fracturés (certainement dû aux libérations des contraintes internes et chocs provenant des diverses manipulations), mais le matériau en vrac au contraire paraît être plus arrondi : une matrice fine adhère à chaque petit bloc.

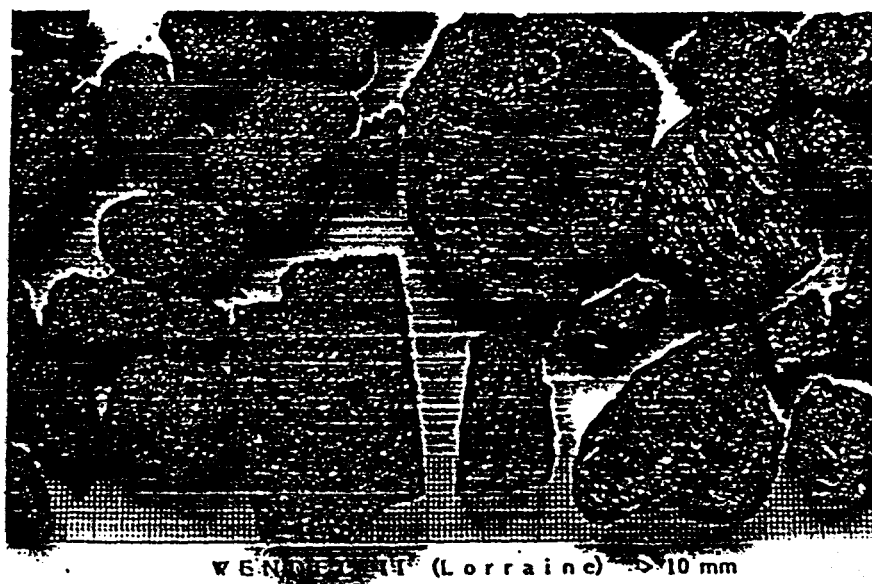


FIG. 11 : Photo d'un charbon

II - 2 - 2 - 4 - Valeurs au bleu de méthylène [42] ; [50]

L'essai au bleu de méthylène permet de mesurer la capacité d'absorption ionique des sols. La présence connue de particules fines argileuses dans les charbons nous a conduit à mettre en oeuvre cet essai nouveau.

La manipulation consiste à ajouter progressivement au matériau en suspension dans de l'eau une quantité de bleu de méthylène connue et d'effectuer après chaque ajout un test (dit de la tache) qui nous indique le moment où la solution est saturée (apparition d'une auréole bleutée).

La quantité de bleu de méthylène rapportée à la quantité et à la fraction granulométrique analysée nous donne des valeurs dites de bleu (Fig. 12) qui

traduisent les activités plus ou moins importantes de nos matériaux.

Repère	Volume de bleu de méthylène (en cm ³)	Valeur de bleu
Blair Athol	27	0,45
Bostwana	1,5	0,025
Ermelo	5	0,083
La Houve	15,5	0,26
Metiki	2,5	0,041
Ville du Havre	18	0,30
Wendel 2	6,5	0,11
Wendel 3	4	0,066

FIG. 12 : Valeurs de bleu de méthylène

Une nette dispersion apparaît entre charbons ; mais les valeurs obtenues sont néanmoins proportionnelles aux pourcentages de matières minérales contenus dans nos échantillons.

II - 2 - 2 - 5 - Equivalent de sable [51]

C'est un essai empirique ne nécessitant qu'un appareillage élémentaire et permettant de déduire avec précision des seuils de propreté.

Il consiste à mettre en suspension le matériau dans une solution et à séparer par lavage les grains des éléments beaucoup plus fins.

Après un temps de repos, les hauteurs respectives des éléments propres et du flocculat (éléments fins polluants) sont mesurées. Leur rapport nous donne les valeurs d'équivalent de sable (Fig. 13) qu'il est nécessaire de rapporter aux valeurs précédemment citées pour mieux connaître le matériau.

Repère	Equivalent de Sable	Teneur en eau de l'essai (%)
Blair Athol	26,4	25,8
Bostwana	78,8	7,4
Ermelo	59	8,4
La Houve	19,9	11,5
Metiki	39,1	9,5
Ville du Havre	23	6,6
Wendel 2	36,9	6,2
Wendel 3	42,9	7,8

FIG. 13 : Equivalents de sable



III - CONCLUSIONS SUR LES PROPRIETES PHYSIQUES DES CHARBONS

La plupart des résultats ainsi trouvés sur les différents charbons nous conduisent à penser qu'ils ressemblent assez fortement à un matériau dit "PULVERULENT". En effet la quantité de particules fines (<80 microns) est assez faible, les grains ont une forme assez anguleuse, leur distribution granulométrique très étalée et leur teneur en eau même est relativement peu élevée. Ces caractéristiques chiffrées sont comparables à celles de certains sables grossiers couramment testés par les mécaniciens des sols repris sous le vocable de "matériau à caractère pulvérulent".

Les valeurs de bleu ainsi que les équivalents de sable étant directement liées aux proportions des éléments fins, confirment notre hypothèse.

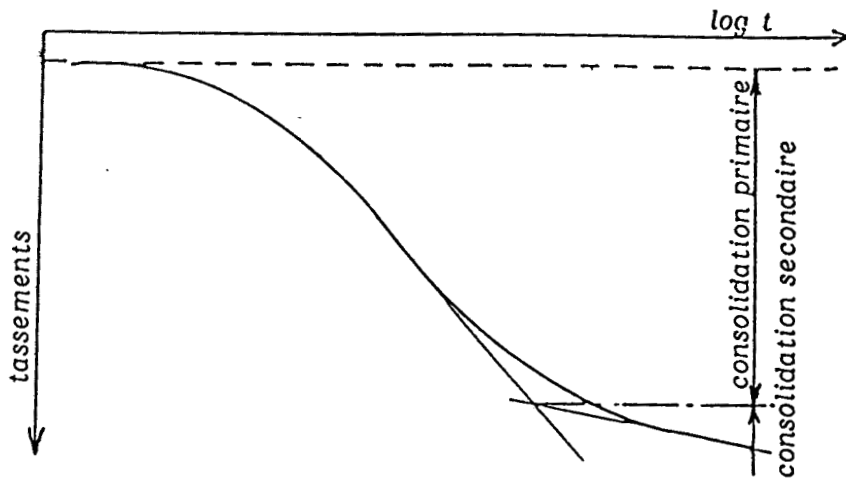


FIG. 14 : Courbe de consolidation

Ces courbes de consolidation permettent donc de relier le temps au tassement.

La courbe de compressibilité oedométrique d'un sol traduit la variation de l'indice des vides e en fonction de la contrainte verticale appliquée.

L'indice des vides e qui est une caractéristique intrinsèque du matériau a été préférée dans les dépouillements à la variation relative à la hauteur de l'échantillon (Fig. 15).

Soit δ la variation relative de hauteur de notre échantillon.

h_0 sa hauteur initiale

h sa hauteur en fin de consolidation secondaire sous une contrainte verticale

$$\delta = \frac{h_0 - h}{h_0} = 1 - \frac{h}{h_0}$$

La section du moule oedométrique étant constante, et l'indice des vides e étant égal à $\frac{V_v}{V_s}$

Nous obtenons la relation suivante

$$\delta = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

e_0 : indice des vides initial

e : indice des vides en fin de consolidation secondaire

IV - CARACTERISTIQUES MECANIKES DES CHARBONS

[4] ; [8] ; [15] ; [22] ; [31] ; [40] ; [55]

Dans le cadre de l'approche de notre problème d'écoulement en trémie par la mécanique des sols, nous avons mis en oeuvre deux familles d'essais appropriées :

- l'une permettant de déterminer les caractéristiques des déformations qui seront obtenues au moyen de l'essai oedométrique,
- l'autre permettant d'obtenir les caractéristiques de rupture grâce à des mesures effectuées sur la boîte de cisaillement rectiligne.

IV - 1 - LES ESSAIS OEDOMETRIQUES

[10] ; [39]

Tous nos essais ont été doublés afin d'éviter le risque de dispersion dans les résultats dus au mode de mise en place du matériau dans les moules.

IV - 1 - 1 - Définitions de l'essai

L'essai de compressibilité à l'oedomètre est un essai de compressibilité axiale à déformation latérale nulle. Il permet de caractériser à la fois l'amplitude et la vitesse des tassements des couches de sol.

Lorsqu'un sol saturé est soumis à une charge, celle-ci est reprise intégralement par l'eau interstitielle, car l'eau est incompressible (sous les contraintes appliquées) en comparaison de la structure du squelette solide.

Un gradient de pression s'établit entre le sol et les couches drainantes, l'eau est donc expulsée plus ou moins rapidement, selon la perméabilité du matériau.

Ce drainage conduit donc à un report de la charge sur le squelette solide, phénomène accompagné d'une variation de volume équivalente au volume d'eau évacuée. L'ensemble de cette phase porte le nom de consolidation.

Les courbes de tassement obtenues sont tracées en fonction du logarithme du temps. Elles montrent (Fig. 14) :

- Une première partie appelée consolidation ou compression primaire, durant laquelle la pression interstitielle se dissipe,
- Une seconde partie appelée consolidation ou compression secondaire où la courbe est pratiquement linéaire et la pression interstitielle reste nulle.

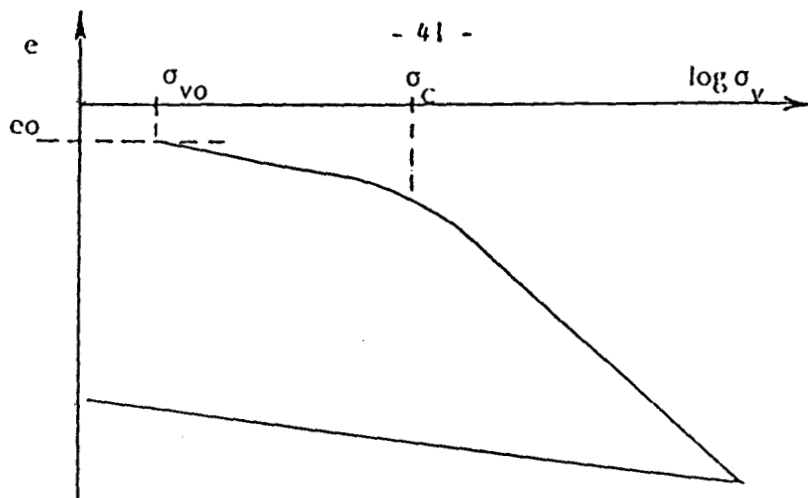


FIG. 15 : Courbe de compressibilité oedométrique

IV - 1 - 2 - But de l'essai

L'essai détermine des paramètres permettant de caractériser le comportement du matériau, c'est à dire :

- C c1 } des indices de compression (évaluation des tassements)
- C c2 }

{ C c1 pente de la partie linéaire de la courbe comprise entre σ_{vo} et σ_c ,

C c2 pente de la partie linéaire de la courbe au delà de σ_c

- e_0 indices des vides initial

- σ_c : contrainte dite de préconsolidation correspondant à la contrainte maximale supportée par l'échantillon

- K : perméabilité verticale à charge variable (mesures possibles avec certains types de matériel)

IV - 1 - 3 - Matériel utilisé

Le matériel disponible au laboratoire de l'ENSTIMD entre dans la catégorie des oedomètres à poids avec une cellule de TERZACHI (Fig. 16).

Toutefois nous avons automatisé l'ensemble de ce matériel ce qui présente les avantages suivants :

- meilleure concomitance entre la mesure du temps et celle du tassement.
- de prendre des mesures au tout début de l'essai.
- de démarrer nos essais à n'importe quel moment.
- d'avoir des paliers de durée équivalente (problème des week-end et jours fériés).

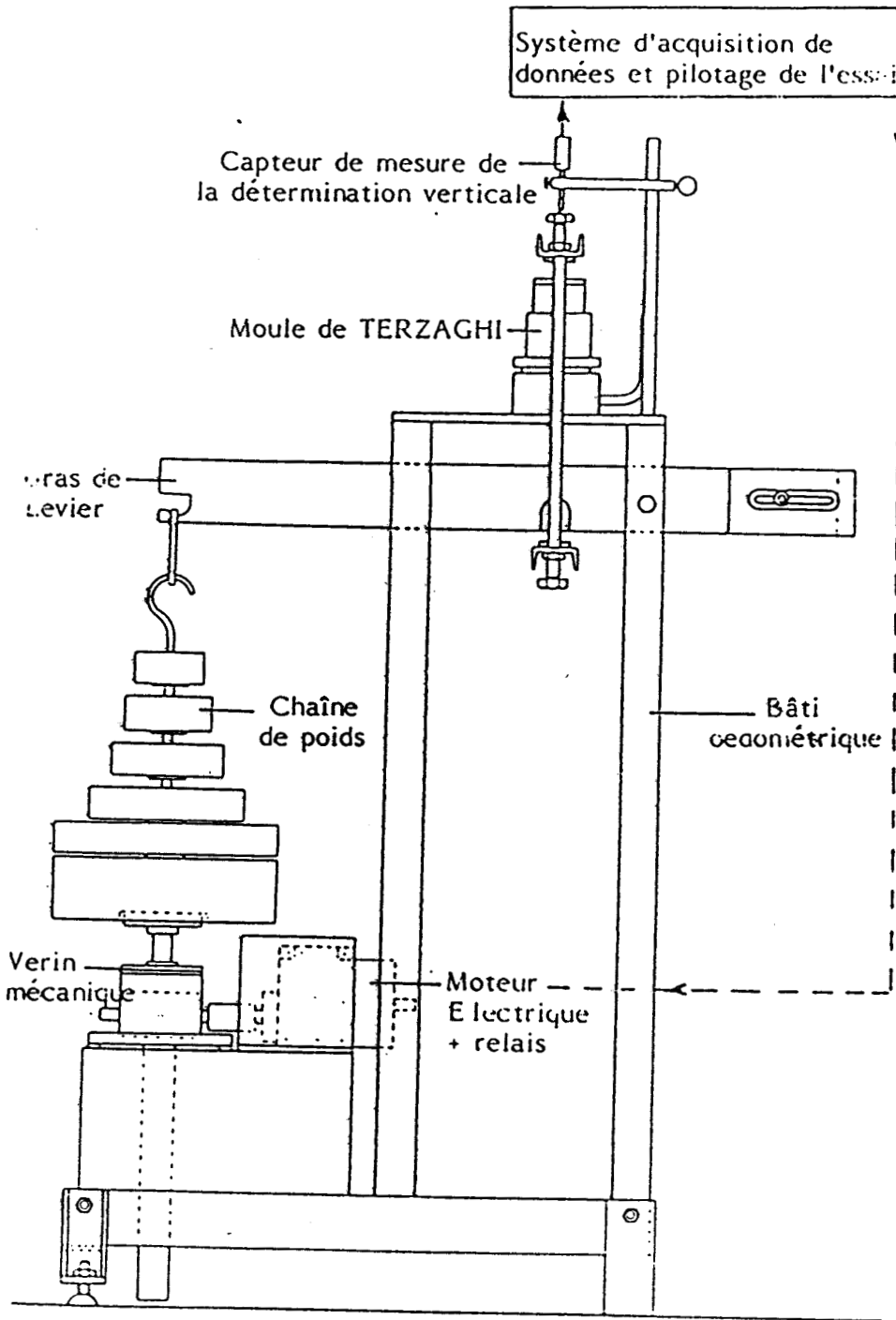


FIG. 16 : Schéma de principe de l'oedomètre automatisé (ENSTIMD)
(système breveté)

IV - 1 - 4 - Résultats obtenus

Les principaux résultats obtenus sont reportés dans le tableau figure 17.

En annexe II (p114 à 118), nous trouverons quelques courbes de compressibilité et de consolidation de certains de nos charbons étudiés.

Référence	σ_c (KPa)	e_0	e_{mini} ($\sigma = 1045 \text{ KPa}$)	C_{c1}	C_{c2}
Blair Athol	70	1,029 1,060	0,714 0,721	0,0128 0,0170	0,1567 0,1721
Bostwana	265	0,788 0,766	0,708 0,679	0,0166 0,0183	0,0856 0,1091
Ermelo	70	0,655 0,687	0,456 0,490	$5,967 \times 10^{-3}$ 0,0111	0,1277 0,1133
La Houve	265	0,585 0,597	0,447 0,461	0,0154 0,0189	0,1863 0,1728
Metiki	70	0,556 0,580	0,422 0,425	$3,41 \times 10^{-3}$ $6,82 \times 10^{-3}$	0,0698 0,0749
Ville du Havre	70	0,692 0,580	0,476 0,405	0,0358 0,0332	0,1346 0,0911
Wendel 2	70	0,576 0,531	0,259 0,262	$8,52 \times 10^{-3}$ 0,0102	0,1533 0,1346
Wendel 3	265	0,482 0,456	0,407 0,384	0,0097 0,0108	0,0973 0,0889

FIG. 17 : Principaux résultats des essais oedométriques

Quelques mesures de perméabilités verticales ont été effectuées sur différents charbons, soumis aux contraintes habituelles, c'est à dire : 0,047 à 10,45 bar. Les valeurs de K sont toutes voisines de 10^{-2} , 10^{-3} cm/s.

IV - 2 - CARACTERISTIQUES MECANIQUES A LA RUPTURE [26];[38];[44];[54]

IV- 2 - 1 - Définition de l'essai

Lorsqu'un système de forces est appliqué à un massif de sol, il se développe en général des contraintes de cisaillement.

La résistance au cisaillement d'un sol est définie comme étant la contrainte de cisaillement dans le plan de rupture au moment de la rupture (Fig. 18)

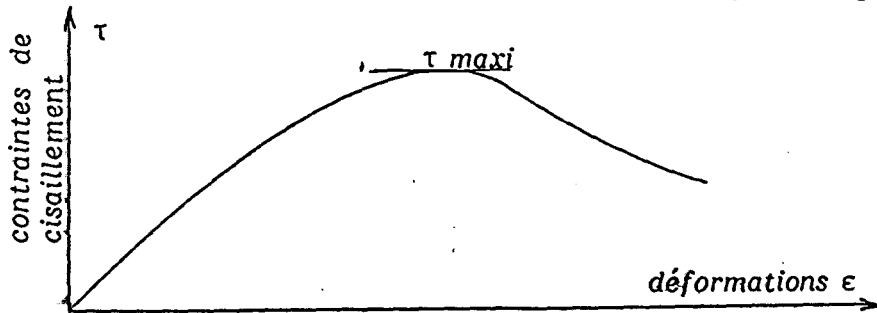


FIG. 18 : Courbe contrainte - déformation

IV- 2 - 2 - But de l'essai

Les valeurs de la résistance au cisaillement τ max sont reportées sur un graphique en fonction de la contrainte normale σ s'appliquant sur le plan de rupture (Fig. 19)

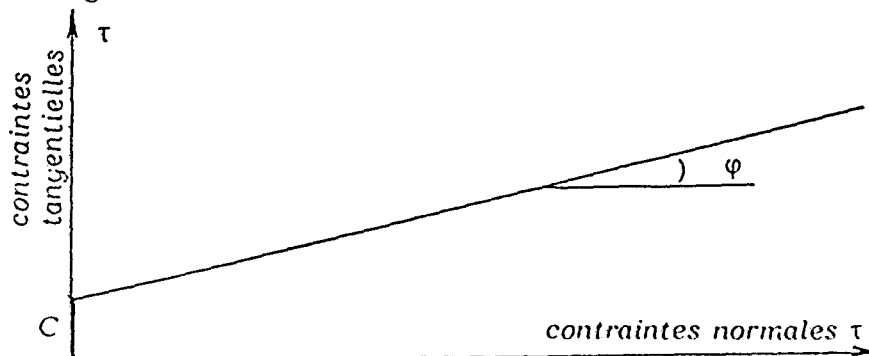


FIG. 19 : Droite intrinsèque

On obtient ainsi une droite appelée droite intrinsèque dont la pente nous donnera l'angle φ (angle de frottement interne) et l'ordonnée à l'origine C appelée la cohésion.

φ dépend principalement de la compacité du matériau, de la forme de grains et de leur état de surface.

IV - 2 - 3 - Principe de l'essai

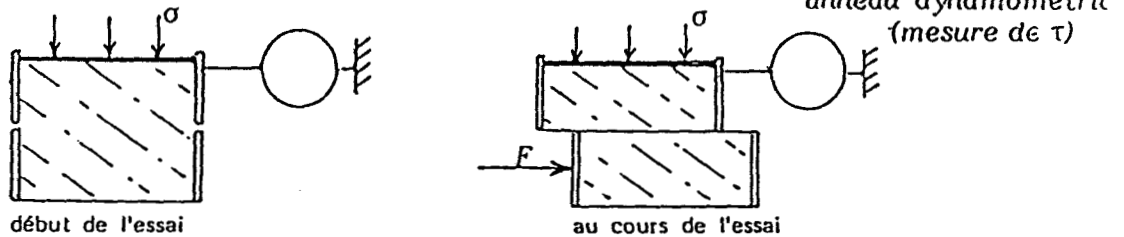


FIG. 20 : Principe de cisaillement rectiligne

IV - 2 - 4 - Résultats obtenus

Les enregistrements des forces tangentielles en fonction des déplacements d'une 1/2 boîte par rapport à l'autre se trouvent en annexe VII ainsi que les droites intrinsèques obtenues.

Les valeurs des cohésions et angles de frottement internes de nos charbons sont reproduites dans le tableau figure 21.

Repère	Cohésion C (en 10^5 Pa)	Angle de frottement interne φ (en degrés)
Blair Athol	0,07	36,8
Bostwana	0,03	38,6
Ermelo	0,06	36,5
La Houve	0	37,5
Metiki	0,08	34,4
Ville du Havre	0,03	35,7
Wendel 2	0	36,1
Wendel 3	0,03	33

FIG. 21 : Caractéristiques mécaniques à la rupture des charbons

V - CONCLUSION SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES CHARBONS

Les caractéristiques obtenues à partir de l'essai oedométrique confirment notre première hypothèse à savoir que les charbons peuvent être assimilés à un matériau pulvérulent.

Les angles de frottement internes mesurés à partir de l'essai de cisaillement à la boîte de CASAGRANDE, ont pour valeur moyenne 36° , alors que les cohésions restent faibles, voire nulles, confirmant une fois de plus que nous sommes en présence d'un sol pulvérulent.

C'est pour cette raison principale que dans nos manipulations sur trémie nous avons volontairement remplacé le charbon par un matériau ayant des caractéristiques très proches : le sable d'Oise. Il a l'avantage aussi d'être d'une part moins polluant que les charbons (à faible teneur en eau) et surtout moins fragile, mais présente néanmoins l'inconvénient d'éliminer le paramètre friabilité qui peut intervenir dans le cas des charbons.

Nous nous sommes résolus cependant à écarter l'influence de ce paramètre de nos études pour les deux raisons majeures suivantes :

- On ne dispose pas, dans l'état actuel des connaissances, de loi donnant la modification de granulométrie du matériau liée à ses conditions d'ensilage ;
- Les résultats d'essais physico-mécaniques pratiqués sur des fractions granulométriques différentes et présentés précédemment ne sont pas très éloignés.

Quelques caractéristiques essentielles de ce matériau de substitution se trouvent dans le tableau figure 22.

Angle de frottement interne φ (en degrés)	35,1
Cohésion C en 10 Pa	0
e_0	0,570 0,611
e mini ($\sigma = 1045$ KPa)	0,520 0,547
C c1	$3,41 \times 10^{-3}$ $3,41 \times 10^{-3}$
C c2	0,0272 0,0324
K (cm/s)	10^{-2}
γ_s (g/cm ³)	2,62

FIG. 22 : Caractéristiques du sable d'Oise



Voir annexe II p 113 (Courbes granulométriques)
p 119 (Essais de compressibilité)
p 125 (Essais à la boîte de cisaillement)

CHAPITRE III

SIMULATION D'UN ECOULEMENT EN TREMIE

SUR MODELE ANALOGIQUE A ROULEAUX

I - INTRODUCTION

Nous avons simulé un écoulement de matériau pulvérulent idéalisé sous la forme d'un empilement de rouleaux dans un plan.

Il s'agit donc d'une approche du problème considéré en déformations planes.

Le but recherché était d'avoir une idée plus précise du phénomène d'écoulement dans deux trémies différentes (Fig. 1) ; l'une inclinée à 45° , par rapport à l'horizontale, et l'autre à 70° . Ces deux valeurs prises arbitrairement ont comme avantage pour l'une de ne pas nuire à l'écoulement (pente très forte) et pour l'autre de pouvoir contenir une quantité plus importante de matériau.

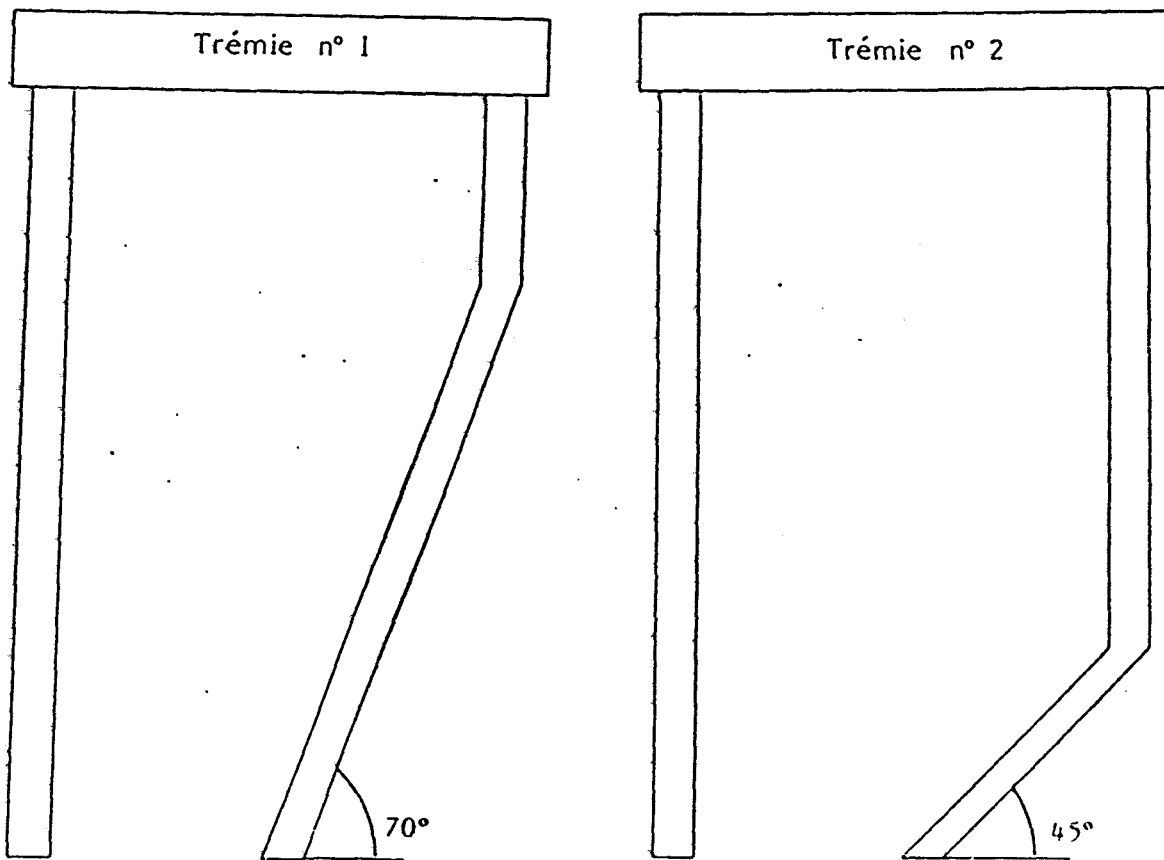


FIG. 1 : Caractéristiques des deux types de trémie utilisée

Nous avons essayé de déterminer en particulier l'influence de la forme de la trémie en mettant en évidence des phénomènes ou amorces de phénomènes observés dans la réalité, à savoir : formation d'une cheminée ou d'une voûte.

II - CARACTERISTIQUES DES MODELES

La première phase du travail a consisté en la réalisation de deux trémies à l'aide de profilés métalliques en U fixés sur le bâti du modèle disponible au laboratoire de Mécanique des Sols de l'E N S T I M D. La fermeture de l'orifice inférieur a été assurée par une section de profilé actionnée par un vérin pneumatique.

Le remplissage des trémies a été effectué de rouleaux de laiton d'une longueur uniforme de 7 cm et se répartissant en trois diamètres différents (4, 6 et 8 mm ; poids identique de matériau pour chacun des trois diamètres).

Nous avons veillé à ce que la répartition des rouleaux de dimensions différentes soit la plus aléatoire possible (Voir figure 2 : photo du modèle à 45° au démarrage de la vidange).

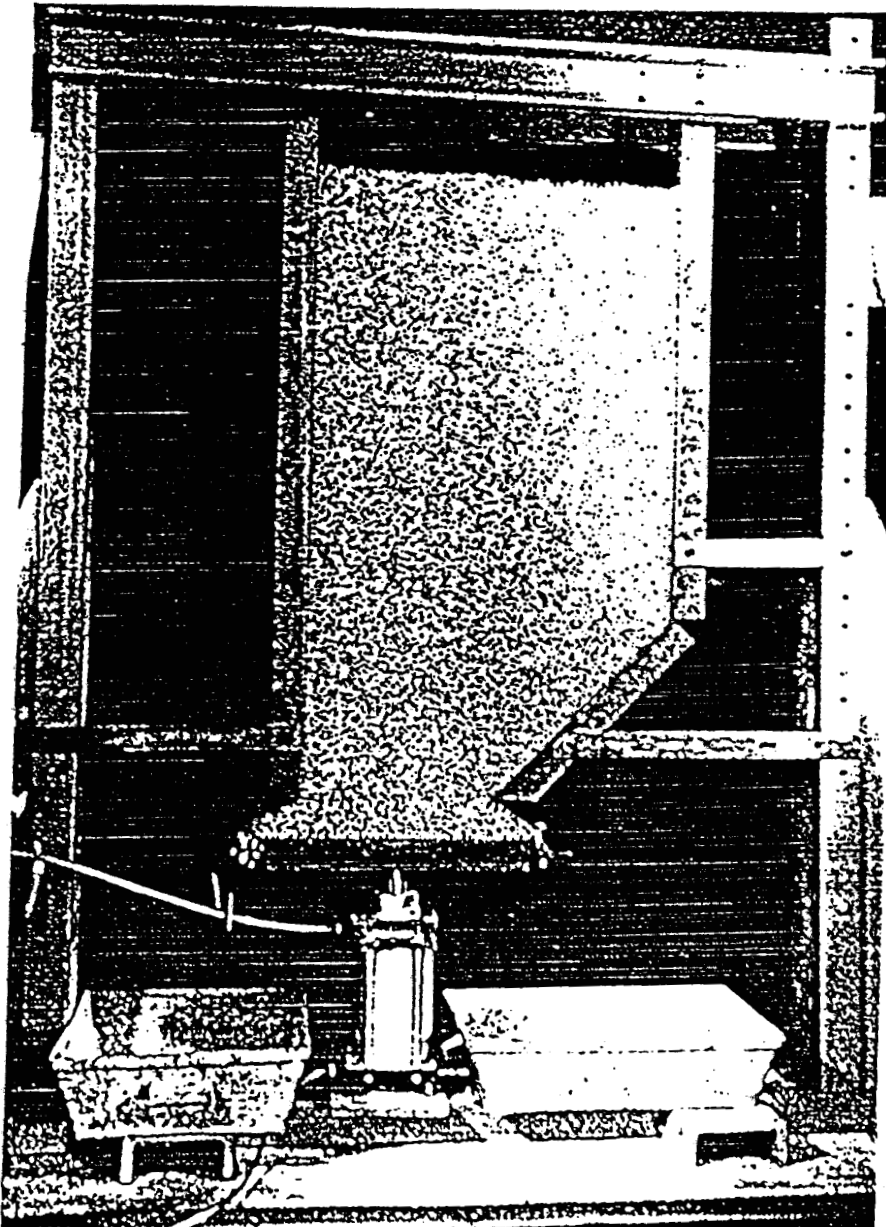


FIG. 2

La figure 3 nous donne les caractéristiques dimensionnelles de nos deux modèles.

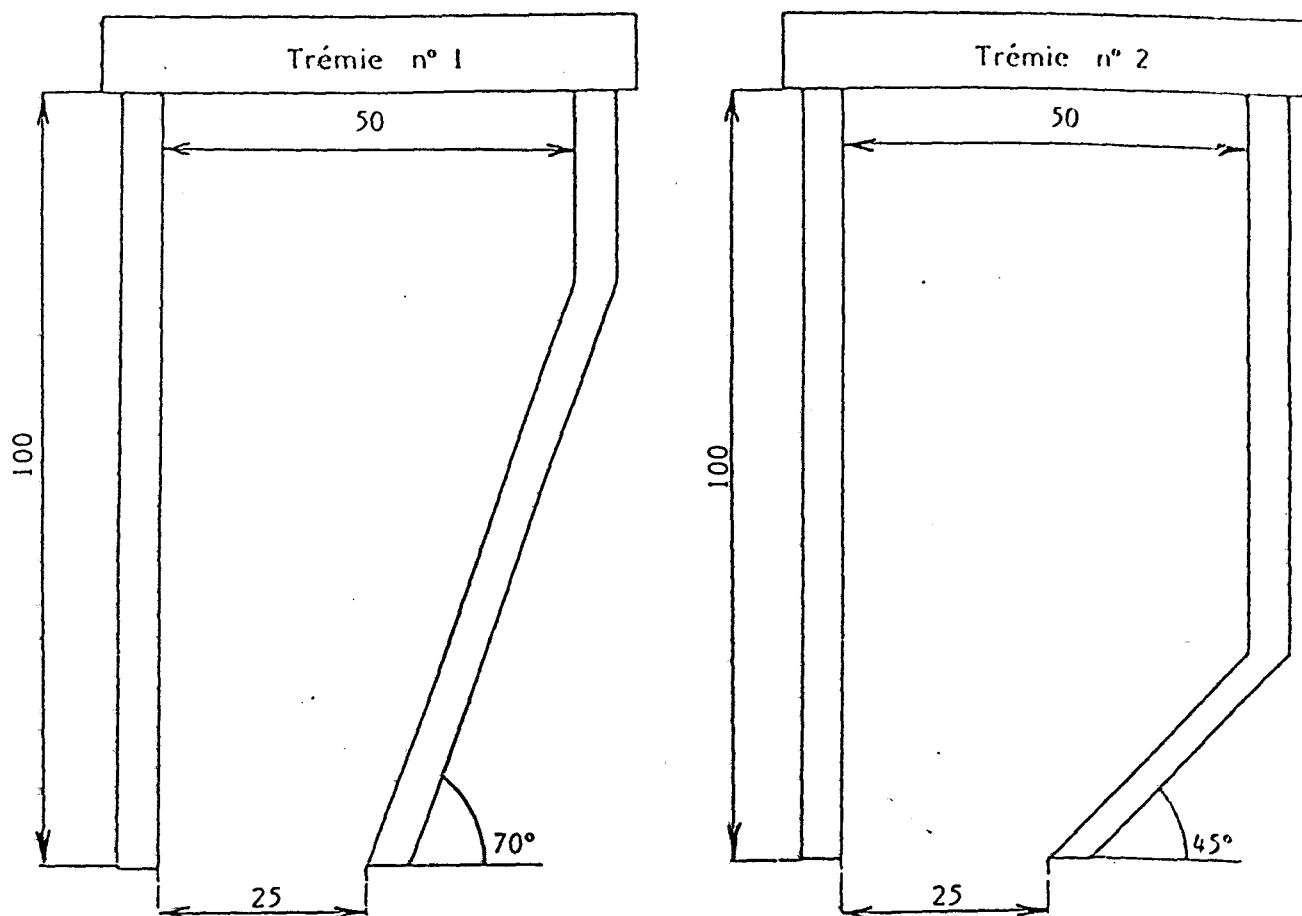


FIG. 3 : Dimensions de nos trémies (en cm)



III - ESSAIS EFFECTUES

Comme nous pouvons remarquer sur la photo figure 1, un certain nombre de rouleaux ont été repérés suivant un quadrillage grossier : ce sont ces rouleaux qui ont fait l'objet d'un suivi pendant l'écoulement. Pour cela, nous avons réalisé un film 16 mm tourné à vitesse rapide (64 images/seconde). A partir de ce film, nous avons extrait une image toutes les 32 images, ce qui correspond donc à des clichés espacés dans le temps d'une demie seconde.

La projection de ces clichés sur le tracé de la trémie à l'échelle 1/2 par rapport au modèle, nous a permis de relever la position des rouleaux préalablement repérés que nous appellerons par la suite des particules.

Les résultats présentés comprennent, d'une part, pour chaque cliché, la position des particules (Fig. 4) et d'autre part, pour illustrer ce qui se passe entre deux clichés, les déplacements globaux des particules (Fig. 5) et les déplacements ramenés à un déplacement moyen (Fig. 6).

L'ensemble de ces résultats est reporté en annexe III (p 126 à 136).

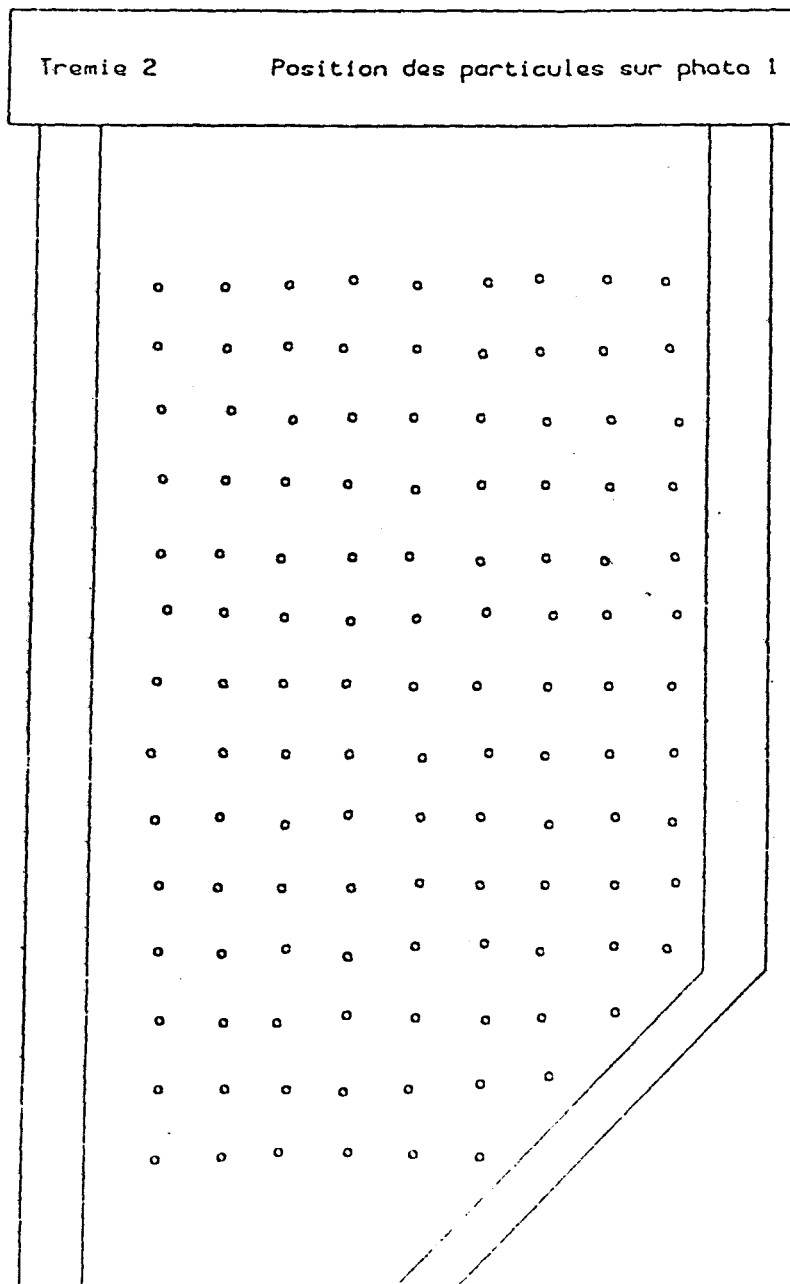


FIG. 4 : Position des particules

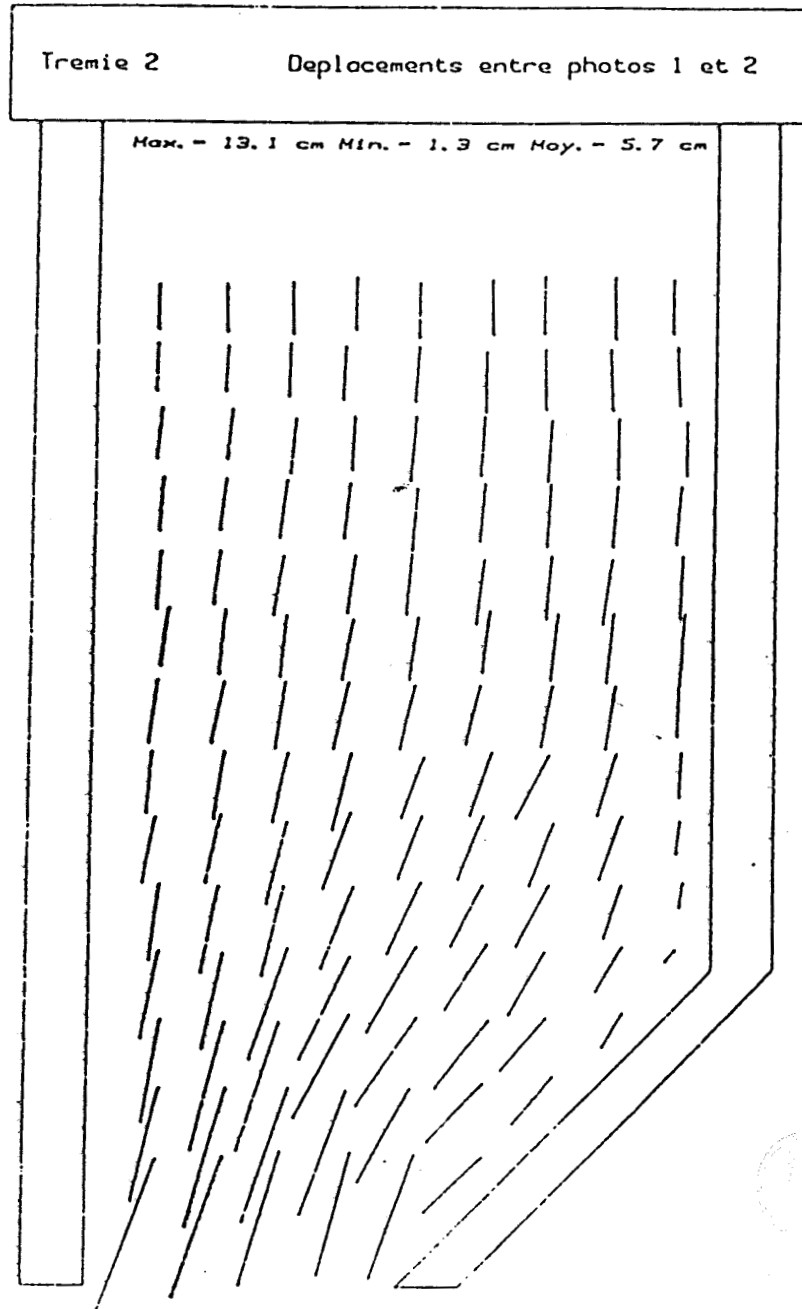


FIG. 5 : Déplacements globaux des particules (entre deux clichés)

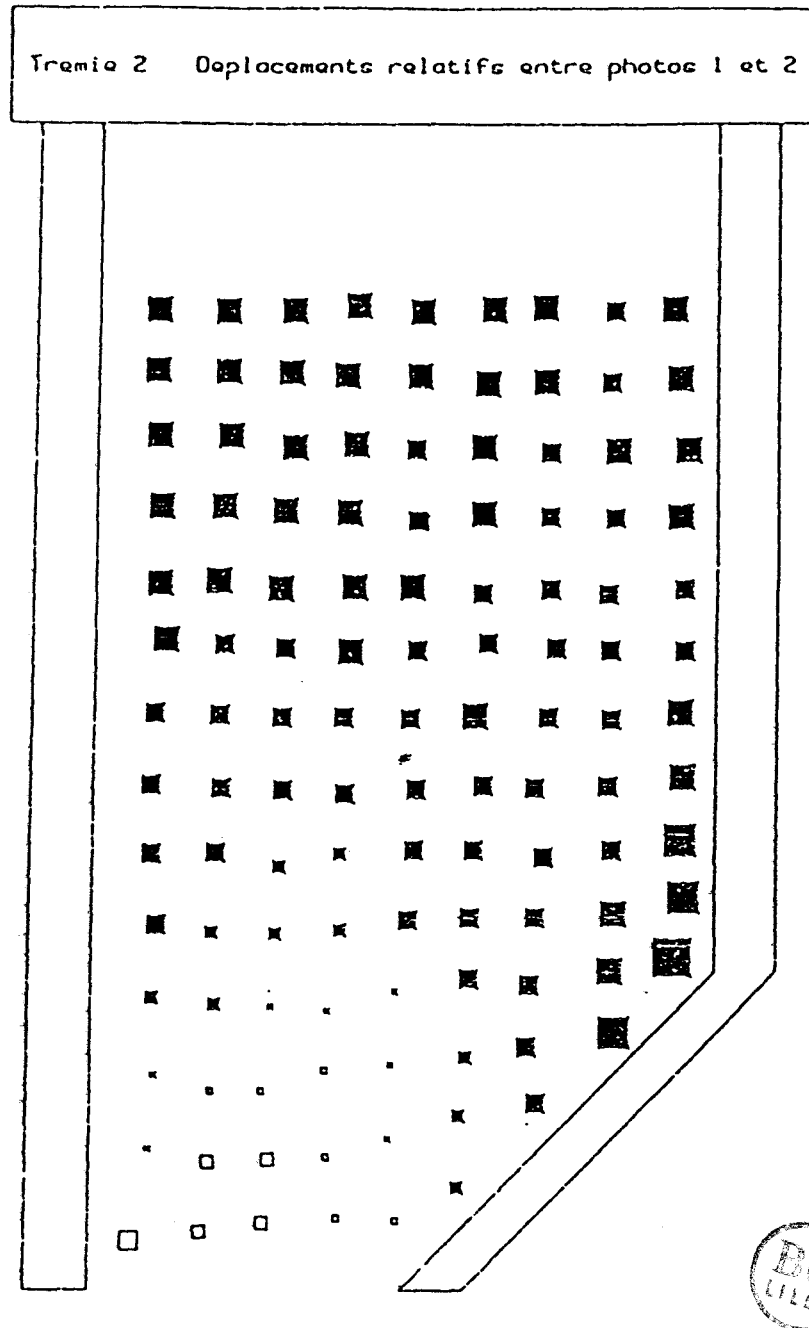


FIG. 6 : Déplacements relatifs des particules (entre deux clichés)

Nous trouverons aussi dans cette annexe les coordonnées des particules relevées pour chacun des 5 clichés, le tracé de la trémie, le positionnement des particules, les tracés des déplacements ainsi que le programme permettant ce traitement.

La représentation des déplacements globaux des particules est assurée par des segments qui doivent être interprétés comme figurant la position de

la particule sur le premier cliché pour l'origine et la position sur le deuxième cliché pour l'extrémité.

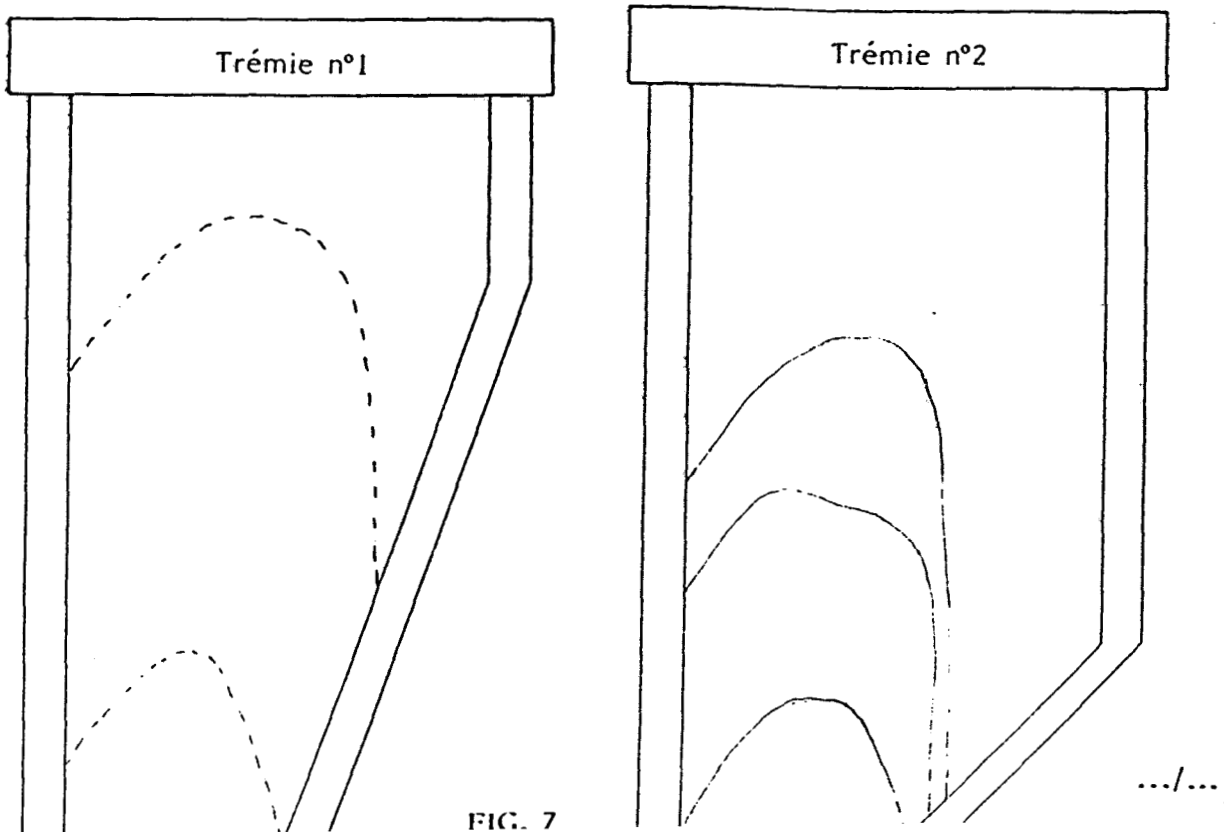
Cette représentation permet d'évaluer une vitesse de déplacement moyen des particules. Dans la réalité, bien entendu, les déplacements ne suivent vraisemblablement pas les chemins représentés par les segments.

En ce qui concerne les déplacements ramenés à un déplacement moyen, nous avons retenu un figuré placé au milieu des segments représentant les déplacements globaux. Ce figuré est un carré ombré quand l'écart entre déplacement considéré et déplacement moyen est négatif et non colorié quand cet écart est positif. La taille des carrés est reliée directement à la valeur absolue de l'écart.

IV - INTERPRETATION DES RESULTATS DES ESSAIS

Les différents tracés font apparaître des perturbations quasi immédiates au voisinage de la rupture de pente de la trémie, ces perturbations progressant assez rapidement dans une colonne située à l'aplomb de la partie inclinée de la trémie.

Ce phénomène est particulièrement net dans la trémie 2, c'est à dire celle correspondant à une partie basse inclinée à 45° (voir tracés des déplacements relatifs). On voit en effet clairement sur cette trémie une amorce de formation de cheminée (Fig. 7).



Le tableau suivant (Fig. 8) nous donne les valeurs des déplacements entre chaque cliché (valeurs correspondants aux vitesses des particules à un coefficient près).

N° des clichés	Déplacements entre photos (en cm)					
	Trémie à 45 °			Trémie à 70°		
	Maxi	Mini	Moyen	Maxi	Mini	Moyen
1/2	13,1	1,3	5,7	13,5	2,4	6,2
2/3	16,8	2,5	9,5	18,5	4,8	11,3
3/4	17,2	0,6	9,4	19	5,9	12,3
4/5	19,1	0,8	10,7	20,8	7,5	13,8

FIG. 8 : Valeurs des déplacements pour les deux trémies



Les déplacements moyens sont toujours supérieurs dans la trémie à 70°. D'autre part, certaines particules sont pratiquement arrêtées dans le modèle à 45° (déplacements mini ayant comme valeurs 0,6 et 0,8 cm entre 2 clichés).

V - CONCLUSIONS

Dans ce modèle analogique à rouleaux, le matériau peut être considéré comme un matériau pulvérulent idéal. Rien dans ce modèle, n'empêche l'écoulement de conduire au vidage complet de la trémie. Il est certain qu'il en irait tout autrement si le matériau testé possédait une cohésion. En effet, les forces de cohésion rompues quand la vitesse d'écoulement est grande, entrent en action dès que cette vitesse descend en dessous d'un certain seuil et provoquent une solidification avec possibilité de création d'une voûte.

CHAPITRE IV

ECOULEMENT EN TREMIE DU SABLE D'OISÉ

I - INTRODUCTION

Dans l'industrie les silos servent généralement de régulateurs d'alimentation en matières premières entrant dans divers processus de fabrication.

[9] ; [13] ; [20] ; [30] ; [33] ; [55] ; [59] ; [60]

Tout disfonctionnement dans ces silos influence la chaîne de fabrication.

Les principales causes de mauvais fonctionnement sont les suivantes :

- Formation d'une cheminée, c'est-à-dire que seul le noyau de matériau situé au dessus de l'orifice s'écoule. Des "paquets" se détachent parfois des parois et s'engouffrent dans la cheminée, l'écoulement se poursuit alors par à coups.

- Blocage au niveau de la trémie : il y a alors formation d'une voûte et nécessité d'intervention (par tisonnage ou mise en oeuvre d'extracteurs par exemple).

Lorsque toutes les particules contenues dans le silo sont en mouvement simultanément, l'écoulement est dit massif, c'est à dire que la vidange se fait "premier entré, premier sorti".

Seul le silo à écoulement massif répond aux exigences de l'utilisateur, à savoir : écoulement sans zone morte, sans ségrégation du matériau.

Pour atteindre un tel écoulement, il y a lieu de considérer non seulement le silo et en particulier sa géométrie, mais aussi et surtout le matériau stocké dont le comportement peut varier considérablement.

C'est ainsi que chaque nouveau matériau ensilé doit faire l'objet d'une étude visant à sa caractérisation.

Le problème devient alors de déterminer les critères permettant de le juger efficacement.

Parmi ces critères nous pouvons mentionner les suivants :

- Taux d'humidité,
- Forme des grains,
- Aptitude à la compaction,
- Sensibilité aux vibrations (dans le cas de vidange par à coups ou dans le cas d'utilisation de vibreurs servant au décolmatage),
- Distribution granulométrique des grains.

- Abrasion,
- Frottement sur les parois,
- Température de stockage,
- Sensibilité aux fluidifiants...

Compte tenu du nombre de paramètres cités ci-dessus, il n'est pas réaliste d'envisager de déterminer pour chacun d'eux son influence.

Nous avons aussi indiqué précédemment (conclusion du chapitre II), la nécessité de changer de matériau pour l'étude de son comportement pendant la phase d'écoulement en trémie.

I - OBJECTIFS ET METHODE ENVISAGEE

Nous nous sommes donc limités dans cette étude à estimer l'influence du paramètre teneur en eau sur le comportement mécanique du matériau ensilé : le sable d'Oise qui a été utilisé pour notre campagne d'essais.

La méthode envisagée consistait en une série d'expérimentations dans laquelle la teneur en eau de matériau était modifiée, l'observation devant permettre de constater si le matériau s'écoulait et de quelle façon, ou ne s'écoulait pas.

Le silo modèle quant à lui, a une forme géométrique simple, conforme à celle du silo type fréquemment rencontré dans l'industrie, dont le CERCHAR nous avait communiqué les plans.

Nous avons toutefois équipé ce modèle d'un dispositif permettant d'agrandir l'orifice de vidange par rotations des parois inférieures, ce dans le but de rompre la voûte éventuellement formée et donc de rendre à nouveau possible un écoulement massif.

II - I - INFLUENCE DE L'EAU SUR LE COMPORTEMENT DU MATERIAU ENSILE

Considérons quelques particules de sable légèrement humides. Il existe entre ces particules un "pont d'eau" au voisinage des points de contact (Fig.1)

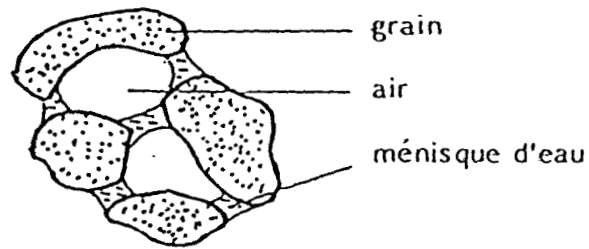


FIG. 1 : Sable légèrement humide

Cette eau se trouve retenue par des phénomènes de tensions de surface notamment sous forme de ménisques entre les grains, créant ainsi entre les particules des forces d'attraction.

Il apparaît d'abord entre les grains une certaine cohésion dite apparente et ensuite, si la quantité d'eau augmente, un élargissement de l'espace intergranulaire. On a l'impression que le sable gonfle : c'est ce que l'on appelle le foisonnement. La courbe dite de foisonnement (Fig. 2) a été obtenue en laboratoire en remplissant sans compactage et de manière reproductible un récipient de 1 litre de sable en en faisant varier la teneur en eau et en mesurant la densité humide. [12] ; [19]

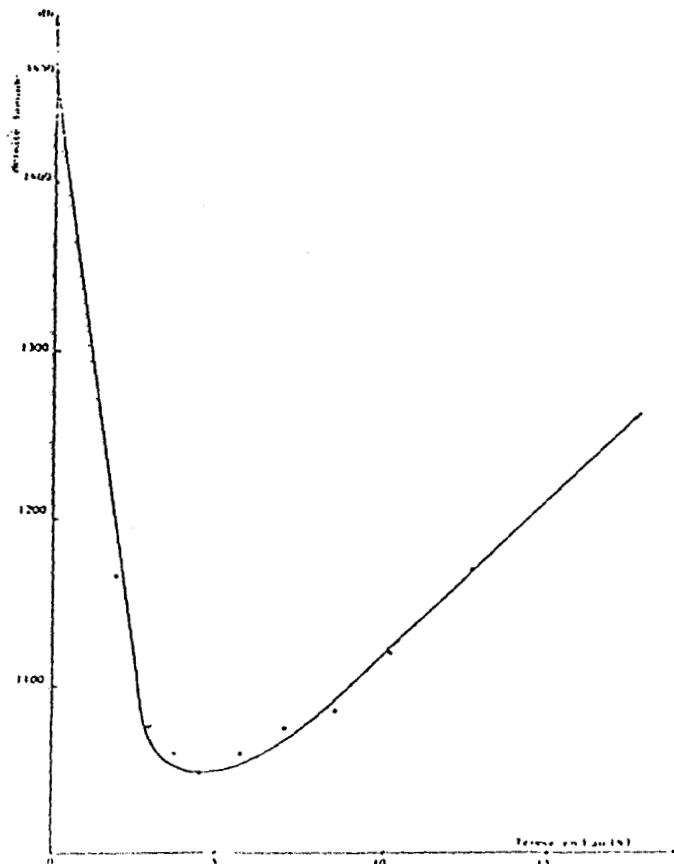


FIG. 2 : Courbe de foisonnement du sable d'Oise

Toutefois ce foisonnement n'apparaît pas nettement si l'on se contente d'ajouter de l'eau au sable, c'est en malaxant que le phénomène se produit. De plus, la cohésion apparente est d'autant plus importante (à granulométrie identique et à même degré de saturation) que le degré de compaction est important.

Ne pouvant déterminer précisément cette cohésion avec les appareillages classiques utilisés en mécanique des sols, le tableau suivant (Fig. 3) nous donne les valeurs obtenues d'affaissements mesurés du cône d'Abrams à différentes teneurs en eau.

Teneurs en eau des essais (W %)							
	2,7	5,1	7,7	9,9	12	15	17
Affaissements obtenus (en cm)	17,3	14,5	14,5	14,5	13	10	12

FIG. 3 : Résultats au cône d'Abrams

On conçoit que la cohésion apparente, résultants des tensions superficielles, s'annule avec la disparition d'une des trois phases. Les deux cas extrêmes étant celui du matériau sec et du matériau saturé.

Compte tenu de ces premiers résultats, il a donc été nécessaire, d'une part de remplir le silo de façon aussi répétitive que possible, et d'autre part de suivre l'évolution du foisonnement. L'augmentation de la cohésion du matériau avec sa teneur en eau, rendait un blocage prévisible.

Afin de relancer la vidange, un dispositif mécanique assez rudimentaire a été ajouté à la trémie. Celle-ci a été en outre équipée de cellules devant permettre la mesure des pressions exercées par le matériau sur la paroi, ce dans le but de mettre en évidence et localiser les zones d'appui d'une voûte éventuelle.

La réalisation de l'installation décrite ci-après tient compte des objectifs que nous venons de fixer.

III - LA STATION EXPERIMENTALE

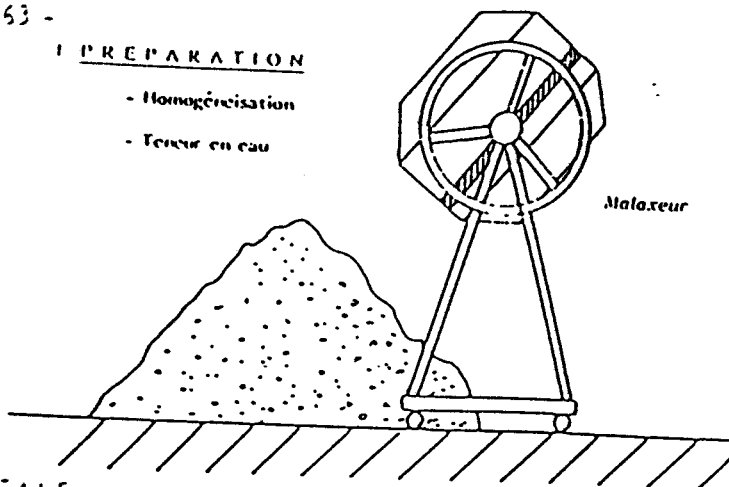
La constitution de notre station expérimentale est la suivante :

- Une plate-forme de préparation du matériau à ensiler,
- Une bande transporteuse,
- Le silo expérimental en plexiglas et son instrumentation,
- Un portique,
- Un système d'acquisition de données.

La figure 4 présentée ci-après ainsi que la photo (Fig. 5) nous montrent l'ensemble de l'installation réalisée au laboratoire.

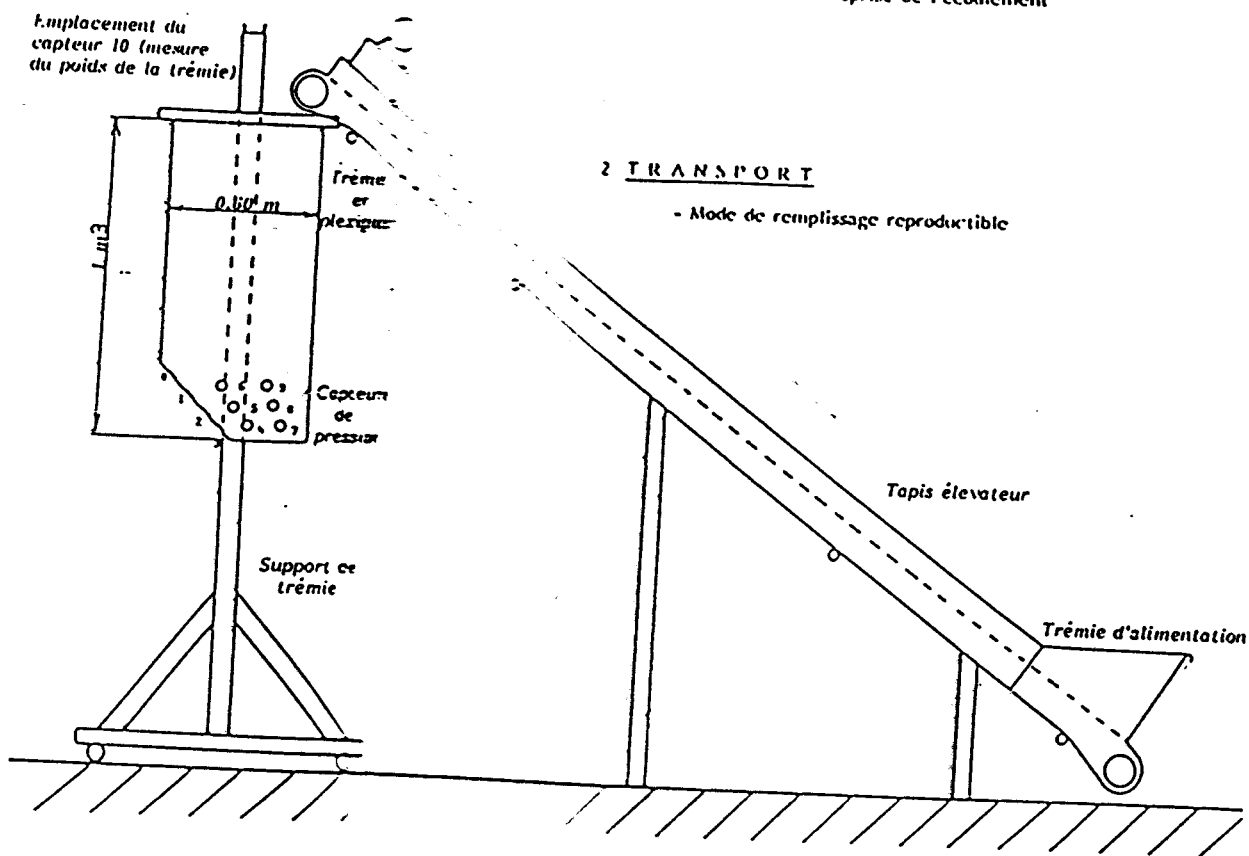
1 PREPARATION

- Homogénéisation
- Teneur en eau



3 STATION EXPERIMENTALE

- Mesure des pressions au sein des trémies
- Mesure des débits massiques
- Modification de l'inclinaison des trémies → Rupture de voûte et reprise de l'écoulement



2 TRANSPORT

- Mode de remplissage reproductible

4 ACQUISITION DE DONNEES

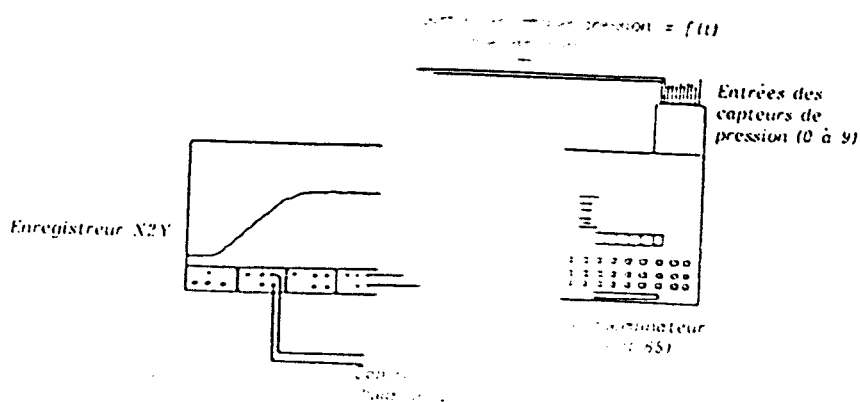


FIG. 4. Installation



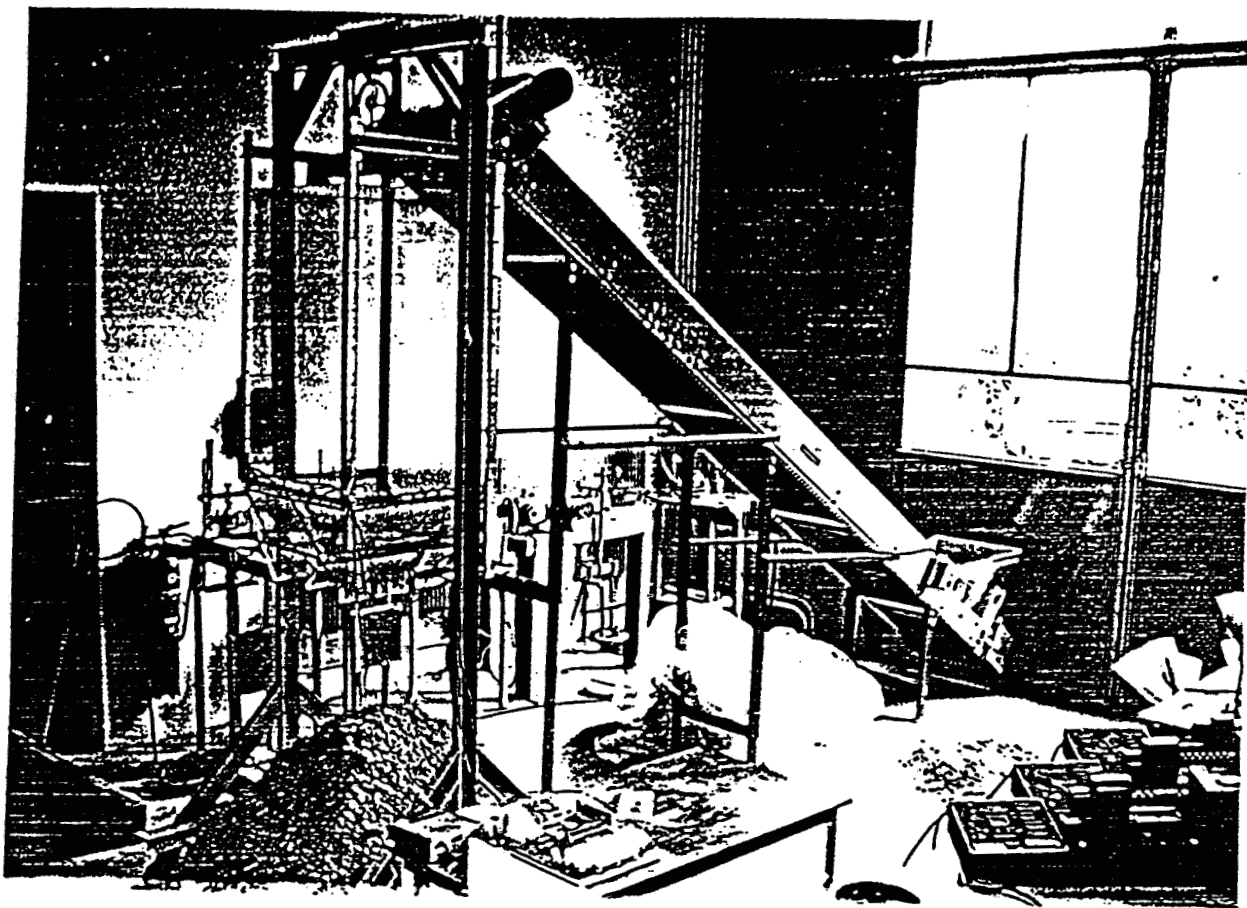


FIG. 5 : Photo de la station expérimentale

III - I - PREPARATION DU MATERIAU

L'emploi d'un malaxeur s'est révélé nécessaire afin d'obtenir un mélange homogène de matériau ensilé, ceci à une teneur en eau désirée.

Pour cela chacune des quantités de sable d'Oise servant à un mélange a été gâchée en utilisant un volume d'eau connu.

Une douzaine de gâchées ont été nécessaires afin d'homogénéiser environ 500 kilos de sable permettant d'effectuer une expérimentation.

La teneur en eau a été contrôlée à chaque fois par deux essais sur environ 10 kilos du mélange ainsi préparé.

III - 2 - TRANSPORT DU MATERIAU

Un tapis élévateur incliné de 36° environ par rapport à l'horizontale permet le remplissage de notre silo de façon répétitive.

La photo (Fig. 6) présente le matériel utilisé.

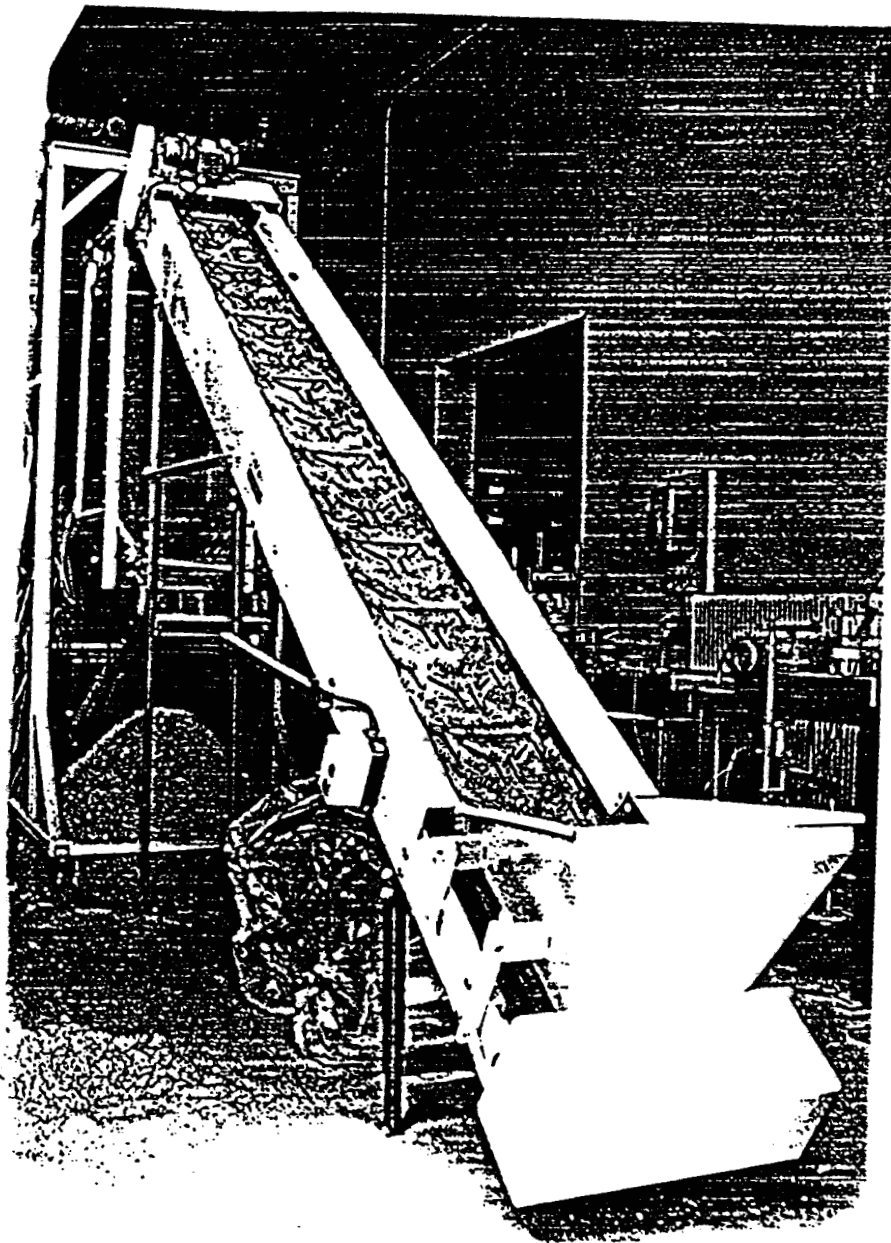


FIG. 6 : Le tapis élévateur

III - 3 - LE SILO EXPERIMENTAL

Réalisé à partir de plaques de plexiglas d'épaisseur 15 mm, il a été renforcé aux angles par de la cornière en aluminium boulonnée.

L'ensemble a été ensuite suspendu à un portique construit en mécano-soudé dans du profilé U de 80 mm.

La figure 7 précise l'encombrement de l'appareillage.

VUE DE FACE DU PORTIQUE

VUE DE COTE DU PORTIQUE

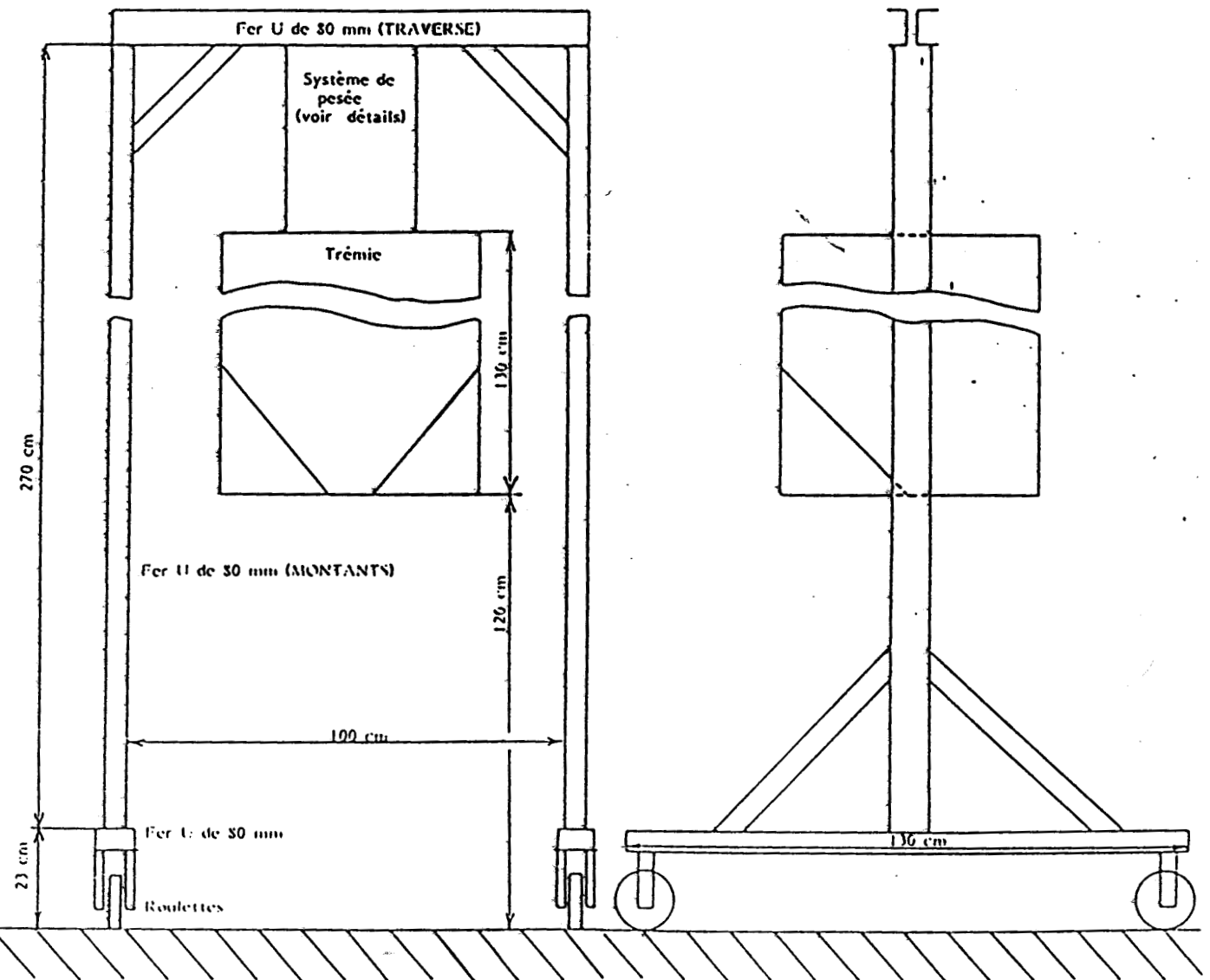


FIG. 7 : Encombrement de l'installation

III - 4 - LA TREMIE DE VIDANGE

La trémie a été, construite également à partir de plaques de plexiglas d'épaisseur 15 mm. Les deux volets latéraux sont inclinés à 45° par rapport à l'horizontale.

Le volet frontal, lui aussi incliné à 45° par rapport à l'horizontale, vient se glisser entre les deux volets latéraux.

Des charnières du type "piano" les lient au fût du silo. La paroi arrière seule reste verticale et fixe.

Un étrier assure le maintien des trois volets obliques. Une vis solidaire de l'étrier permet une rotation des trois parois autour de leur charnière.

Les photos (Fig. 8 et 9) présentent cette trémie à géométrie variable.

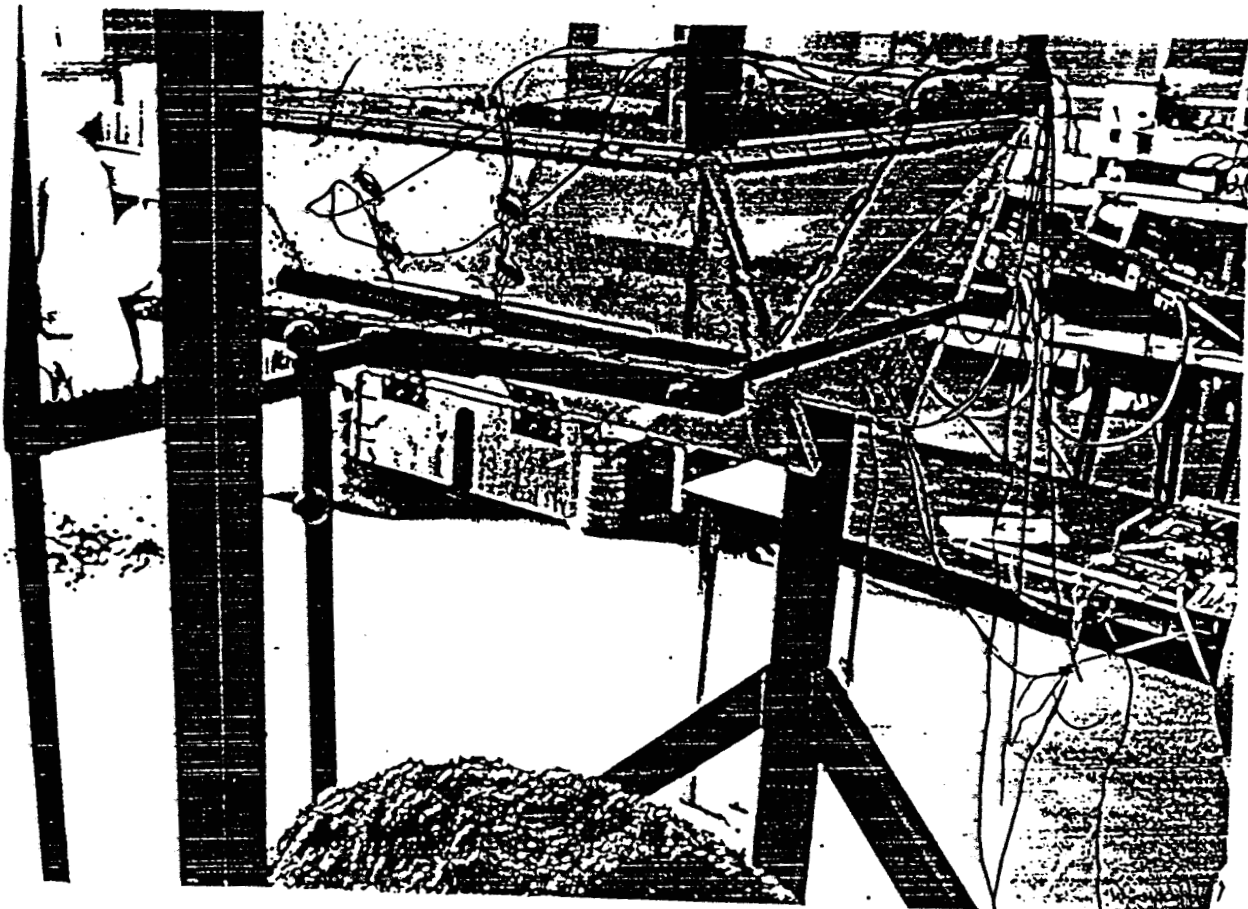


FIG. 8 : Vue de la trémie

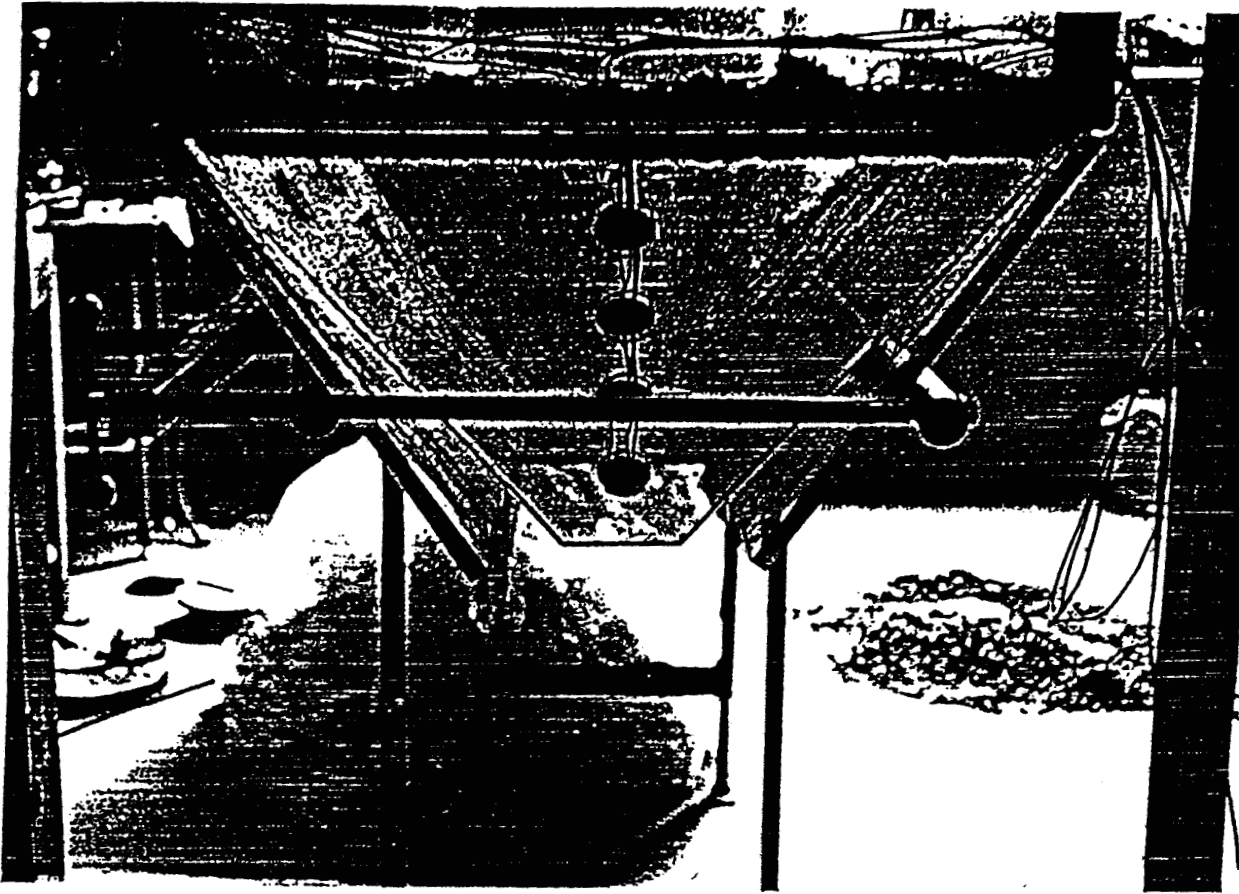


FIG. 9 : Vue de face de la trémie

III - 5 - INSTRUMENTATION DU MODELE

III - 5 - 1 SYSTEME DE PESEE EN CONTINU

Un anneau dynamométrique étalonné a été placé entre le silo et le portique. Un capteur inductif remplace le comparateur mécanique. (Fig. 10)

DETAILS DU SYSTEME DE PEESE

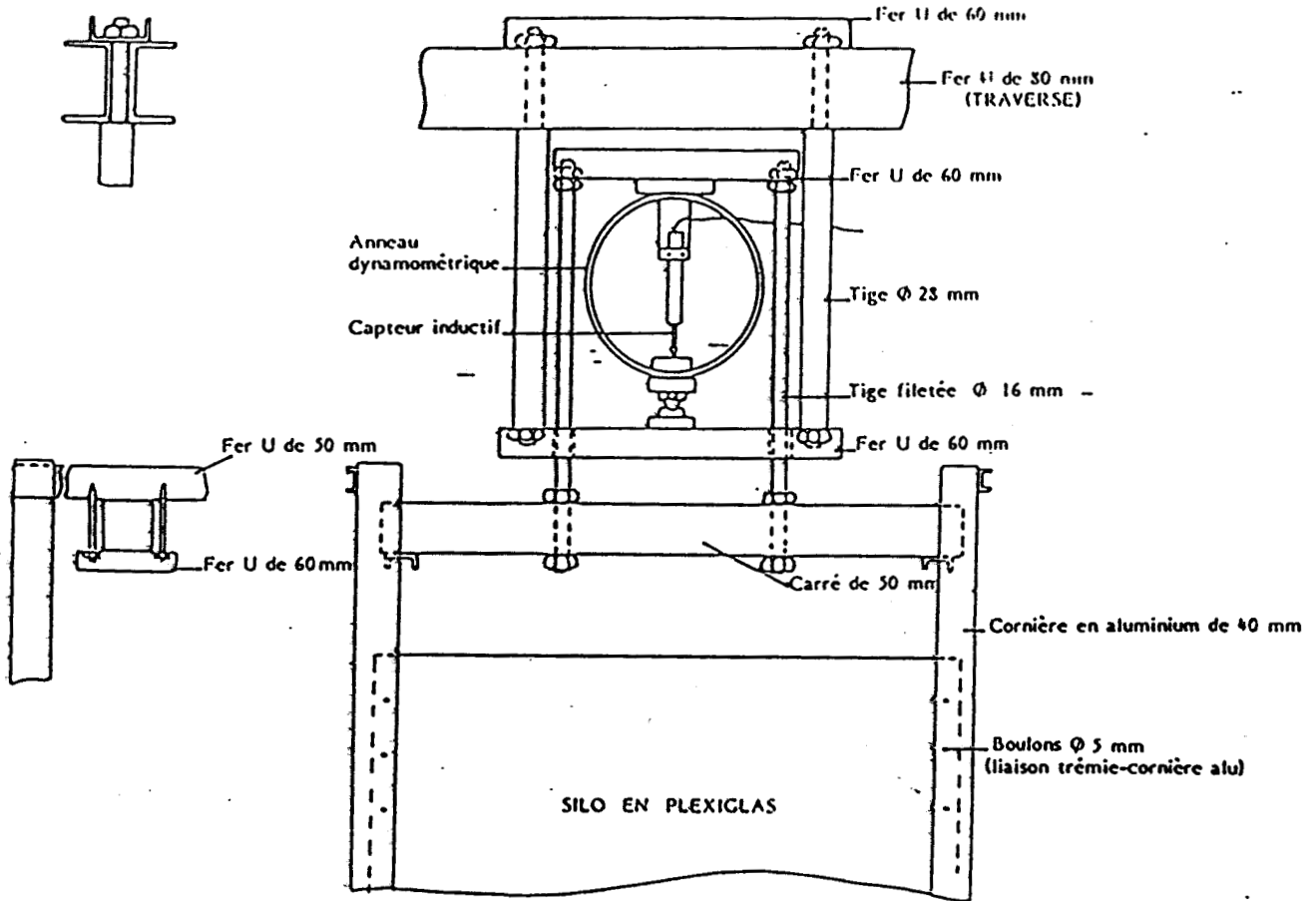


FIG. 10



Les déformations de l'anneau transmettent au capteur électrique un déplacement qui se traduit par une variation de tension proportionnelle au poids de notre silo et de son contenu.

Ces informations ont été enregistrées durant nos essais sur table XY.

III - 5 - 2 PRESSIONS EXERCEES SUR LES PAROIS INCLINEES

Dix cellules de pressions équipent la partie basse du modèle.

La figure 11 donne la position des cellules ainsi que leur numérotation.

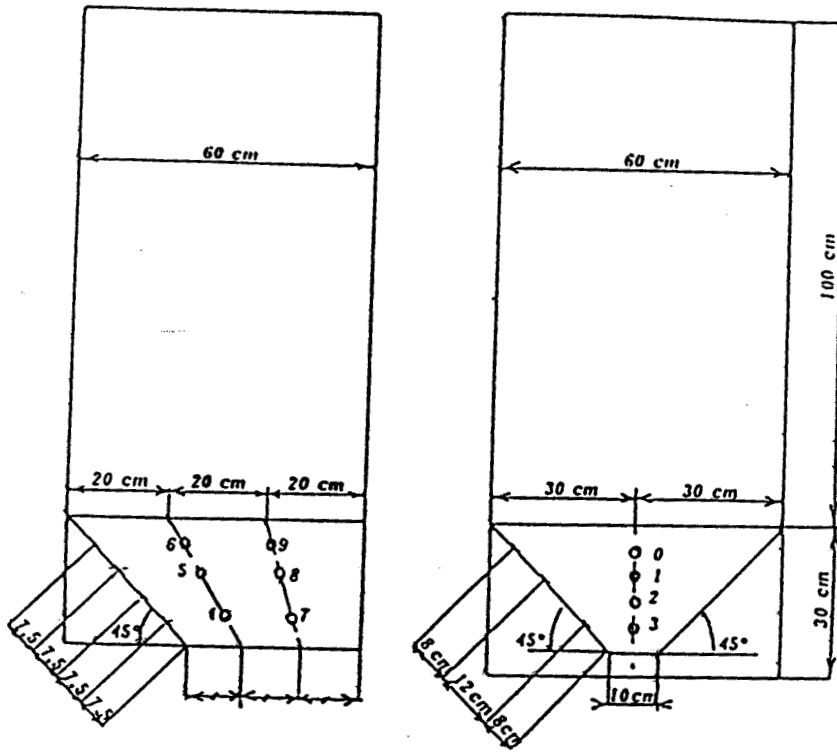


FIG. 11 : Position des cellules de pression

La figure suivante (Fig. 12) détaille le montage des cellules dans les parois.

CELLULE DE PRESSION
(Détail du montage)

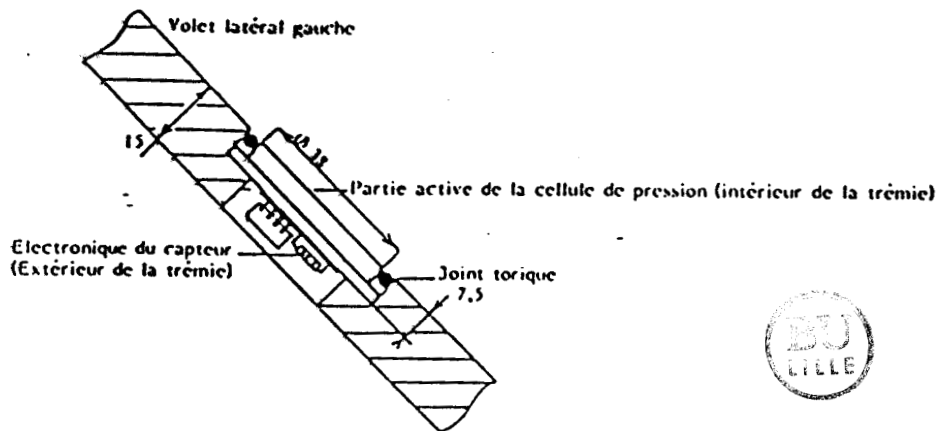


FIG. 12 : Montage des cellules de pression

La photo (Fig. 13) montre l'installation des capteurs sur les parois inclinées de la trémie.

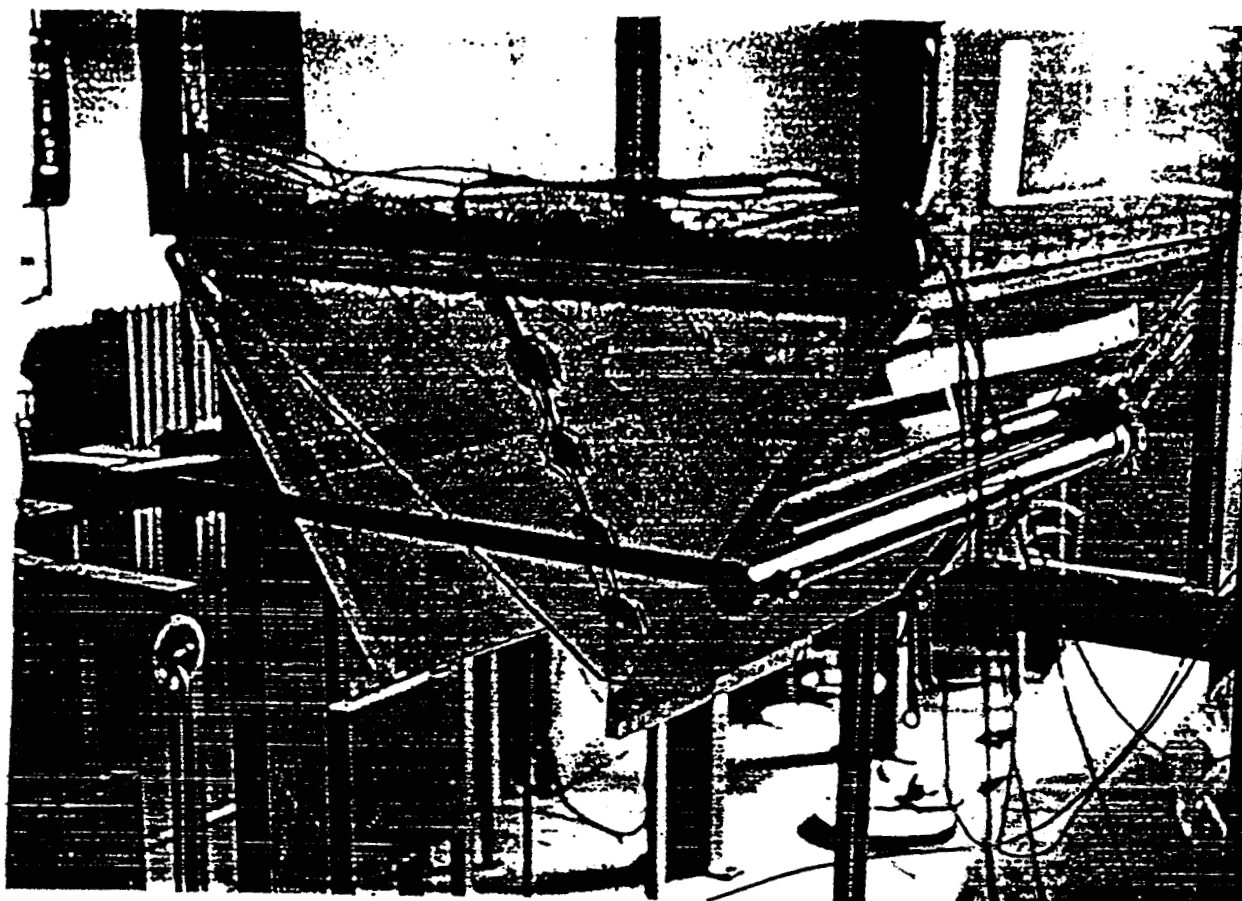


FIG. 13 : Vue des cellules de pressions

III - 5 - 3 LE SYSTEME D'ACQUISITION DE DONNEES

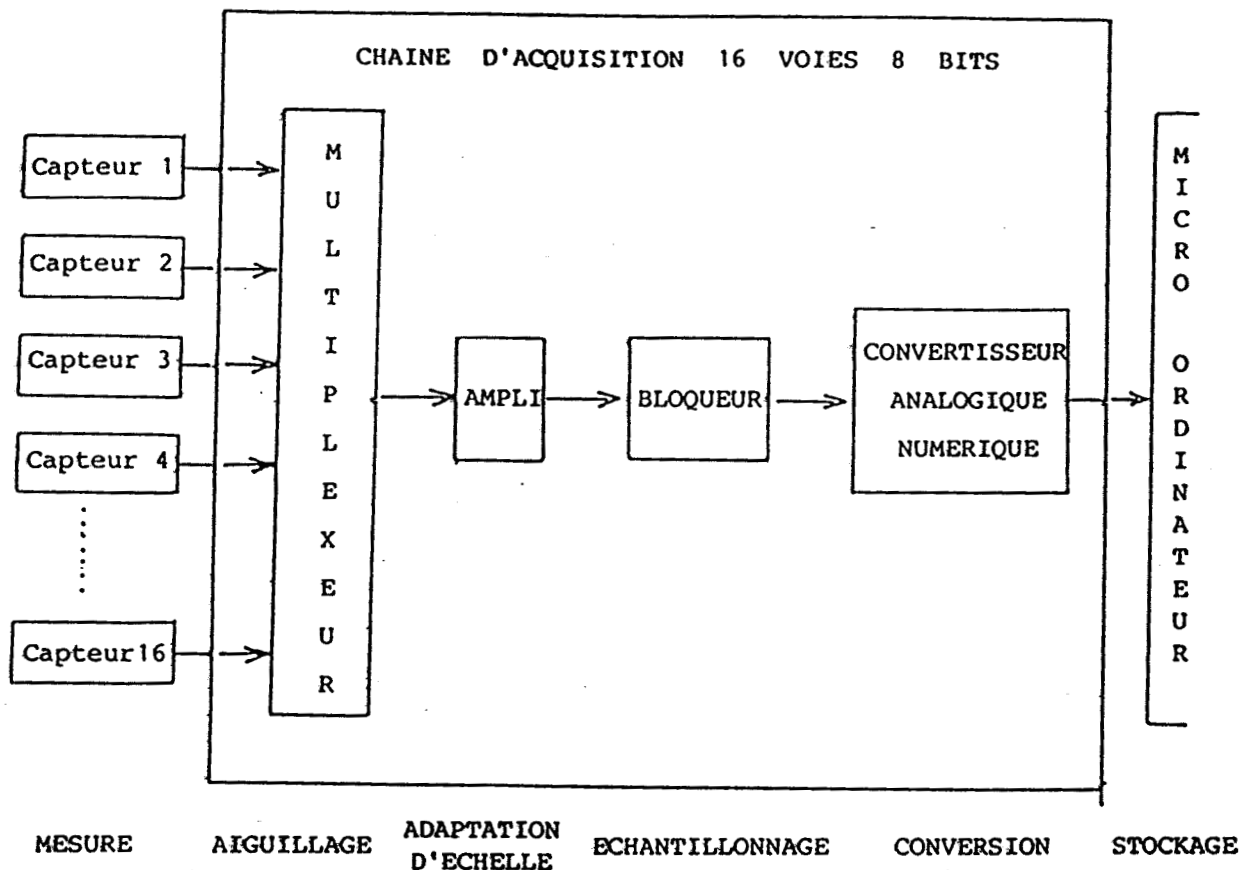


Une carte d'acquisition 16 voies 8 bits permet de traiter les informations provenant de nos 10 cellules de pression.

La carte réalisée par le laboratoire d'électronique contient d'une part un système d'acquisition analogique, d'autre part une extension de mémoire vive permettant de stocker les valeurs acquises.

La chaîne d'acquisition comporte essentiellement les éléments suivants :

- Un multiplexeur "1 parmi 16" destiné à aiguiller la voie sélectionnée vers la suite de la chaîne.
- Un amplificateur doté d'un réglage de sensibilité et d'un réglage de zéro. Il a pour rôle d'adapter les plages de tensions fournies par les capteurs à la plage d'entrée du convertisseur.
- Un bloqueur dont la mission consiste à prélever un échantillon de la sortie et de le maintenir pendant la durée de la conversion.
- Un convertisseur analogique-numérique chargé de convertir en données numériques les signaux en provenance des entrées.



Le convertisseur a une résolution de 256 points (8 bits). La pleine échelle a été réglée ici à 512 mV ce qui signifie que, compte tenu du fait que les capteurs utilisés ici ont une sensibilité de 2 volts par bar, la résolution de la mesure est donc de 1 millibar.

Chaque conversion nécessite 128 micro-secondes. La scrutation complète des 16 voies peut donc se faire en environ 2 millisecondes. Cette vitesse est largement suffisante pour son application.

La mémoire de stockage est de 8 kilo-octets, elle permet donc le stockage d'environ 500 mesures pour chacune des 16 voies disponibles.

IV - RESULTATS OBTENUS

IV - 1 - INTRODUCTION

Au total 10 essais ont été effectués pour des teneurs en eau variant de 0,5 % (sable pratiquement sec) jusqu'à 18,2 % (sable gorgé d'eau qui s'est rapidement "essoré"), ce qui a permis de couvrir la courbe de foisonnement précédemment obtenue en laboratoire.

Pour chacune des expérimentations, durant le remplissage d'une part,

puis pendant la vidange d'autre part, les contraintes exercées sur les 10 capteurs ainsi que les variations de poids du contenu du silo ont été enregistrées.

Seules quelques-unes des courbes obtenues seront présentées ici.

Le tableau (Fig. 14) indique les teneurs en eau des différents essais.

N° de l'essai	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Teneur en eau (%)	0,5	1,3	2,4	3,6	5,5	8,2	11,4	14,7	18,2	14,2

FIG. 14 : Teneur en eau des essais effectués

IV - 2 - INTERPRETATION DES ESSAIS

IV - 2 - 1 COURBES DE FOISONNEMENT

La courbe (Fig. 15) est comparable à celle trouvée précédemment (Fig. 2).

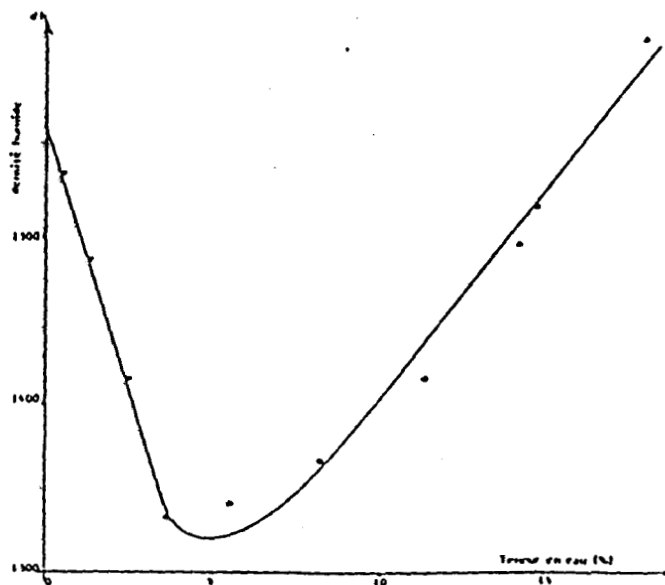


FIG. 15 : Courbe de foisonnement du sable d'Oise (dans le silo)

Nous pouvons remarquer simplement que les densités humides dans le silo sont supérieures à celles obtenues en utilisant un récipient de 1 l.

la compacité ayant augmenté en raison du mode de remplissage.

L'allure de cette courbe montre de nouveau que pour une teneur en eau de l'ordre de 3 %, le foisonnement n'est plus perceptible et qu'il régresse même lorsque le taux d'humidité augmente.

IV - 2 - 2 PRESSIONS EXERCEES SUR LES CAPTEURS

Les tableaux (Fig. 16, 17 et 18) présentés ci-après donnent les pressions mesurées par les 10 cellules à différents stades des essais (valeurs exprimées en 10^{-4} MPa).

L'essai n°10 sera traité séparément.

IV - 2 - 2 - 1 - Pressions en fin de remplissage (Fig. 16)

N° des essais N° des capteurs	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	15	14	14	14	10	20	13	15	13
1	9	15	14	12	12	14	15	18	19
2	7	9	13	16	12	12	14	21	11
3	6	12	18	X	X	16	14	13	14
4	14	15	15	13	12	11	12	12	17
5	15	12	16	14	17	15	13	22	23
6	18	14	13	14	13	13	14	17	13
7	13	12	12	11	13	22	14	12	19
8	14	14	14	12	22	15	21	24	16
9	18	13	14	18	16	11	17	18	16

FIG. 17

IV - 2 - 2 - 2 - Pressions à l'ouverture de la trémie (Fig. 17)

$\begin{matrix} \text{N}^\circ \text{ des} \\ \text{essais} \\ \text{N}^\circ \text{ des} \\ \text{capteurs} \end{matrix}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	16	20	23	16	14	24	18	19	18
1	17	21	22	15	15	17	18	22	25
2	14	16	14	16	16	16	15	23	16
3	8	8	7	X	X	X	16	18	17
4	3	3	3	4	10	11	11	11	6
5	12	12	12	16	26	22	20	28	23
6	16	17	17	17	15	19	19	22	23
7	6	6	6	5	10	13	12	12	9
8	8	8	8	15	22	23	24	28	22
9	13	13	13	22	22	17	22	24	22

FIG. 17

Une voûte ayant stoppé la vidange dès l'essai n° 4, il a été nécessaire d'agir sur l'inclinaison des volets pour relancer l'écoulement de cet essai et les suivants.

IV - 2 - 2 - 3 - Pressions au début de l'écoulement (Fig. 18)

N° des essais \	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	16	20	23	19	11	9	9	9	11
1	17	21	22	14	9	4	4	4	4
2	14	16	14	12	3	1	0	0	2
3	8	8	7	15	X	X	X	X	X
4	3	3	3	4	4	1	3	4	4
5	12	12	12	8	6	5	10	12	5
6	16	17	17	15	10	13	23	18	24
7	6	6	6	4	4	3	6	6	5
8	8	8	8	4	6	6	16	14	14
9	13	13	13	9	7	7	24	18	23

FIG. 18



IV - 2 - 3 - COMMENTAIRES DE CES RESULTATS

Les résultats donnés par la cellule n° 3 ayant posé un certain nombre de problèmes durant les essais (non retour à zéro), ont été écartés des interprétations.

Trois catégories d'essais sont à distinguer :

1) Essais n° 1 - 2 et 3 : Il y a eu écoulement dès l'ouverture de l'orifice de la trémie.

.../...

2) Essais n° 4 - 5 - 6 - 7 - 8 et 9 : une voûte s'est formée (probablement avant la fin du remplissage du silo).

3) Essai n° 10 : volets ouverts, avant le remplissage du silo, à l'angle optimum qui a été déduit des essais de la 2ème catégorie.

En ce qui concerne la première série d'expérimentations, les cellules 0, 1, 2, ont été davantage sollicitées en début de vidange qu'en fin de chargement. Le contraire est à noter pour les capteurs 4, 5, 7 et 8. Quant aux deux derniers (6 et 9) placés dans le haut du volet latéral gauche, ils ont subi les mêmes efforts. Dès qu'une voûte est apparue (série d'essais de la 2ème catégorie), tous les capteurs (sauf le 4 et le 7) ont dû supporter des contraintes plus importantes.

Nous avons donc actionné l'étrier de façon à augmenter la section de l'orifice de vidange. Le volet frontal se déplaçant plus rapidement que les deux volets latéraux, a vu la pression s'annuler sur certains de ses capteurs. Dans la trémie nous avons remarqué que le matériau s'était désolidarisé de cette paroi frontale. Les cellules placées dans la partie la plus haute ont toujours subi les pressions les plus fortes. Il faut aussi ajouter que ce sont les capteurs (6 et 9) qui ont été les plus sollicités durant l'écoulement du sable à forte teneur en eau.

Il apparaît donc que si une voûte doit se former (ce que nous avons constaté pour un taux d'humidité supérieur à 3 %) , elle se forme dans la partie supérieure de la trémie, les appuis se faisant sur pratiquement toute la surface des parois inclinées. Toutefois des efforts plus importants sont à noter autour des capteurs (6 - 9) et (5 - 8) - (partie supérieure de la trémie.)

Un faible déplacement des parois latérales permet de faire chuter les contraintes dans la partie basse de la trémie par augmentation du volume de celle-ci et ainsi de provoquer le dévoûtage par rupture des réactions d'appuis.

IV - 2 - 4 - DEBITS MASSIQUES OBTENUS

L'enregistrement de la variation de poids du contenu du silo en fonction du temps a permis de calculer les débits massiques pour tous les essais.

Les résultats portés sur le graphique (Fig. 19) montrent l'influence de la teneur en eau sur la mobilité des grains.

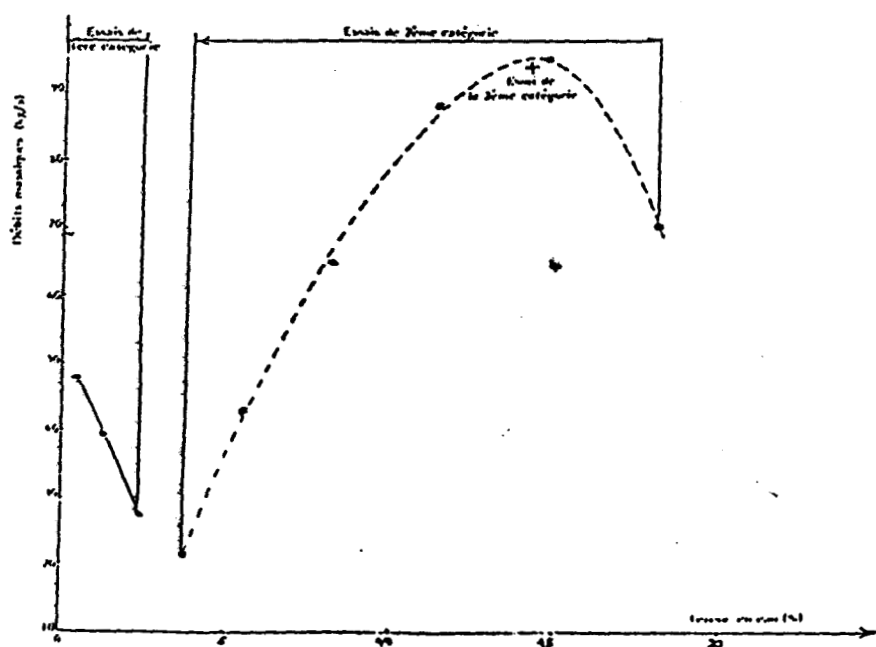


FIG. 19 : Débits massiques

A sec le débit a été très élevé (près de 50 kg/s), il a diminué de moitié dès que l'on s'est approché de la valeur maximale du foisonnement (teneur en eau voisine de 3 %). Au delà il a été nécessaire d'agrandir l'orifice pour relancer de nouveau la vidange.

Pour les essais de 2ème catégorie ($W > 3\%$) les débits ont fortement augmenté pour passer par un maximum à $W = 15\%$, ceci pour un angle d'ouverture de trémie identique (voir fig. 23).

Signalons aussi qu'il est exceptionnel de manipuler un sable ayant des teneurs en eau supérieures à 15 %. Compte tenu de sa forte perméabilité, le sable s'essore très vite et l'humidité chute rapidement en dessous de 15 %.

IV - 2 - 5 - ALLURE DES ECOULEMENTS

Lors de notre premier essai, le matériau s'est écoulé de façon continue, sans aucune perturbation.

Dès qu'il a été légèrement humidifié, une zone morte est apparue dans le silo, au voisinage de la rupture de pente frontale. L'écoulement s'est toutefois poursuivi par la cheminée qui surplombait l'orifice de vidange ; des paquets de matériau se sont détachés successivement de cette partie fixe pour alimenter la cheminée, ce jusqu'à vidange complète (Fig. 20)

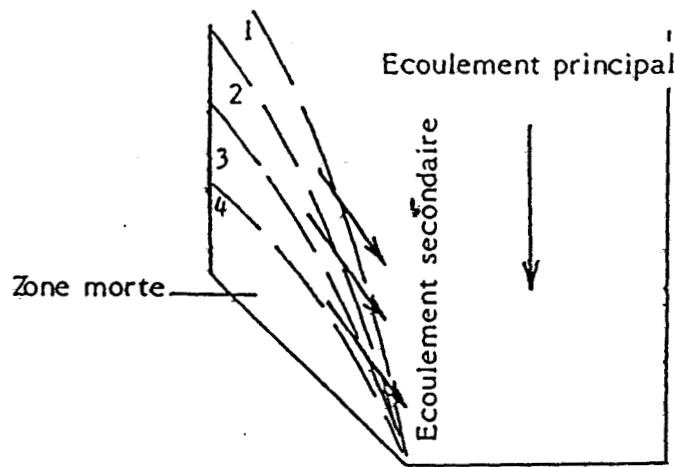


FIG. 20 : Ecoulement à faible teneur en eau

Pour les essais de 2ème catégorie, le sable s'est écoulé par saccades (après agrandissement de l'orifice de vidange).

Nous avons constaté des phénomènes de formation et de rupture de voûte successifs. Ces ruptures de voûte apparaissant dans la partie basse de la trémie, se produisent par des détachements alternés de matériau, accompagnés d'un mouvement vertical descendant de l'ensemble du produit (Fig. 21 et 21 b).

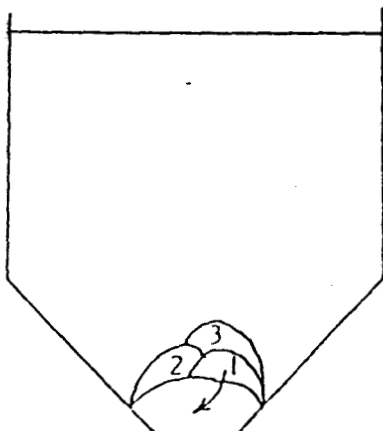


FIG. 21

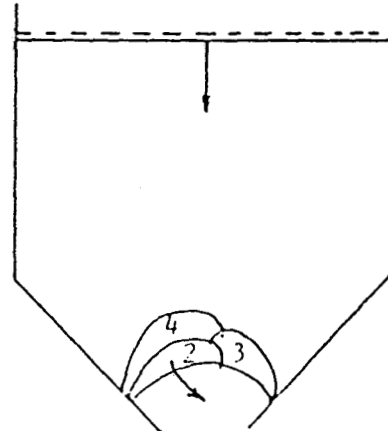


FIG. 21 bis

Pour une quantité d'eau plus importante ($> 10\%$), les ruptures de voûte se sont produites à des fréquences beaucoup plus élevées donnant l'impression d'un écoulement en continu. Ceci peut s'expliquer par une diminution de la cohésion avec le taux d'humidité.

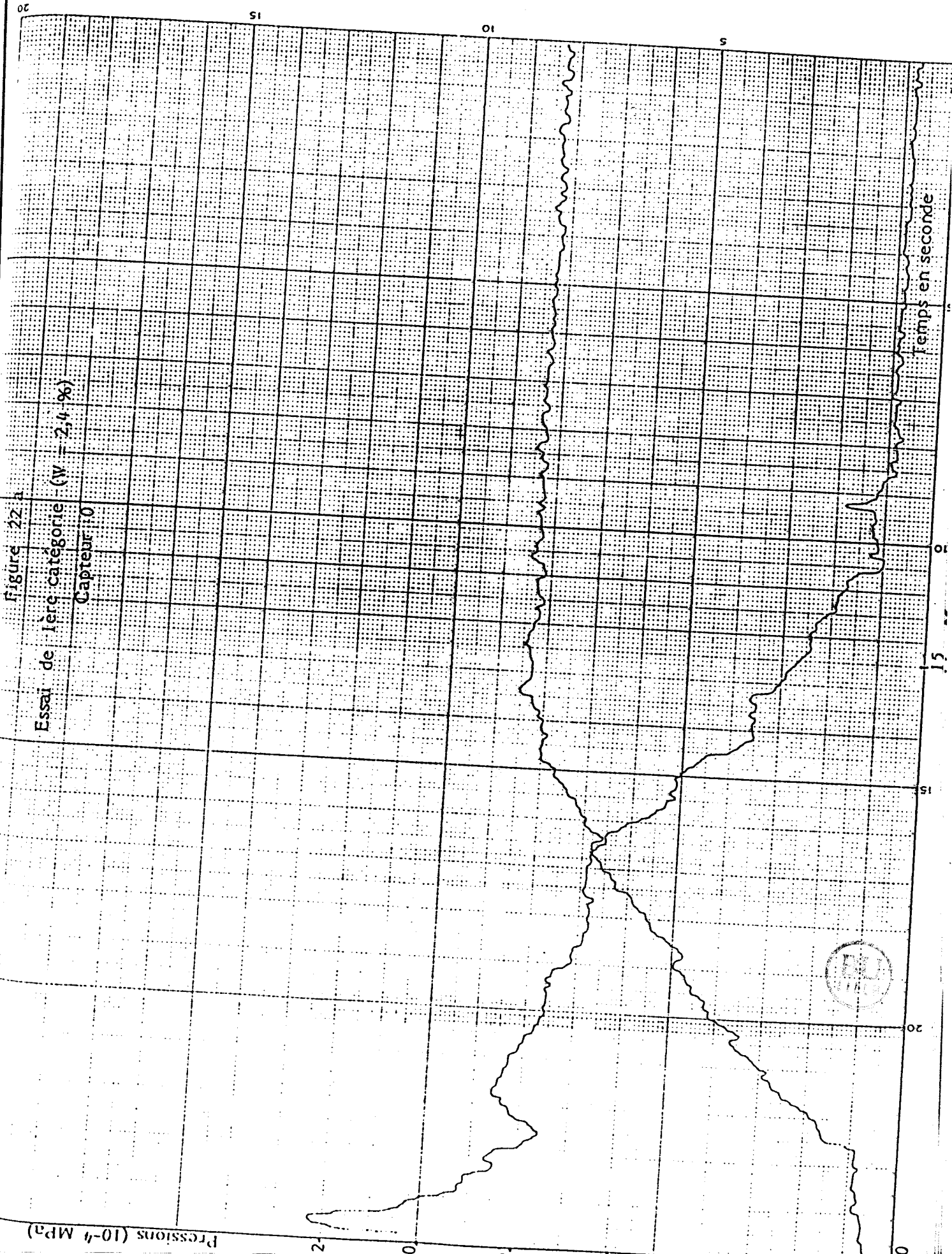
IV - 2 - 6 - ALLURE DES COURBES DE PRESSION

Le fait d'avoir d'une part un matériau hétérogène du point de vue granulométrique et d'avoir d'autre part un mélange triphasique (squelette solide - air - eau) lui conférant une cohésion non négligeable, rend assez délicate l'interprétation des courbes de pression obtenues.

En effet, le passage sur la partie active des capteurs de pression, de grains de tailles différentes et de petites alvéoles d'air (constatées pendant le remplissage du silo) donnent des courbes présentant de nombreux pics dont l'amplitude augmente sensiblement avec la teneur en eau (Fig. 22 a, b et c).

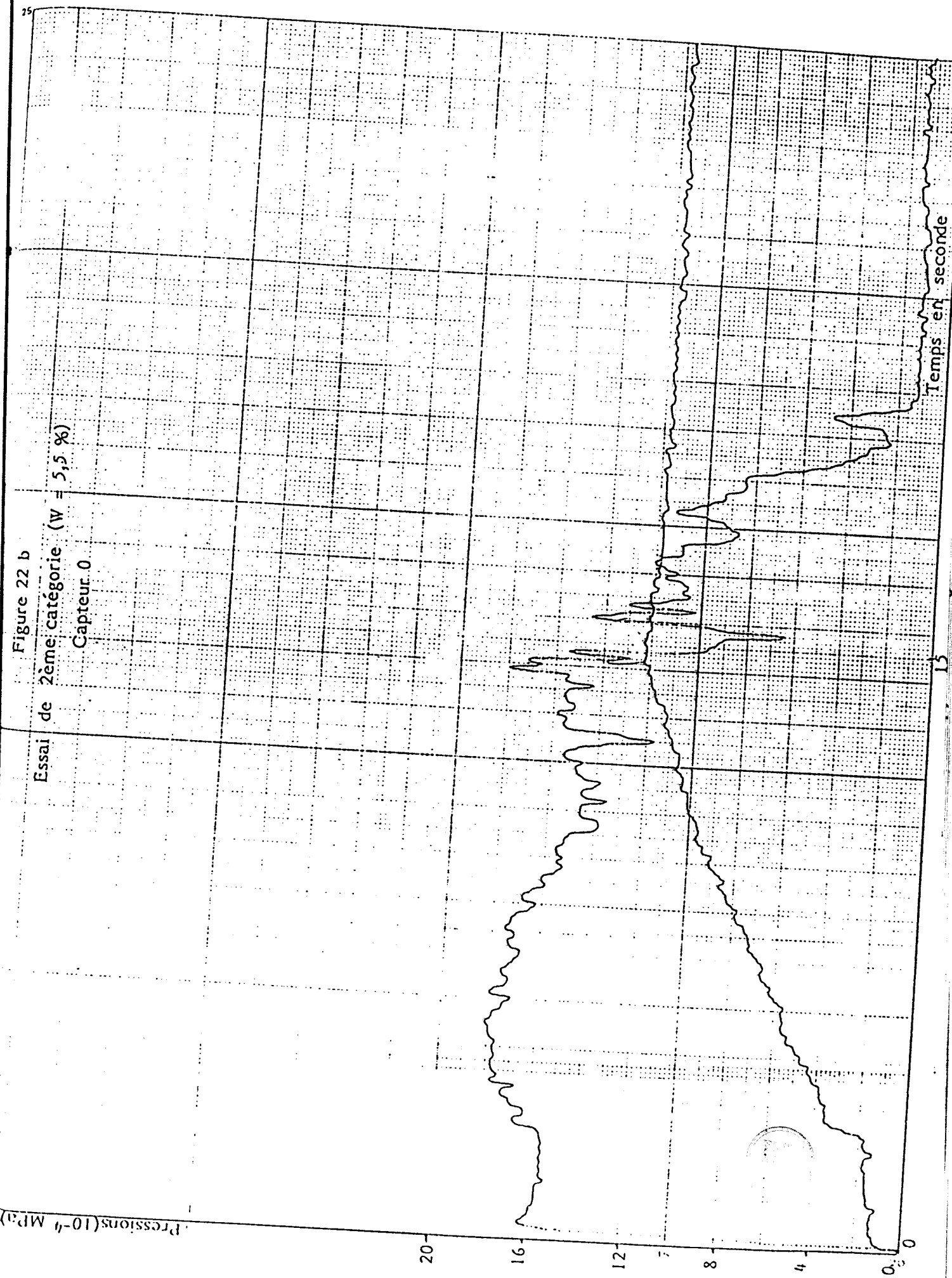
Remarques

Les expérimentations d'écoulement en silos étant réalisées immédiatement après homogénéisation du matériau à une teneur en eau désirée, le facteur temps de stockage, donc de consolidation du produit ensilé ainsi que son drainage n'ont pas été pris en compte.



25

Figure 22 b
Essai de 2ème catégorie (W = 5,5 %)
Capteur 0



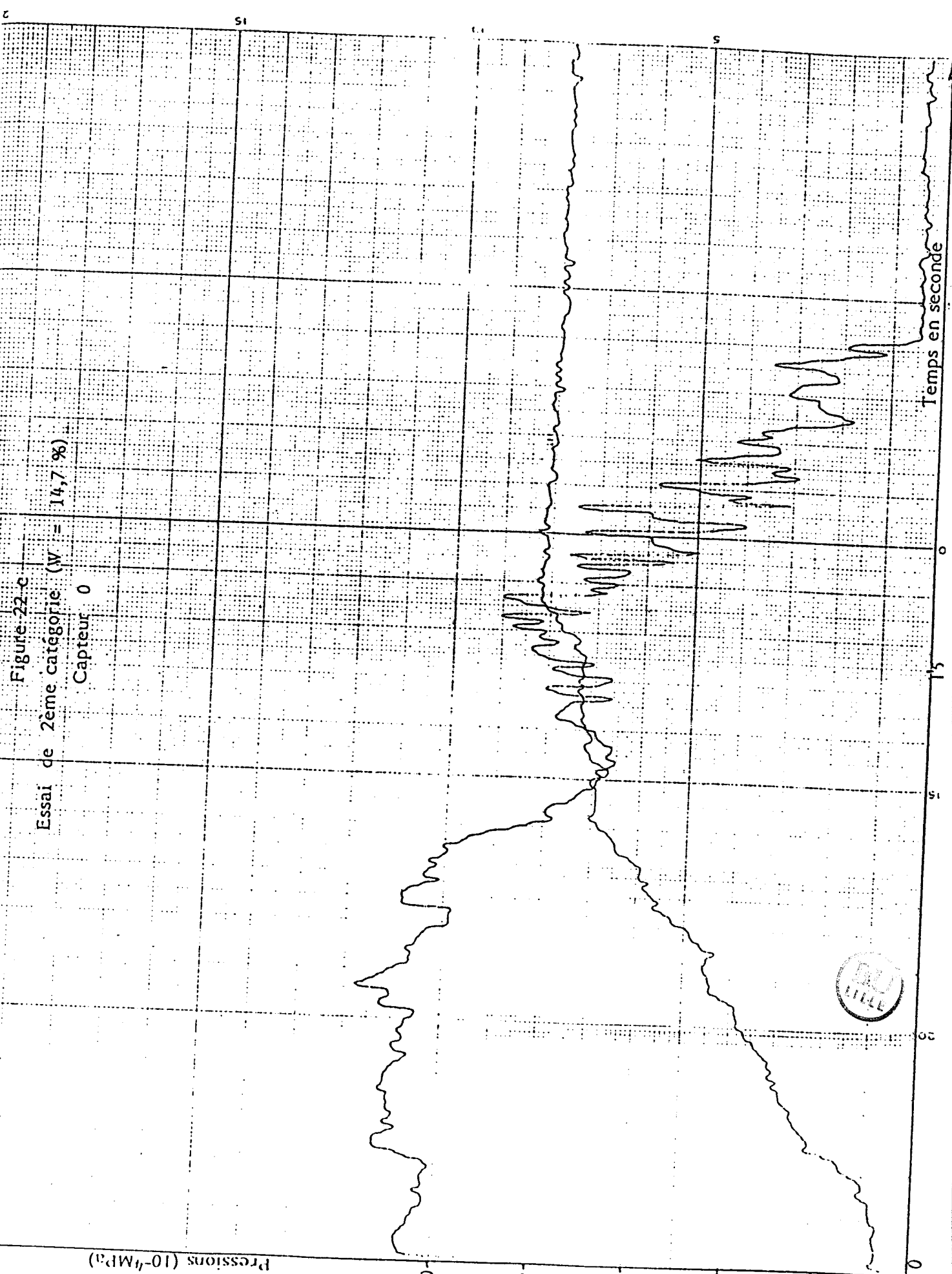


Figure 22-c
Essai de 2^{ème} catégorie (W = 14,7 %)
Capteur 0



IV - 2 - 7 - ANGLES D'OUVERTURE DE LA TREMIE

Afin de pouvoir décolmater le silo, nous avons proposé un système mécanique simple permettant de modifier progressivement la section de la trémie.

Le chargement des pentes des parois inclinées permet au matériau de se décompresser, à la voûte de se détruire et à l'écoulement de reprendre.

Les valeurs de l'angle formé par l'horizontale et le plan incliné sont portés dans le tableau suivant (Fig. 23).

	N° de l'essai									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Angles d'ouverture de la trémie (en degrés)	45	45	45	49	53	52	53	52,5	55	53 valeur imposée au début de l'essai

FIG. 23 : Angles d'ouverture de la trémie

Remarquons que pour la trémie et le sable d'Oise utilisés, il y a un angle optimal d'environ 53° pour lequel l'écoulement se produit dans tous les cas.

Pour l'essai n° 10, nous nous sommes fixés l'angle d'ouverture de la trémie à 53° en utilisant le matériau 24 H après l'essai n° 9 (le sable s'est fortement essoré, passant de 18,2 % à 14,2 % de teneur en eau).

L'écoulement s'est effectué dès l'ouverture de l'orifice de vidange.

Les mesures des cellules de pression sont restées pratiquement identiques à celles relevées durant l'essai n° 8 (W = 14,7 %).

Les capteurs les plus sollicités étant toujours les n° (6 - 9) et (5 - 8).

Sur la paroi frontale, les valeurs sont restées peu élevées ; elles ont toutefois diminué assez sensiblement en début de vidange.

PROSPECTIVES

Toutes les expérimentations effectuées au laboratoire de Mécanique des Sols de l'ENSTIMD et nécessaires à la conduite de ce travail, sur le problème de l'écoulement en silo d'un matériau pulvérulent cohésif en présence d'eau, nous ont permis de dégager deux aspects positifs :

- 1) Il existe une bonne corrélation entre la courbe de foisonnement obtenue sur le sable d'Oise et l'influence de la teneur en eau sur le comportement de ce produit pulvérulent durant son écoulement en silo.
- 2) Le dispositif mécanique réalisé permettant de faire évoluer la géométrie de la trémie s'est révélé efficace.
Notons néanmoins que la rotation manuelle de la vis de manoeuvre permettant d'obtenir un agrandissement de l'orifice de vidange a occasionné quelques à-coups néfastes au bon fonctionnement du système.

A ce stade de l'étude, il est toutefois possible d'envisager quelques prolongements.

Les essais de Mécanique des Sols qui permettent de caractériser les matériaux sont relativement délicats à mettre en oeuvre. Il apparaît donc nécessaire dans un premier temps de voir si une corrélation n'existerait pas entre la courbe de foisonnement et les résultats d'essais plus simples tels que l'essai au bleu de méthylène ou l'essai d'équivalent de sable.

Ensuite il est nécessaire de vérifier la validité de la corrélation courbe de foisonnement/écoulement pour d'autres matériaux (voir fig. 1 : courbes de foisonnement de certains des charbons étudiés).

Il est aussi possible d'orienter les travaux vers une amélioration du comportement du matériau à ensiler :

- diminution de sa teneur en eau par :
 - ajout d'un produit hydrophile,
 - ou élévation de la température.
- augmentation de la mobilité des grains par :
 - apport d'un produit fluidifiant,
 - ou apport d'un produit tensio-actif.

L'étude de la diminution du coefficient de frottement matériau/parois de la trémie peut apporter une amélioration sensible de l'écoulement.

L'augmentation du frottement matériau/parois du fût peut faire diminuer les contraintes au niveau des appuis des voûtes.

Enfin, l'amélioration du dispositif mécanique de mise en mouvement des parois de la trémie peut être envisagée afin d'obtenir une ouverture progressive.

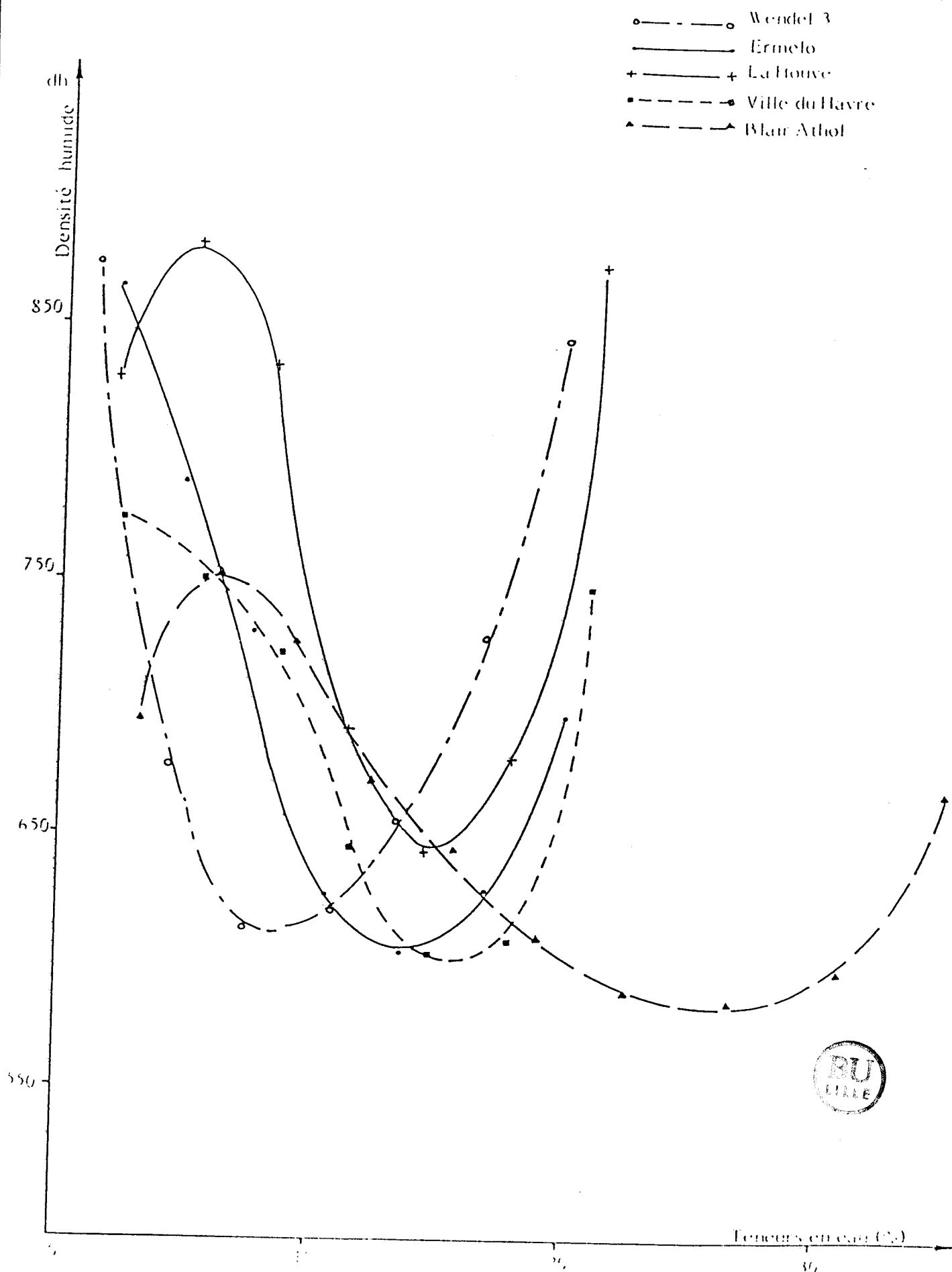


FIG. 1 : Courbes de l'assèchement de quelques charbons

BIBLIOGRAPHIE

- [1] - Analyse des minéraux argileux par diffraction X (mode opératoire).
- [2] AUBOUIN - BROUSSE et LEHMAN
- Précis de Géologie - DUNOD - 1926.
- [3] BARRABE et FEYS
- Géologie des charbons et bassins houillers - MASSON.
- [4] BASSAL J. L.
- Cours de Mécanique des Sols - ENSTIMD - 1971.
- [5] BERTIN L.
- Géologie et Paléontologie - Librairie Larousse.
- [6] BIAREZ J.
- Contribution à l'étude des propriétés mécanique des sols et des matériaux pulvé-
rulents - Thèse de Doctorat d'Etat - Grenoble.
- [7] CAILLEUX A.
- Géologie générale - MASSON - 1976.
- [8] CAQUOT - KERISEL
- Traité de mécanique des sols - GAUTHIER/VILLARS - Editeur - 1966.
- [9] CALVEZ
- Synthèse bibliographique sur le criblage des charbons pulvérulents humides -
CERCHAR 1983.
- [10] CAMBOU B.
- Compressibilité d'un milieu pulvérulent. Influence de la forme et de la dimension
des particules sur les propriétés mécaniques d'un milieu pulvérulent. Thèse de
troisième cycle de mécanique des solides. Grenoble 1972.
- [11] CAUSSIGNAC J. M.
- Des techniques métrologiques innovantes. Bulletin liaison P et Ch - n° 139 - Sept/
Oct 1985.
- [12] CERIB
- Fiche technique L 9145 - Foisonnement et humidification du sable.
- [13] COAL RESEARCH ESTABLISHMENT
- A measure of coal/handleability applicable to industrial equipment. ECSC - Projet
n° 7220 EO 804 - Mars 1985.

- [14] CODETEC - CERCHAR
- Cahiers de l'utilisation du charbon - Edition Technip. 1982.
- [15] COSTET. J. - SANGLERAT G.
- Cours pratique de mécanique des sols - DUNOD 1975.
- [16] CRESSON E.
(Ministre du redéploiement industriel)
- Discours régional sur les économies d'énergie - La Voix du Nord - 1984.
- [17] DELATTRE Ch. - MERIAUX E.
- Méthode d'Etude des charbons - GAUTHIER/VILLARS - 1968.
- [18] DELATTRE Ch. - MERIAUX E.
- A propos de la pétrologie des houilles. Extrait du bulletin des professeurs de biologie
n° 4 - 1973. Géologie Lille 1.
- [19] DURIEZ M. et J. ARRAMBIDE
- Nouveau traité de matériaux de construction tome 1 - DUNOD - 1961.
- [20] F E M (Fédération Européenne de la manutention)
- Caractéristiques des produits en vrac intervenant dans la manutention pneumatique
F E M - 2 - 481.
- [21] FERRETI M.
- La valorisation du charbon - gazéification - liquéfaction - carbochimie.
- [22] FILLIAT G.
- La pratique des sols et fondations - Edition du moniteur - 1981.
- [23] FOND
- L'énergie charbon : un atout pour la compétitivité de l'industrie. Revue de l'Energie
n° 365 - Juin/Juillet 1984.
- [24] FOUCAULT R.
- Dictionnaire de Géologie - MASSON - 1980.
- [25] GIHEL F.
- L'avenir de l'Energie - Revue de l'Energie n° 363 - Avril 1984.
- [26] HABIB P.
- La résistance au cisaillement des sols. Annales ITBTP. Janvier 1953.
- [27] IPPOLITO M.
- Les prix futurs du charbon. Revue de l'Energie n° 355. Juin/Juillet 1983.

- [28] JOISEL A.
- Les adjuvants du ciment - Editeur JOISEL - 1973.
- [29] JUNG J.
- Précis de pétrographie - MASSON.
- [30] KAMGUEU
- Contribution à l'étude de l'écoulement gravitaire des matériaux pulvérulents ensilés.
INSA - Rennes 1979.
- [31] LAMBE W. et WHITMAN R.
- Soils mechanics - Editeur John Wiley - 1969.
- [32] LEVY - GARBOUA - VIVIER
- Financer le retour au charbon. Annales des Mines - Mai/Juin 1981.
- [33] LUMBRUSO A.
- Bases scientifiques du calcul des enceintes renfermant des massifs pulvérulents
et du calcul des silos - Annales ITBTP - Supplément 346 - Janvier 1977.
- [34] MAILLET P.
- Avant propos - La complexité des choix énergétiques d'aujourd'hui et de demain.
Revue de l'Energie n° 358 - Novembre 1983.
- [35] MERIAUX E.
- Contribution à l'étude pétrologique des houilles du bassin du Nord et du Pas-de-Calais.
Annales des mines de Belgique - Avril/Mai 1968.
- [36] MERIAUX E. et WATERLOT M.
- Caractères pétrographiques des houilles stéphanienues des pyrénées espagnoles.
Annales de la société géologique du Nord. T LXXX IX.
- [37] MEUNIER S.
- Dictionnaire de géologie. DUNOD - 1926.
- MODES OPERATOIRES
- [38] - Essai de cisaillement à la boîte. Mode opératoire MS L3 - DUNOD 1970.
- [39] - Essai de compressibilité à l'oedomètre. Mode opératoire SMS - Z - DUNOD 1963.
- [40] - Essai de compressibilité à l'oedomètre. Avant projet de mode opératoire. L.C.P.C.
Octobre 1978.
- [41] - Sedimentométrie. Mode opératoire G 3 - DUNOD 1970.
- [42] - Essai au bleu de méthylène. Avant projet de mode opératoire. Octobre 1979.
- [43] MORET L.
- Précis de géologie - MASSON 1958.

NORMES

1) AFNOR

- [44] - Combustibles minéraux solides : coke
Dimension supérieure à 20 mm
Détermination de la cohésion - NF M 03 046 Juillet 1983 - ISO 556.
- [45] - Détermination de la teneur du charbon en matières minérales. NF M 03 033.
Novembre 1968.
- [46] - Détermination de l'humidité. NF M 03 002 - Septembre 1973.
- [47] - Détermination de l'indice de matières volatiles du charbon. NF M 03 004 Juillet 1974.
- [48] - Détermination de pouvoir calorifique supérieur et calcul du pouvoir calorifique inférieur. NF M 03 005 Mai 1982.
- [49] - Détermination du taux de cendre des houilles. NF M 03 003 Juillet 1962.
- [50] - Essai au bleu de méthylène NF P 18 592 Juillet 1980.
- [51] - Essai d'équivalent de sable. NF P 18 598 Novembre 1979.
- [52] - Essai granulométrique. NF P 18 304 Décembre 1973.
- [53] - Granulométrie par diffraction - Circulaire Janvier 1984.

2) ASTM

- [54] - Standard test method for : unconsolidated, undrained, strength of cohesive soils in triaxial compression.

3) DIN

- [55] - Charges dans les cellules - DIN 1055 - Feuille 6 - Novembre 1964.
- [56] OLIVARI M.
 - Cours de Mécanique des Sols - Ecole centrale de Lyon - Tome 1 et 2.
- [57] PELTIER R.
 - Manuel du laboratoire routier - DUNOD 1966.
- [58] RAGUIN E.
 - Géologie appliquée - Masson 1934.
- [59] REIMBERT A.
 - Silos - Théorie et pratique. Eyrolles 1971.
 - Règles de conception et de calcul de silos en béton - Annales ITBTP n° 334
Décembre 1975.

[60] RIGOUT D.

- Comparaison de différentes méthodes de calcul des silos en béton. Annales ITBTP Supplément n° 351 - Juin 1977.

[61] RIVIERE A.

- Méthodes granulométriques - Techniques et interprétations MASSON 1977.

[62] SASSIN W.

- L'énergie fossile et ses alternatives. Revue de l'énergie n° 358. Novembre 1983.

[63] SCLIENGER M.

- Aptitude des charbons fins et humides au criblage et à la manutention. Rapport de stage. UTC Compiègne 1984.

[64] STANISLAW J.

- Le nécessaire recours à toutes les sources disponibles d'énergie. Revue de l'énergie n° 358 - Novembre 1983.

[65] TORCHET B.

- Humidimètre capacitif LPC autonettoyant. Bull liaison Labo Ponts et Chaussées n° 126 Juillet/Août 1983.

[66] TURPIN M.

- Sous quelle forme utiliser le charbon ? Annales des Mines - Mai Juin 1981.

[67] VAN KREVELEN D. W.

- Coal : Typology - Chemistry - Physics - Constitution - Elsevier scientific publishing company - Amsterdam - Oxford - New York. 1981.

CLASSIFICATION OF GEOLOGICAL STATA AND THE AGE OF COALS

TABLE III

Millions of years	Mean duration	Age of formation of coals	STRATIGRAPHIC PERIOD	Principal Foliage Plants	Principal Species of Animals	Principal Species of Plants	PRINCIPAL COAL FORMATIONS
> 1000			Proterozoic				
600-400			Algonkian				
400-350			Algonkian				
350-300			Algonkian				
300-250			Algonkian				
250-200			Algonkian				
200-150			Algonkian				
150-100			Algonkian				
100-50			Algonkian				
50-0			Algonkian				
1000-900			Algonkian				
900-800			Algonkian				
800-700			Algonkian				
700-600			Algonkian				
600-500			Algonkian				
500-400			Algonkian				
400-300			Algonkian				
300-200			Algonkian				
200-100			Algonkian				
100-0			Algonkian				
1000-900			Algonkian				
900-800			Algonkian				
800-700			Algonkian				
700-600			Algonkian				
600-500			Algonkian				
500-400			Algonkian				
400-300			Algonkian				
300-200			Algonkian				
200-100			Algonkian				
100-0			Algonkian				
1000-900			Algonkian				
900-800			Algonkian				
800-700			Algonkian				
700-600			Algonkian				
600-500			Algonkian				
500-400			Algonkian				
400-300			Algonkian				
300-200			Algonkian				
200-100			Algonkian				
100-0			Algonkian				
1000-900			Algonkian				
900-800			Algonkian				
800-700			Algonkian				
700-600			Algonkian				
600-500			Algonkian				
500-400			Algonkian				
400-300			Algonkian				
300-200			Algonkian				
200-100			Algonkian				
100-0			Algonkian				



Toutes les photographies ont été réalisées en lumière réfléchie naturelle ou polarisée en immersion dans l'huile, sur des surfaces polies perpendiculairement à la stratification. Ces planches extraites des annales de la société géologique du Nord (t LXXXIX), représentent toutes des anthracites du bassin de Pourtalet (Pyrénées).

Explication des planches :

Symboles utilisés

Grossissement x 400

V =	Vitrinite
Ct =	Cutinite
Sf =	Semi fusinite
Co =	Collinite
Re =	Résinite
Sc =	Sclérotinite
Sp =	Sporinite
Msp =	Mégaspore
Mm =	Micrinite massive
Mf =	Micrinite fine
F =	Fusinite

PLANCHE I

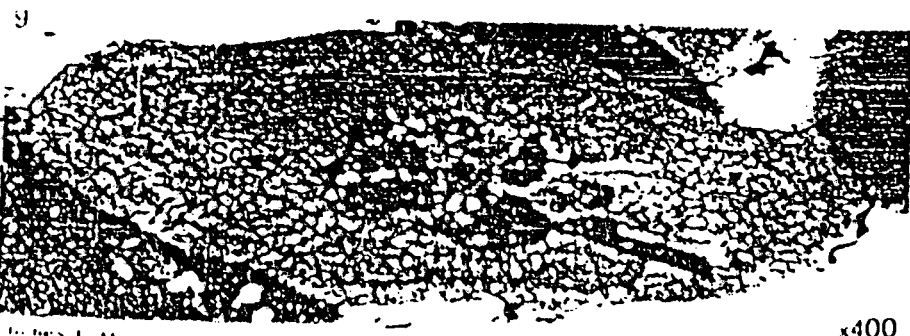
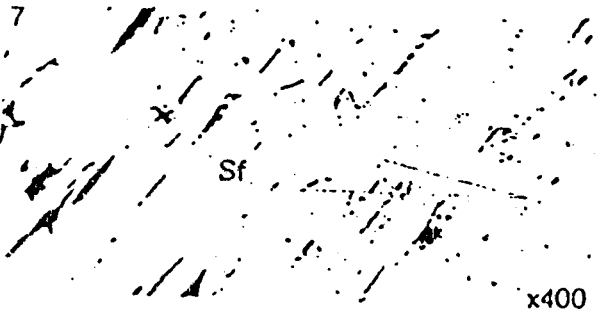
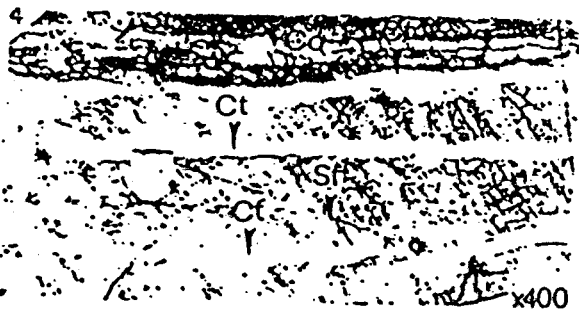
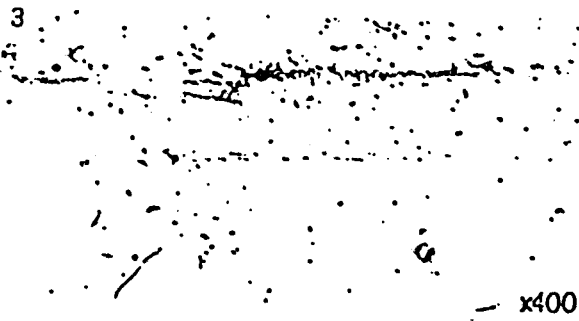
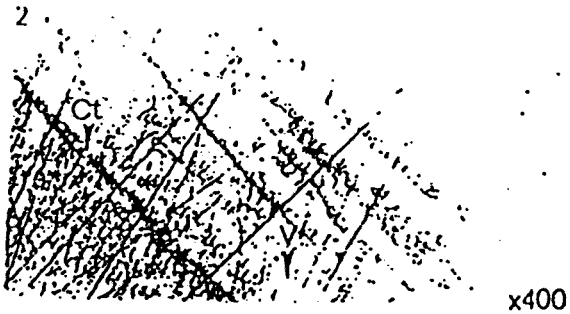


PLANCHE II

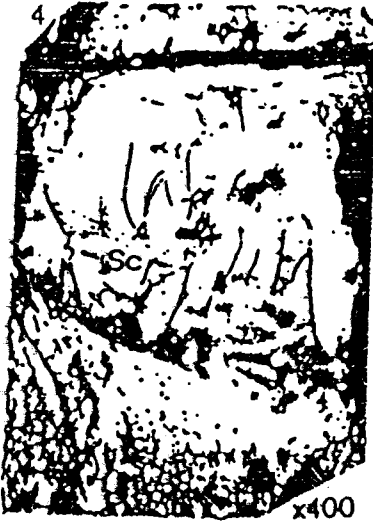
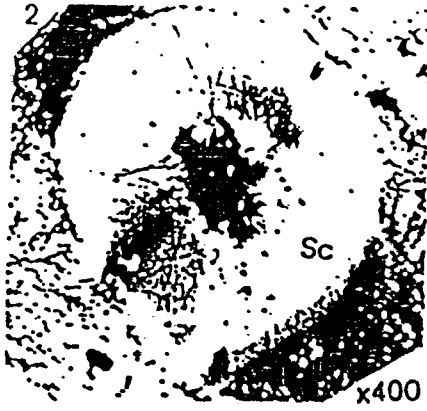
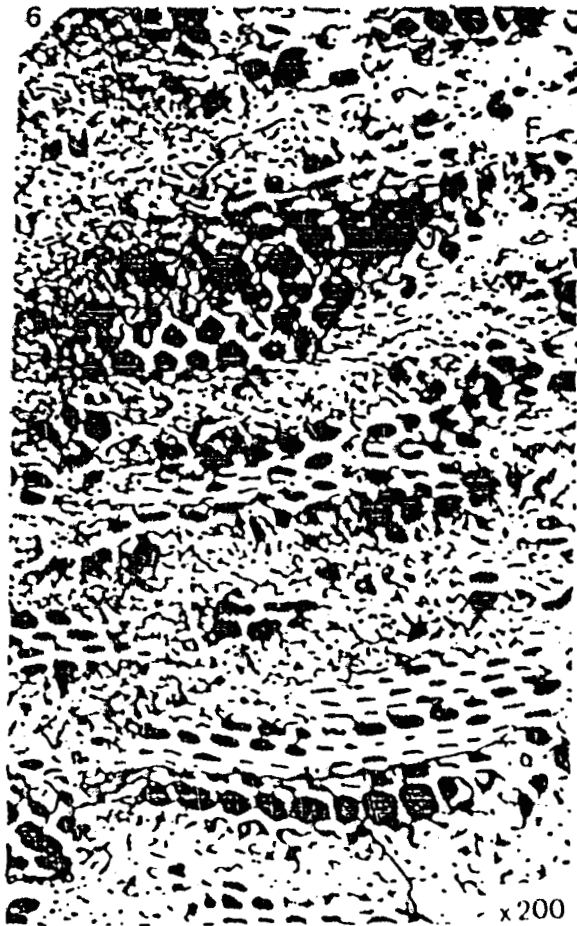
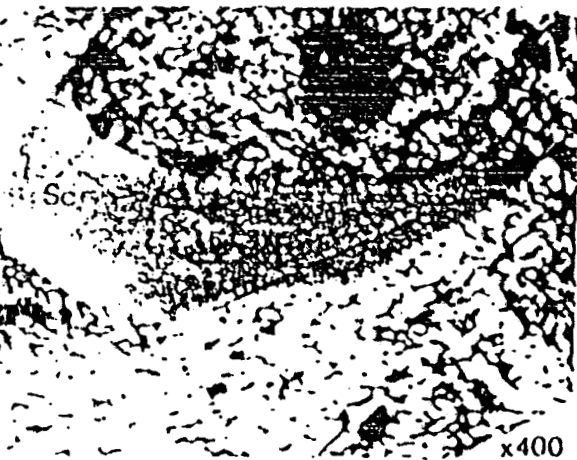
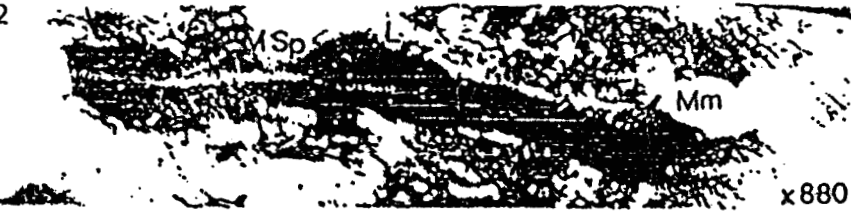
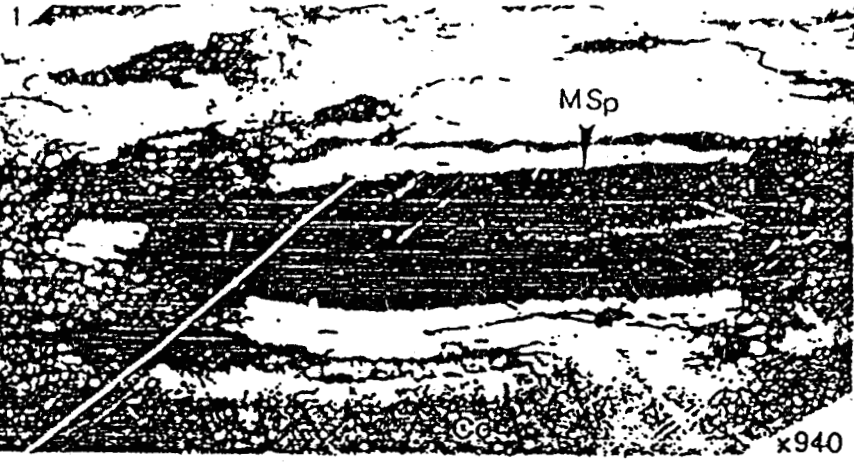
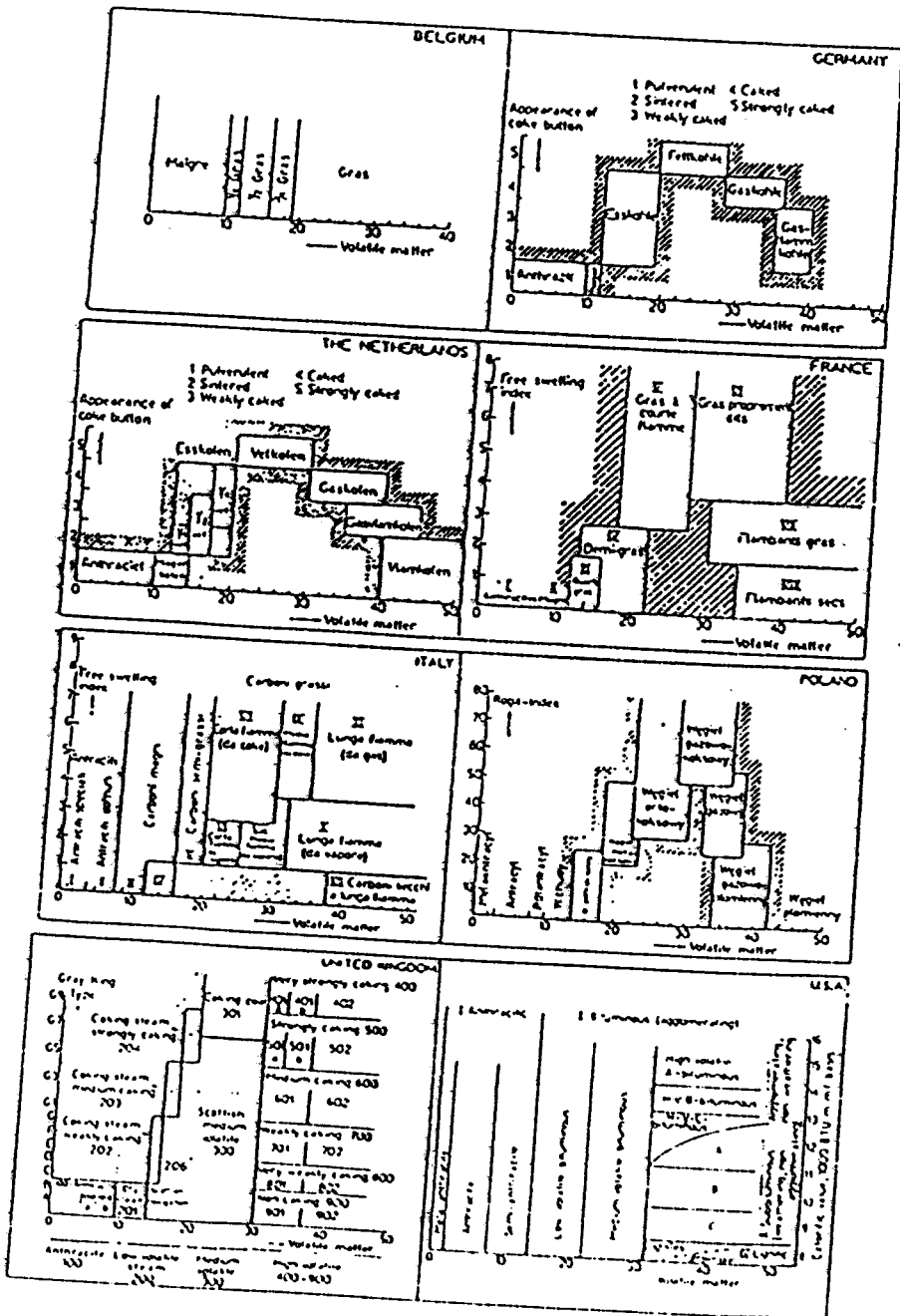


PLANCHE . III





CATEGORIES	VALEURS LIMITEES		CLASSIFICATION INTERNATIONALE GROUPE STATISTIQUE ET NUMERO DE CODE
	DE LA TENEUR EN MATIERES VOLATILES	DE L'INDICE DE CONFLEMENT	
ANTHRACITES MAIGRES (ou anthraciteux)	moins de 8 %	non fondants (laissant après carbonisation, un résidu pulvérulent)	I et II 100 - 200
QUART - GRAS	de 12 à 16 %	en dessous de 1,5	III et IV 211 - 311 212 - 312
DEMI - GRAS	de 13 à 22 %	entre 1,5 et 2,5	III et IV 212 312 - 412 321 - 421
GRAS à COURTE FLAMME (ou trois quart gras)	de 18 à 27 %	au dessus de 2,5	IV - VA et VB 321 - 421 332 - 432 322 - 422 333 - 433 323 - 423 334 - 434 435
GRAS (proprement dits)	de 27 à 40 %	au dessus de 4	VB - VC et VD 432 - 433 - 434 - 435 534 - 634 - 535 - 635 532 - 632 - 732 - 832 533 - 533 - 733
LAMBANTS GRAS	de 30 à 40 %	entre 2 et 4	VIA et VIB 522 - 622 - 722 - 822 523 - 623 - 723 - 823 521 - 621 - 721 - 821
LAMBANTS SECS	plus de 34 %	au dessous de 2 ou non fondants	VIB et VII 600 - 700 - 800 - 900 611 - 711 - 811 612 - 712 - 812

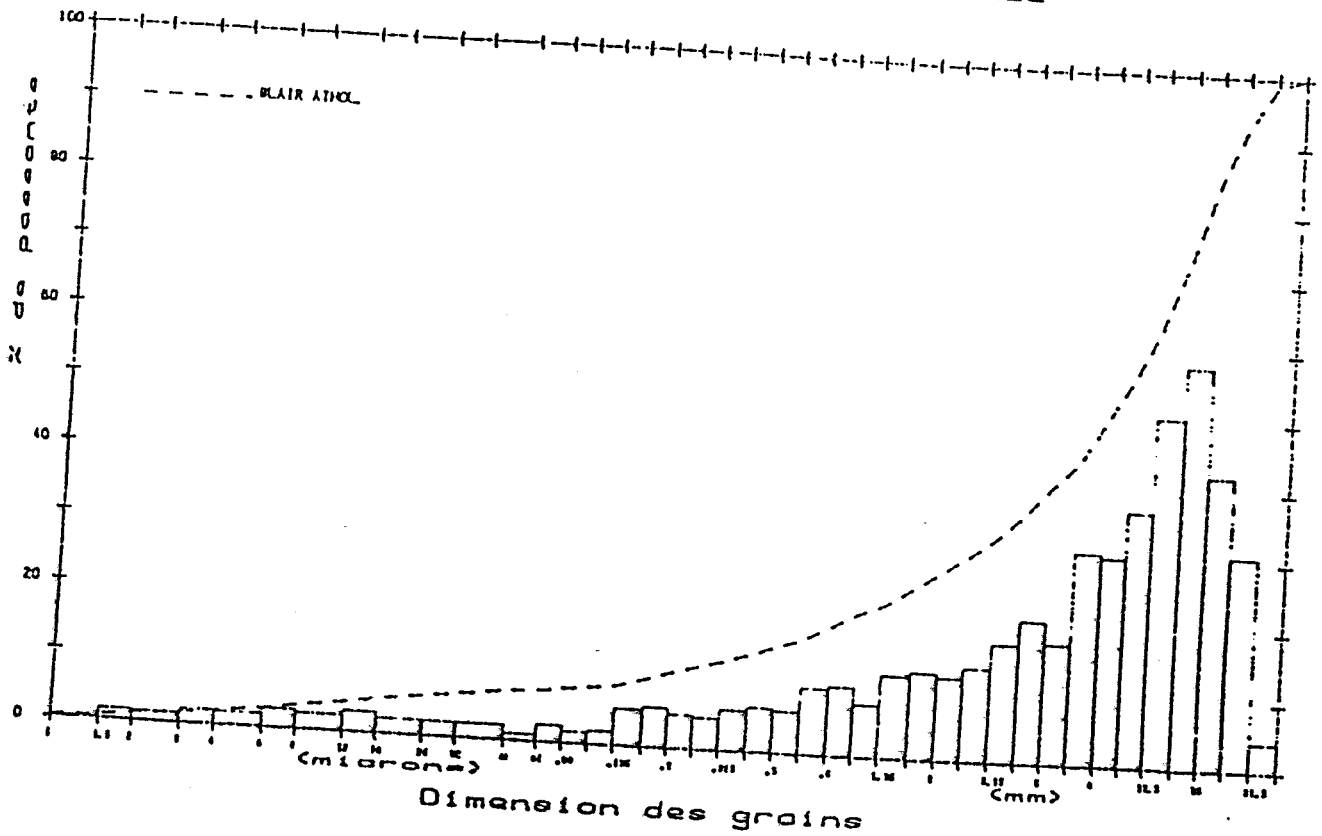


ANNEXES II

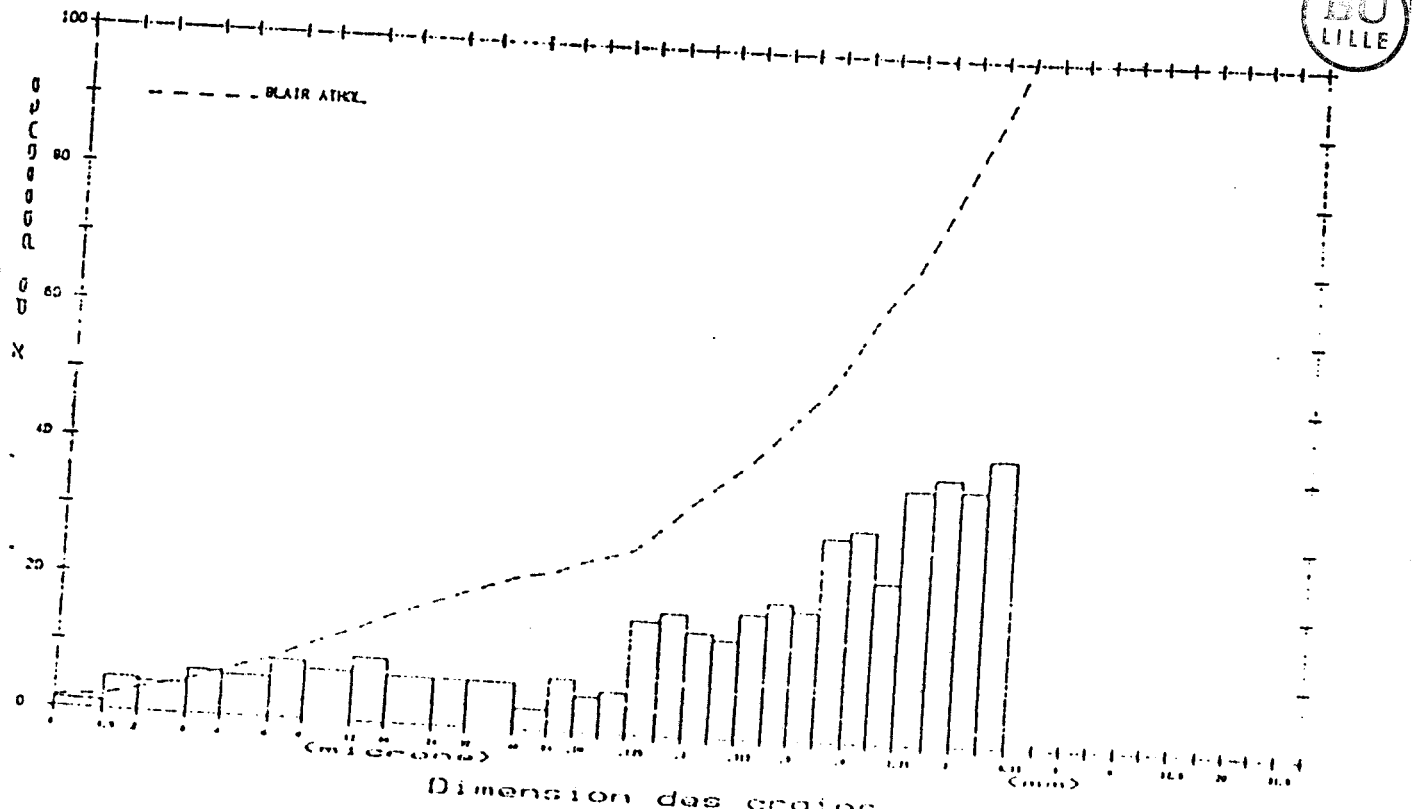
ESSAIS GRANULOMETRIQUES

2

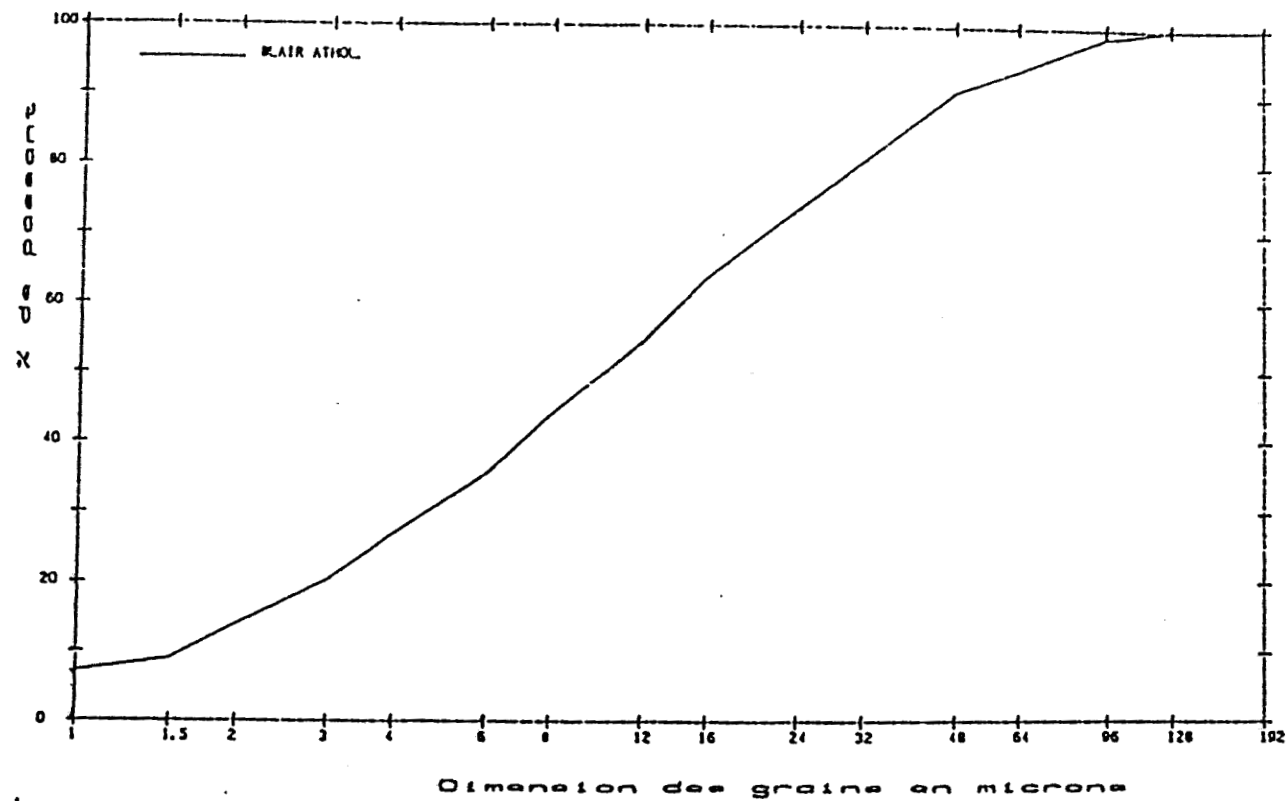
COURBE GRANULOMETRIQUE GLOBALE



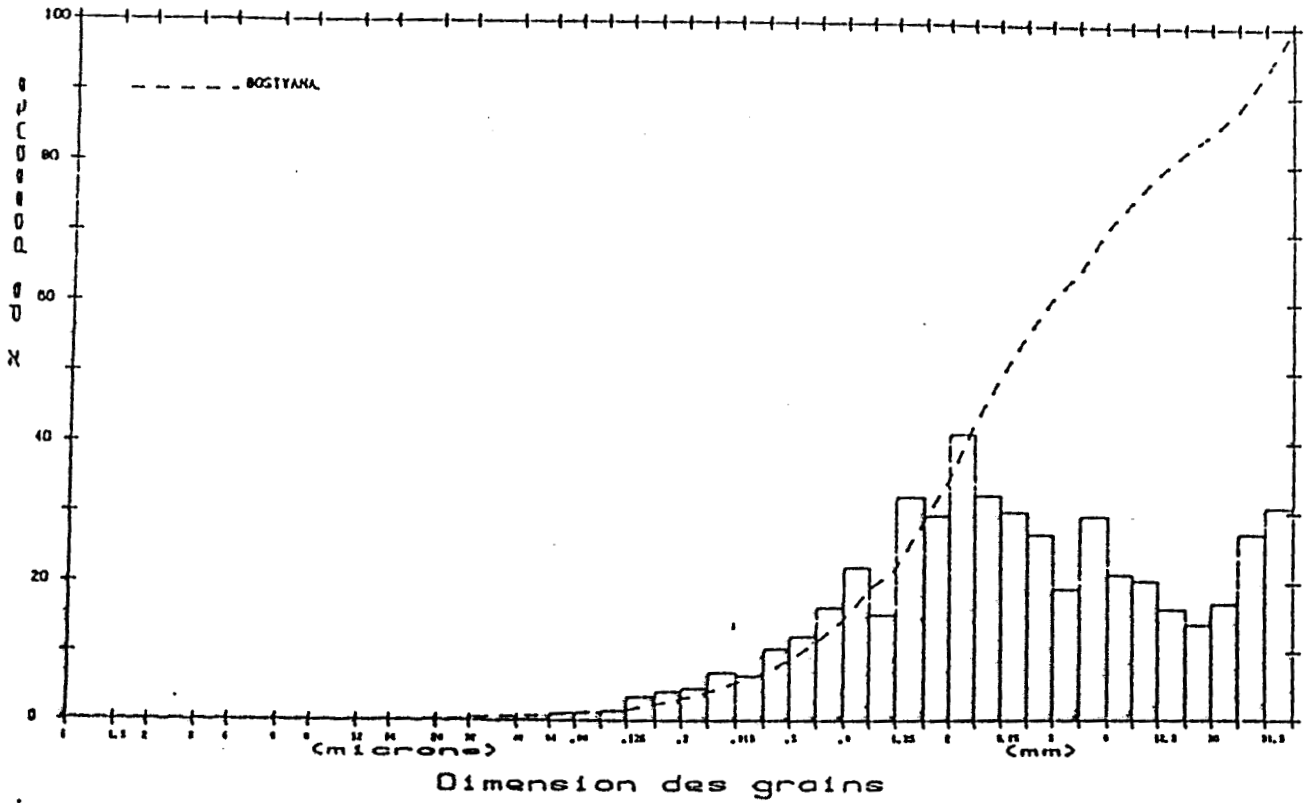
COURBE GRANULOMETRIQUE (< 4mm)



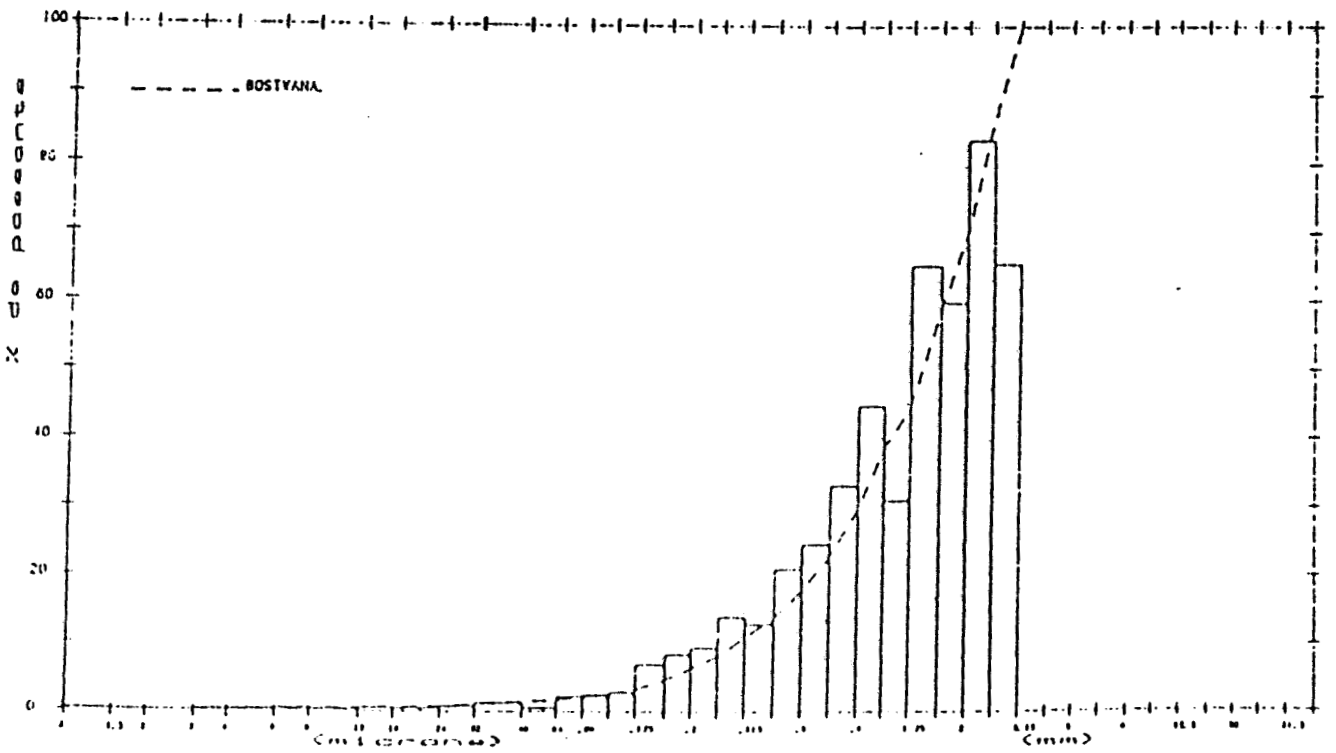
Granulometrie des elements fins



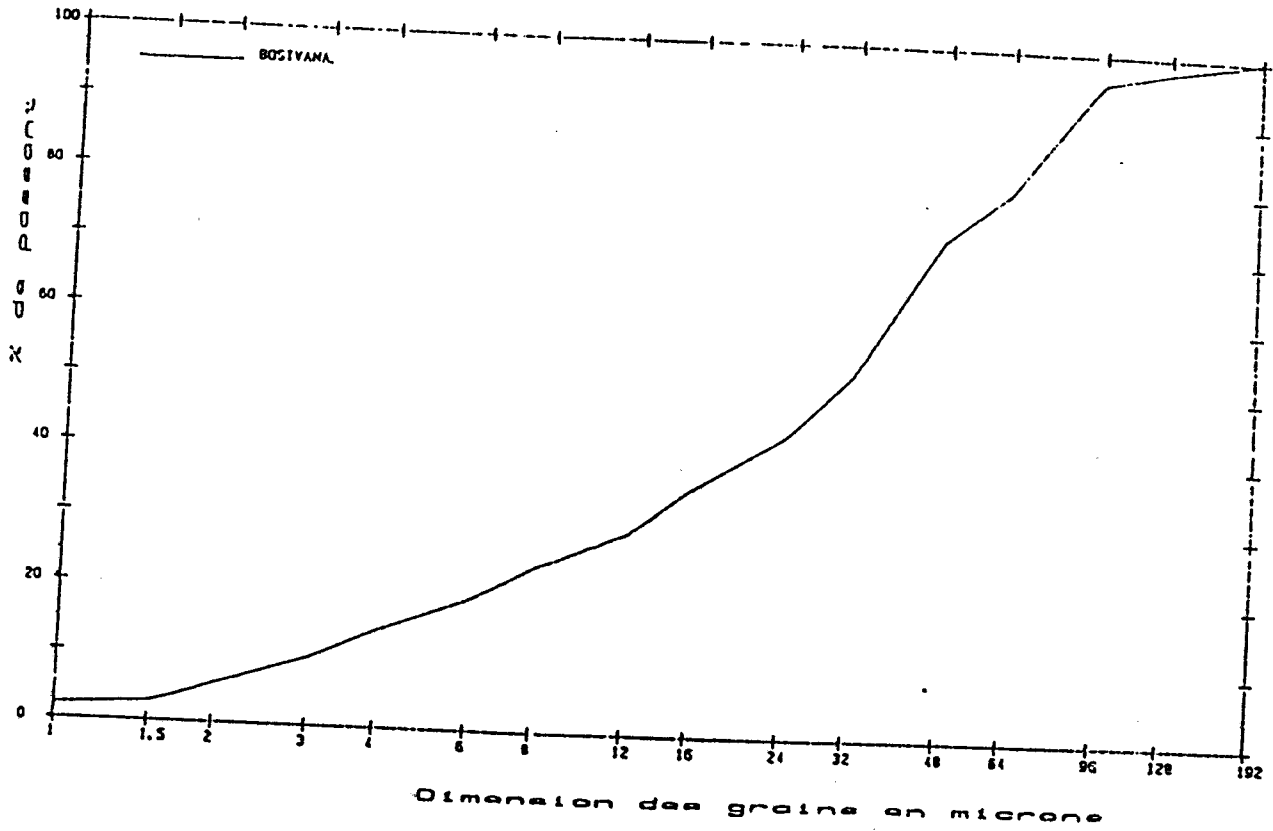
COURBE GRANULOMETRIQUE GLOBALE



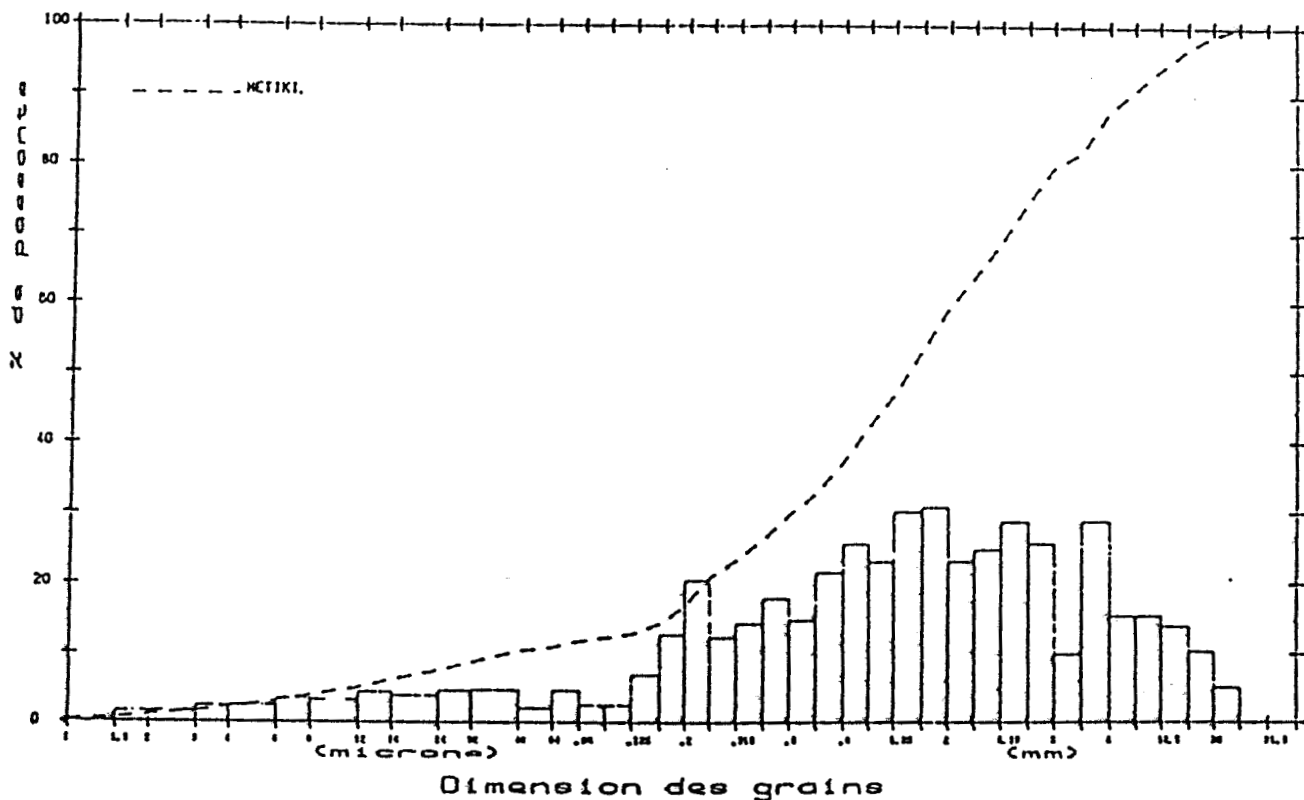
COURBE GRANULOMETRIQUE (< 4mm)



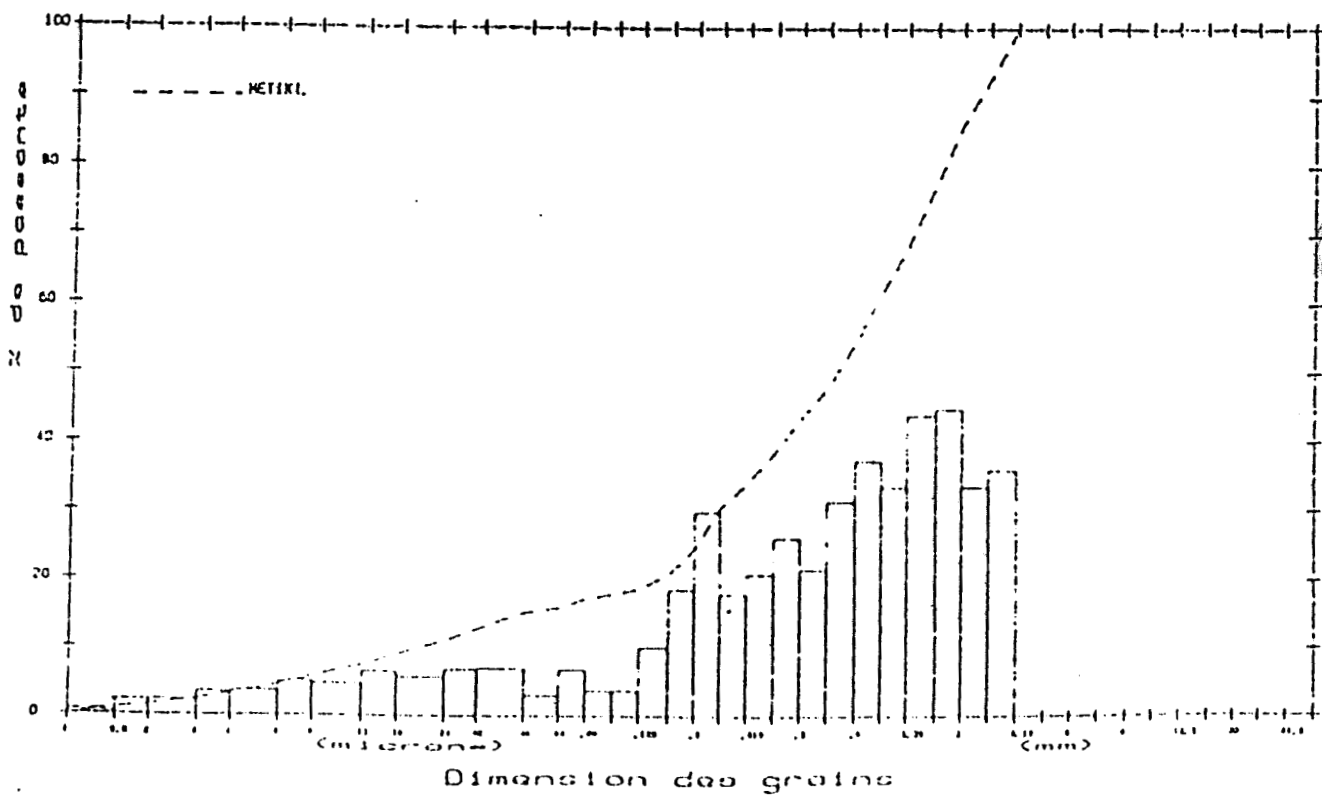
Granulometrie des elements fins



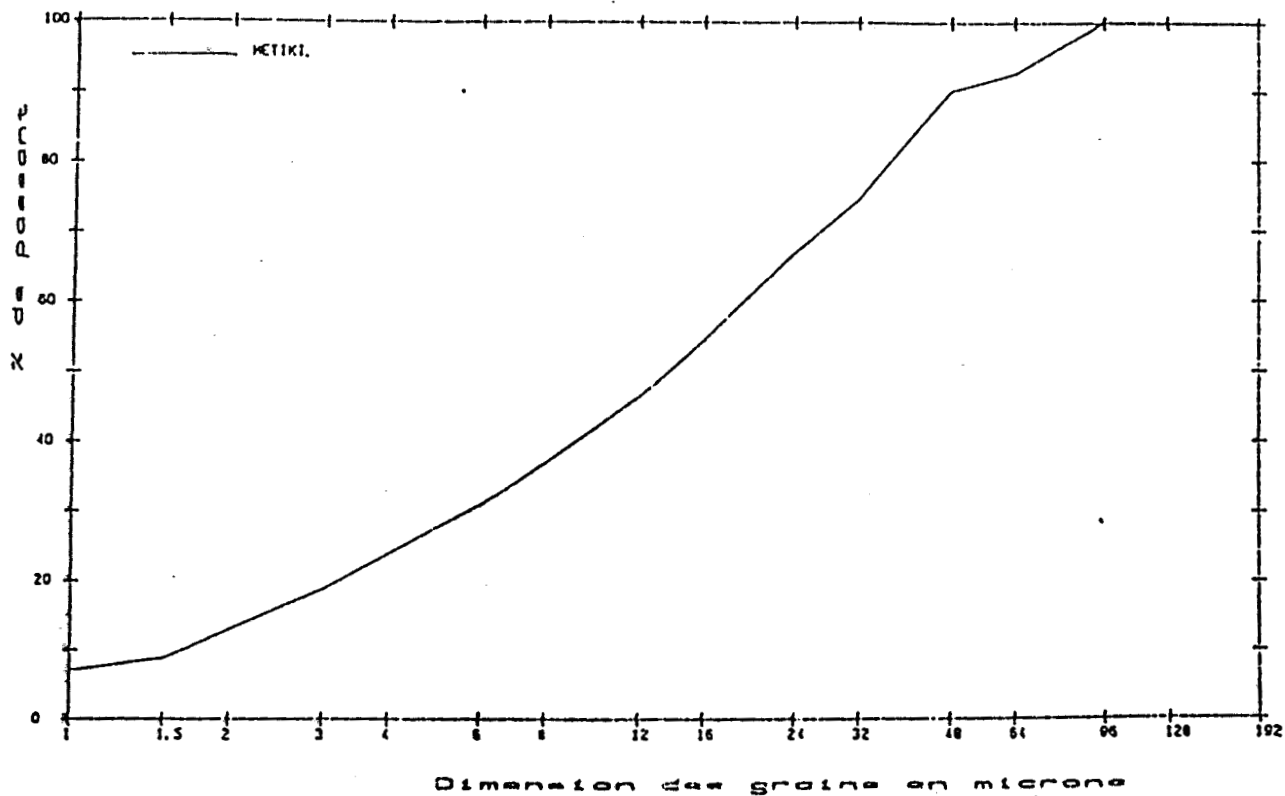
COURBE GRANULOMETRIQUE GLOBALE



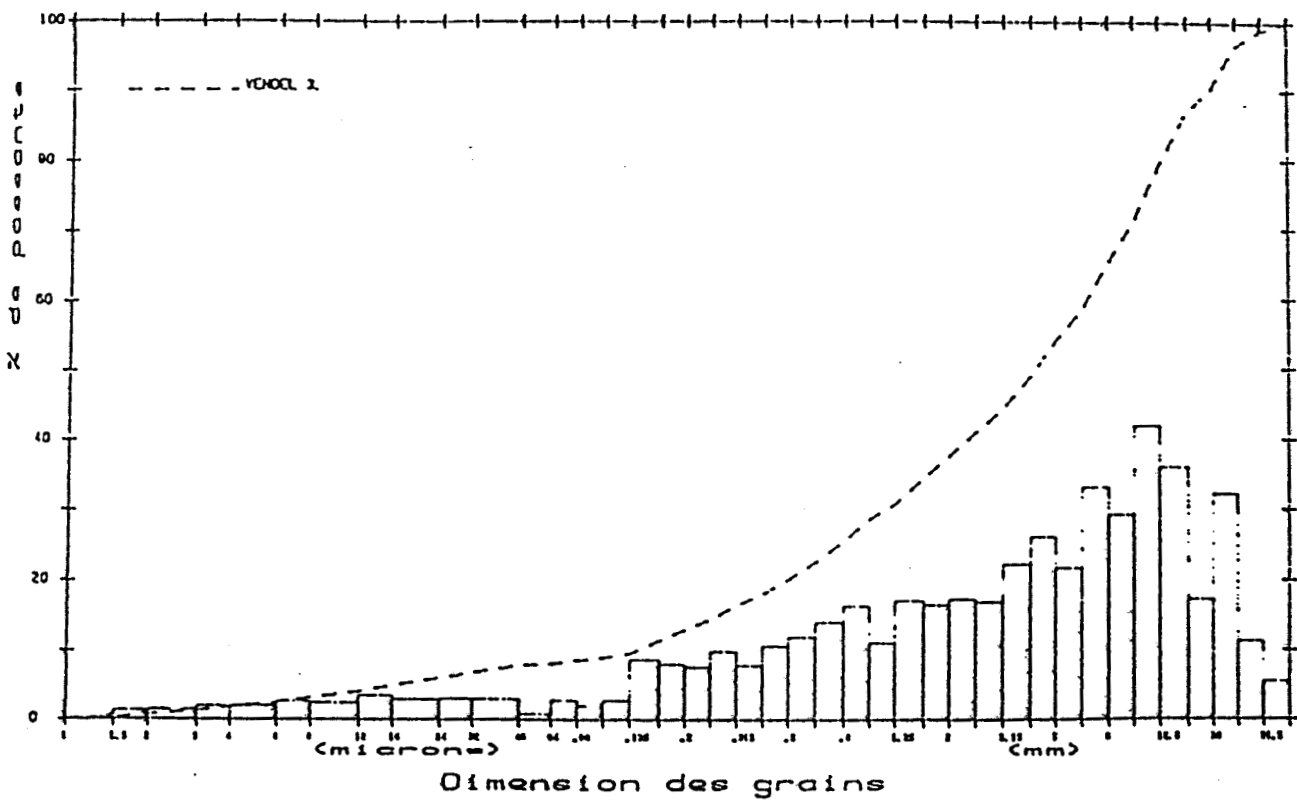
COURBE GRANULOMETRIQUE (< 4mm)



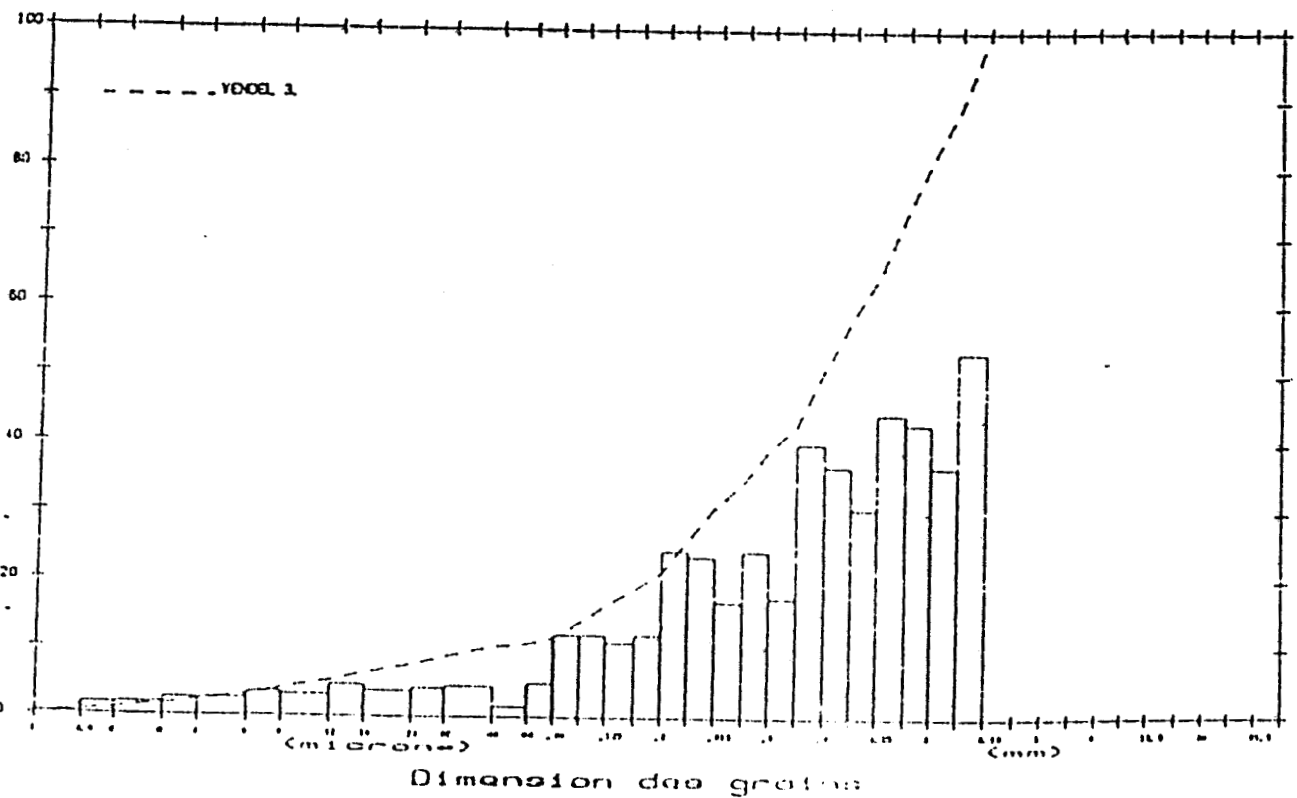
Granulometrie des elements fins



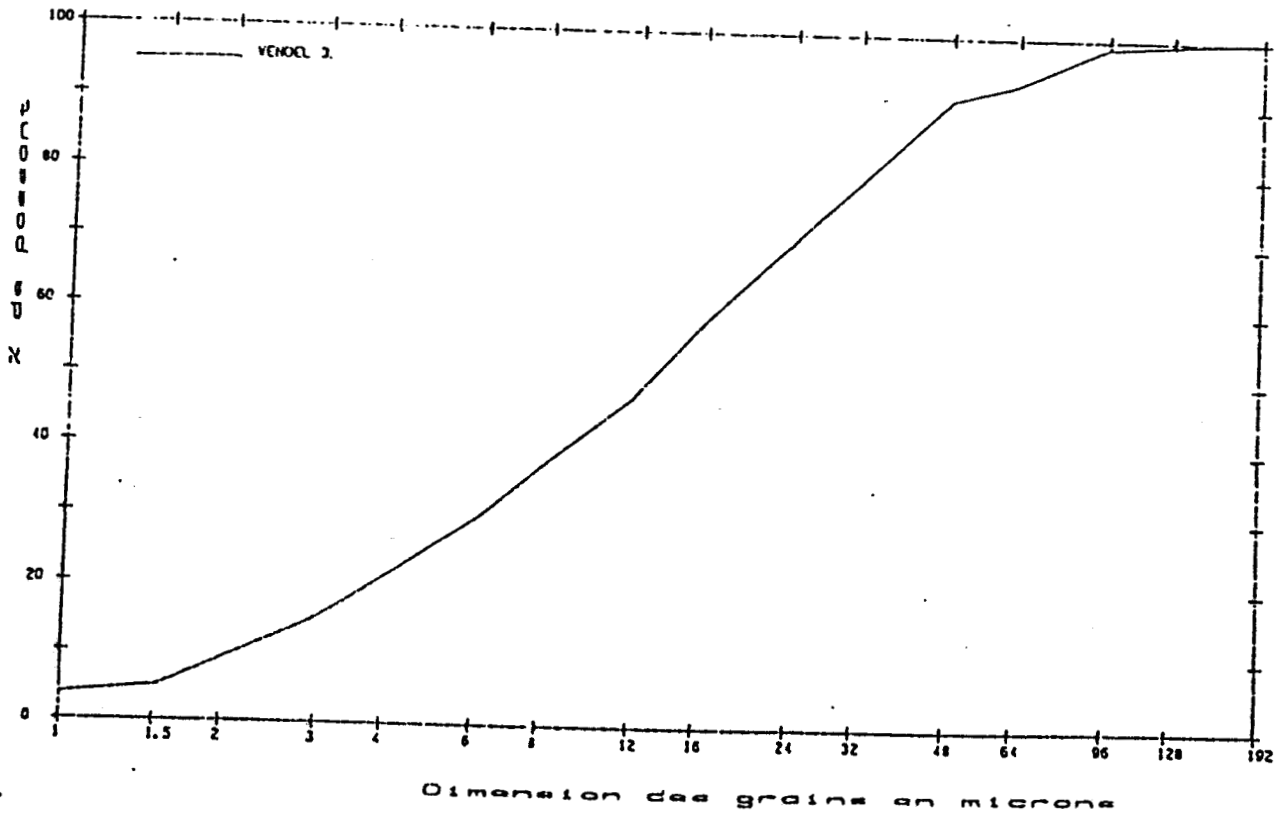
COURBE GRANULOMETRIQUE GLOBALE



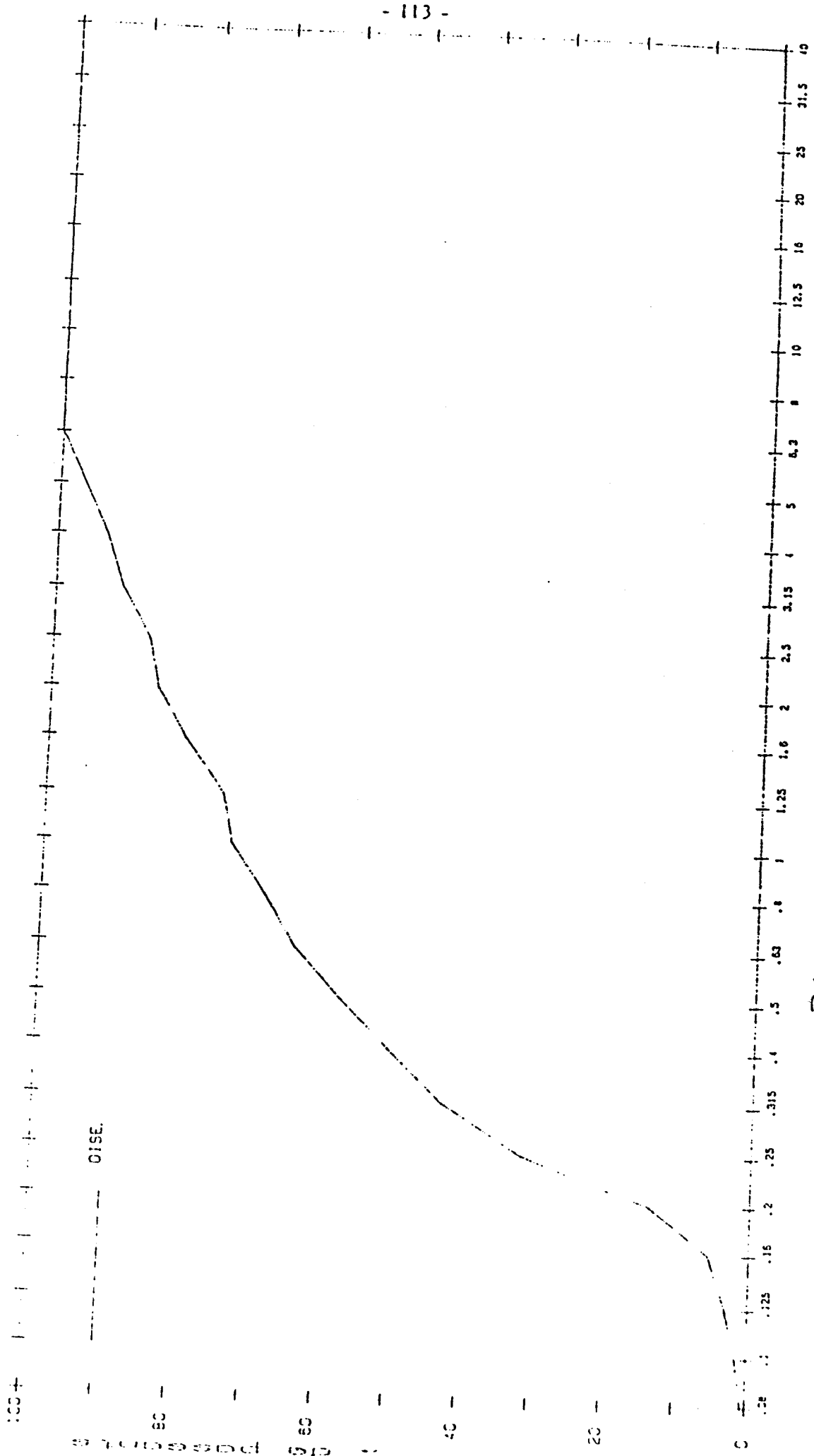
COURBE GRANULOMETRIQUE (< 4mm)



Granulometrie des elements fins



COURBE GRANULOMETRIQUE



Dimension des grains (mm)



ESSAIS OEDOMETRIQUES

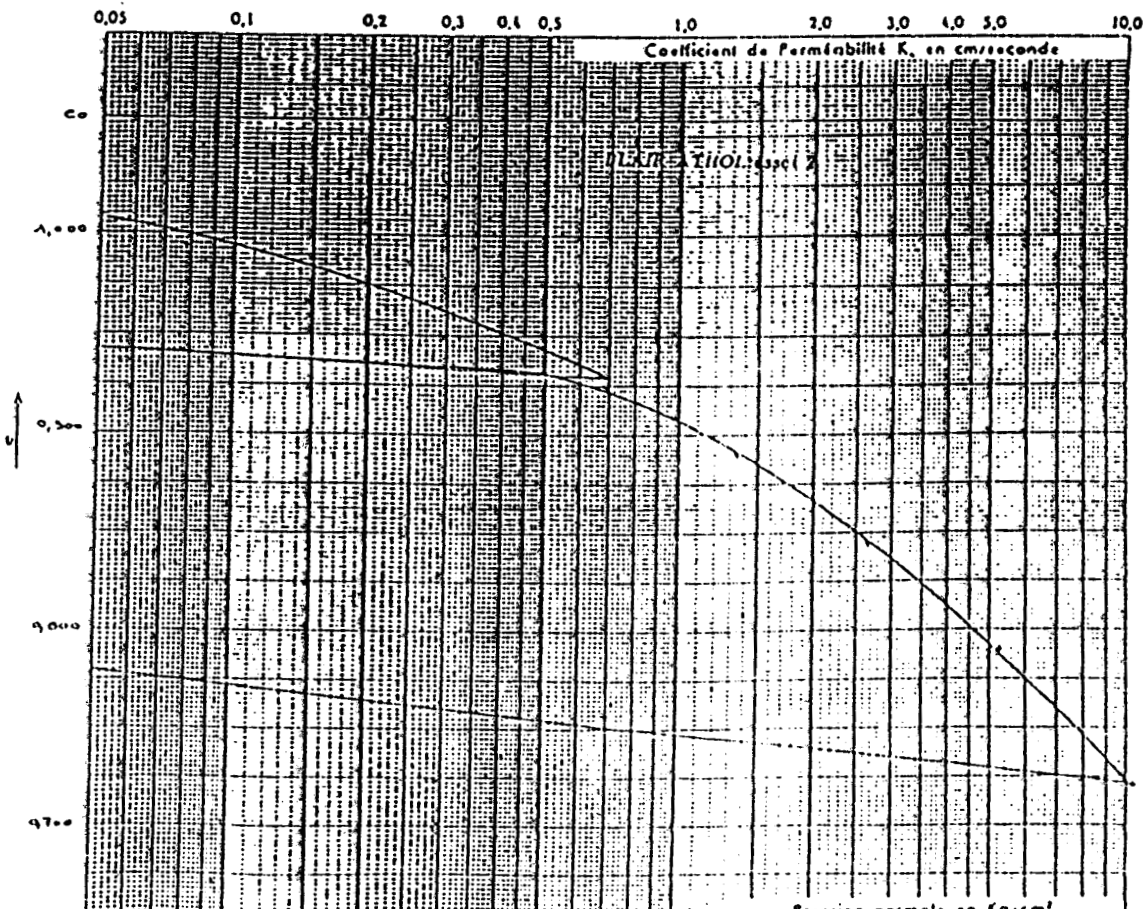
Echantillon (ELAM ATMO)
 Densité des grains $G = 1,52$
 Section $S = 38,5 \text{ cm}^2$
 Hauteur initiale $h_0 = 2,37 \text{ cm}$

Hauteur des pleins $h_p = \frac{WS}{C} = \frac{67,33}{1,52} = 44,3 \text{ cm}$
 Poids spécifique du sol sec $\gamma_d = \frac{WS}{S \cdot h_0} = \frac{67,33}{38,5 \cdot 2,37} = 0,738 \text{ g/cm}^3$

TENEURS EN EAU	INITIALE	FINALE
Poids total humide		126,830
Poids total sec		96,099
Poids de la terre		28,773
Poids de l'eau		30,730
Poids sec WS		67,330
W %		45,6 %
W moyen		

COURBE DE COMPRESSIBILITE

CHARGES en kg	PRESSIONS en kg/cm^2	TASSEMENTS Δh en 1/100 mm	Haut. Eprouvette $h = h_0 - \Delta h$ en mm	Indice des vides $e = \frac{h}{h_p} - 1$ $e_0 = 1,060$	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
PISTON	0,047	60	23,10	1,009	2,53
2	0,310	115	22,55	0,961	4,85
5	0,700	152	22,18	0,929	6,41
10	1,350				
20	2,650				
5	0,700				
PISTON	0,047	135	22,35	0,943	5,70
2	0,310	145	22,25	0,935	6,12
5	0,700	158	22,12	0,923	6,67
10	1,350	195	21,75	0,891	8,23
20	2,650	247	21,23	0,846	10,42
40	5,250	312	20,58	0,790	13,16
80	10,450	391	19,79	0,721	16,50
5	0,700	399	20,21	0,757	14,73
PISTON	0,047	323	20,47	0,760	13,63



Echantillon : BOSTWANA

Densité des grains $G = 2,34$

Section $S = 30,5 \text{ cm}^2$

Hauteur initiale $h_0 = 2,39 \text{ cm}$

$$\text{Hauteur des pleins } h_p = \frac{WS}{G \cdot S} = \frac{78,913}{2,34 \cdot 30,5} = 1,131 \text{ cm}$$

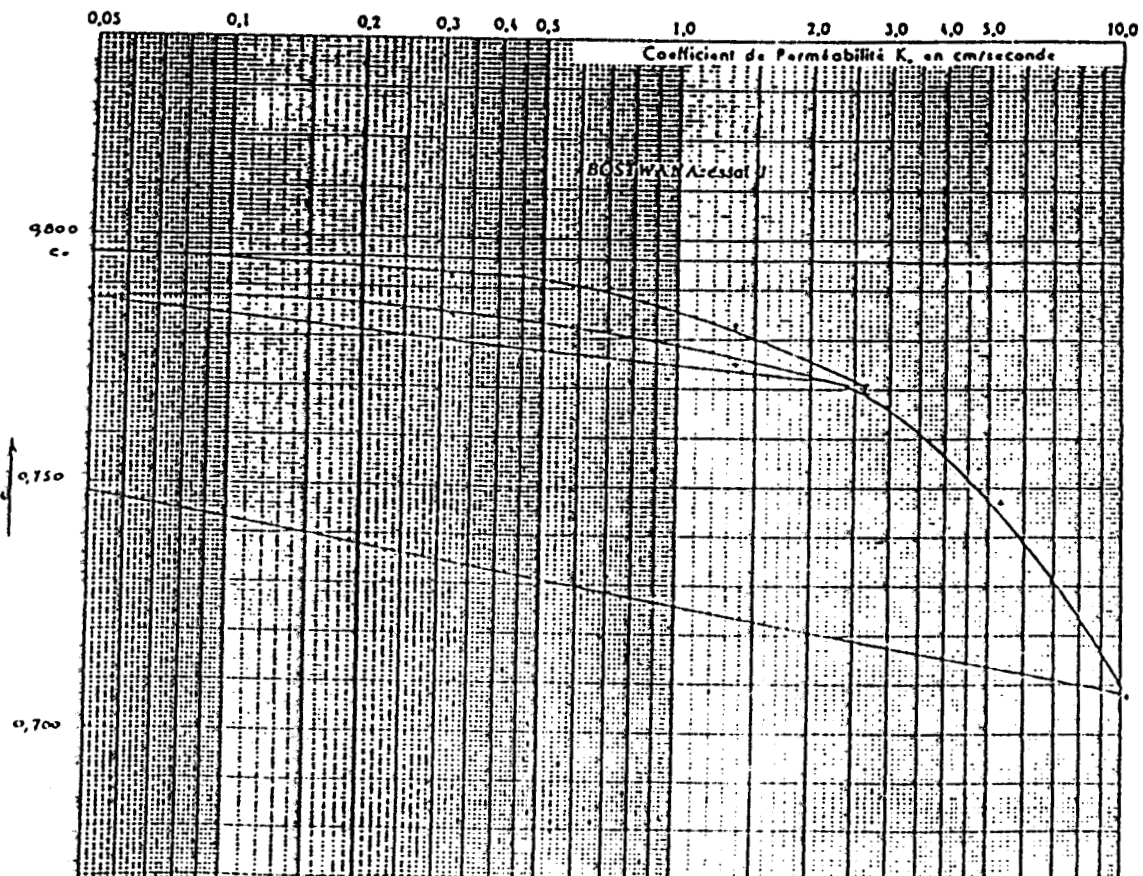
Poids spécifique du sol sec γ_d

$$\gamma_d = \frac{WS}{S \cdot h_0} = \frac{78,913}{30,5 \cdot 2,39} = 0,854 \text{ g/cm}^3$$

TENEURS EN EAU	INITIALE	FINALE
Poids total humide		142,048
Poids total sec		106,582
Poids de la tige		27,669
Poids de l'eau		35,466
Poids sec WS		78,913
W =		44,9 %
W moyen		

COURBE DE COMPRESSIBILITE

CHARGES en kg	PRESSIONS en kg/cm^2	TASSEMENTS δh en 1/100 mm	Haut. Eprouvette $h = h_0 - \delta h$ en mm	Indice des vides $e = \frac{h}{h_p} - 1$ $e_0 = 0,796$	$\frac{\Delta h}{h_0} \%$
PISTON	0,047	- 2	23,92	0,797	- 0,08
2	0,310	3	23,87	0,793	0,12
5	0,700	8	23,82	0,790	0,33
10	1,350	17	23,73	0,783	0,71
20	2,450	33	23,57	0,771	1,38
5	0,700	28	23,62	0,775	1,17
PISTON	0,047	10	23,80	0,788	0,42
2	0,310	14	23,76	0,785	0,58
5	0,700	18	23,72	0,782	0,75
10	1,350	28	23,62	0,775	1,17
20	2,450	35	23,55	0,769	1,46
40	5,250	65	23,25	0,747	2,72
80	10,450	116	22,74	0,708	4,85
5	0,700	84	23,06	0,732	3,51
PISTON	0,047	65	23,25	0,747	2,72



Echantillon : MCKI

Densité des grains G : 1,32

Section S : 10,5 cm²

Hauteur initiale h₀ : 2,39 cm

$$\text{Hauteur des pleins } h_p = \frac{w_s}{G \cdot S} = \frac{87,963}{1,32 \cdot 10,5} = 1,58 \text{ cm}$$

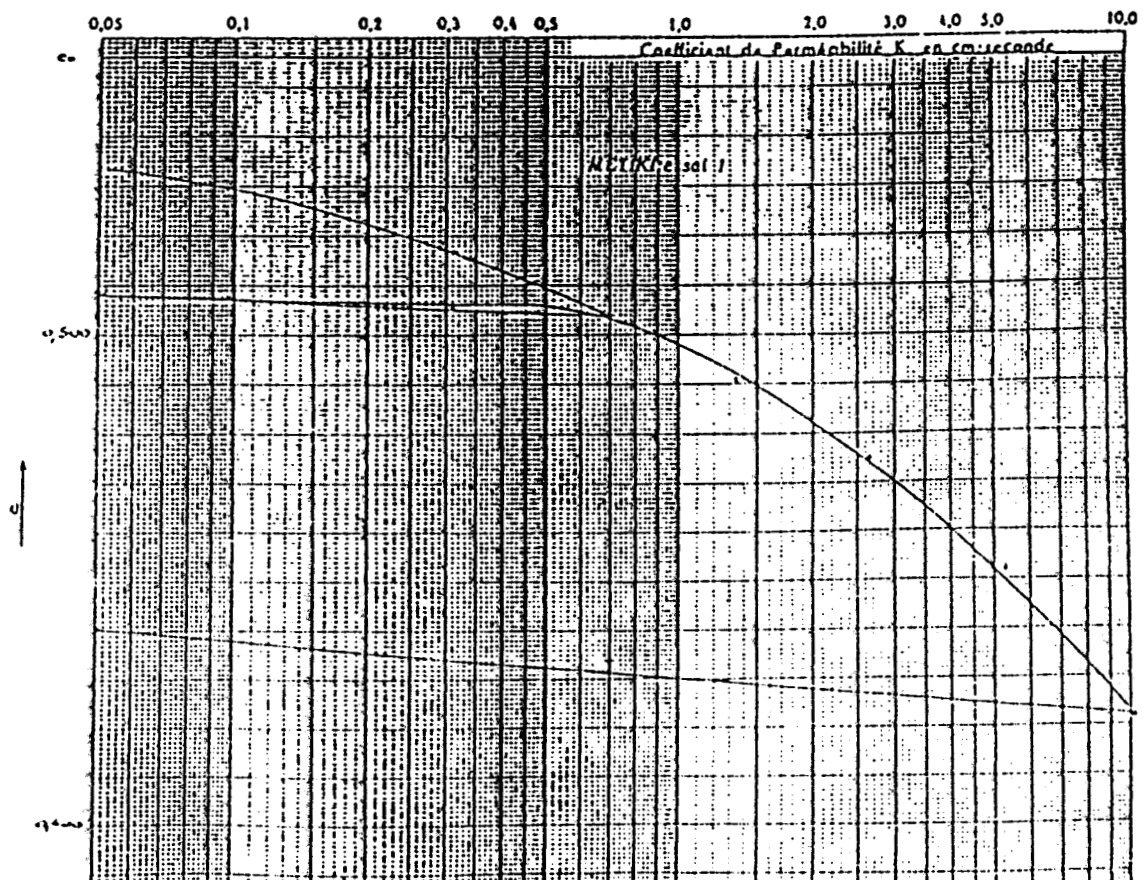
Poids spécifique du sol sec γ_d

$$\gamma_d = \frac{w_s}{S \cdot h_0} = \frac{87,963}{10,5 \cdot 2,39} = 0,977 \text{ g/cm}^3$$

TENEURS EN EAU	INITIALE	FINALE
Poids total humide		139,377
Poids total sec		117,532
Poids de la terre		27,669
Poids de l'eau		21,845
Poids sec W _S		88,863
w %		24,3 %
w moyen		

COURBE DE COMPRESSIBILITE

CHARGES en kg	PRESSIONS en kg/cm ²	TASSEMENTS Δh en 1/100 mm	Haut. Eprouvette h = h ₀ - Δh en mm	Indice des vides $e = \frac{h}{h_p} - 1$ $e_0 = 0,556$	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
PISTON	0,047	33	23,57	0,534	1,36
2	0,310	60	23,30	0,517	2,51
5	0,700	80	23,10	0,504	3,35
10	1,350				
20	2,650				
5	0,700				
PISTON	0,047	74	23,16	0,508	3,10
2	0,310	77	23,13	0,506	3,22
5	0,700	82	23,08	0,504	3,43
10	1,350	99	22,91	0,491	4,14
20	2,650	124	22,66	0,475	5,19
40	5,250	160	22,30	0,452	6,69
80	10,450	206	21,84	0,422	8,62
5	0,700	187	22,03	0,434	7,82
PISTON	0,047	176	22,14	0,441	7,36



Echantillon : Wendel 2

Densité des grains G : 2,52

Section S : 30,5 cm²

Hauteur initiale h₀ : 2,37 cm

$$\text{Hauteur des pleins } h_p = \frac{w_s}{G \cdot S} = \frac{90,593}{2,52 \cdot 30,5} = 1,148 \text{ cm}$$

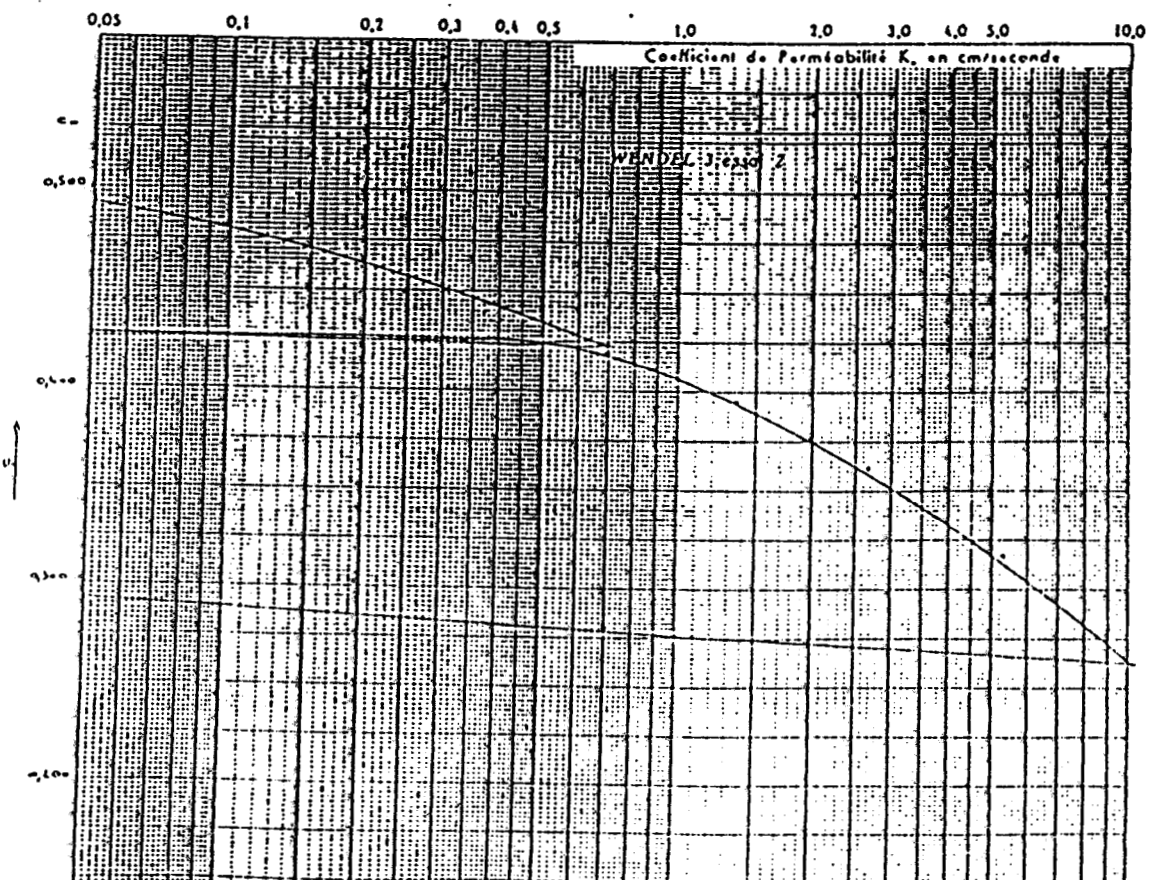
Poids spécifique du sol sec γ_d

$$\gamma_d = \frac{w_s}{S \cdot h_0} = \frac{90,593}{30,5 \cdot 2,37} = 0,999 \text{ g/cm}^3$$

TENEURS EN EAU	INITIALE	FINALE
Poids total humide		133,000
Poids total sec		119,366
Poids de la terre		28,773
Poids de l'eau		13,634
Poids sec w _s		90,593
w %		15,0 %
w moyen		

COURBE DE COMPRESSIBILITE

CHARGES en kg	PRESSIONS en kg/cm ²	TASSEMENTS Δh en 1/100 mm	Haut. Eprouvette h = h ₀ - Δh en mm	Indice des vides $e = \frac{h}{h_p} - 1$ $e_0 = 0,531$	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
PISTON	0,047	61	23,09	0,492	2,57
2	0,310	125	22,45	0,450	5,27
5	0,700	167	22,03	0,423	7,05
10	1,350				
20	2,650				
5	0,700				
PISTON	0,047	154	22,16	0,432	6,50
2	0,310	162	22,08	0,426	6,83
5	0,700	172	21,98	0,420	7,30
10	1,350	209	21,61	0,396	8,82
20	2,650	262	21,08	0,362	11,05
40	5,750	331	20,39	0,317	13,97
80	10,450	417	19,53	0,262	17,60
5	0,700	387	19,83	0,281	16,33
PISTON	0,047	368	20,02	0,293	15,53



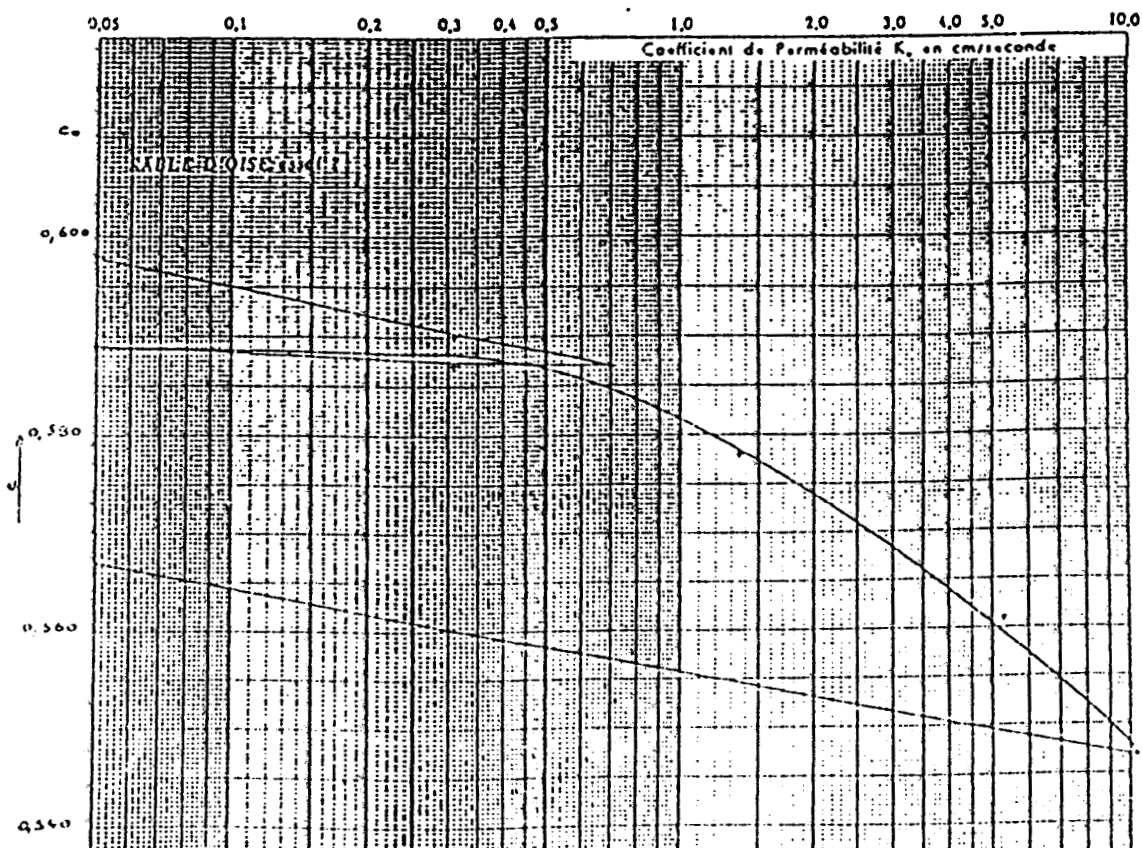
Echantillon : SABLE D'OSZ
 Densité des grains G : 265
 Section S : 38,5 cm²
 Hauteur initiale h₀ : 23,0 cm

Hauteur des pleins h_p : $\frac{WS}{G \cdot S} = \frac{150,109}{265 \cdot 38,5} = 1,471$ cm
 Poids spécifique du sol sec γ_d
 $\gamma_d = \frac{WS}{S \cdot h_0} = \frac{150,109}{38,5 \cdot 23,0} = 1,645$ g/cm³

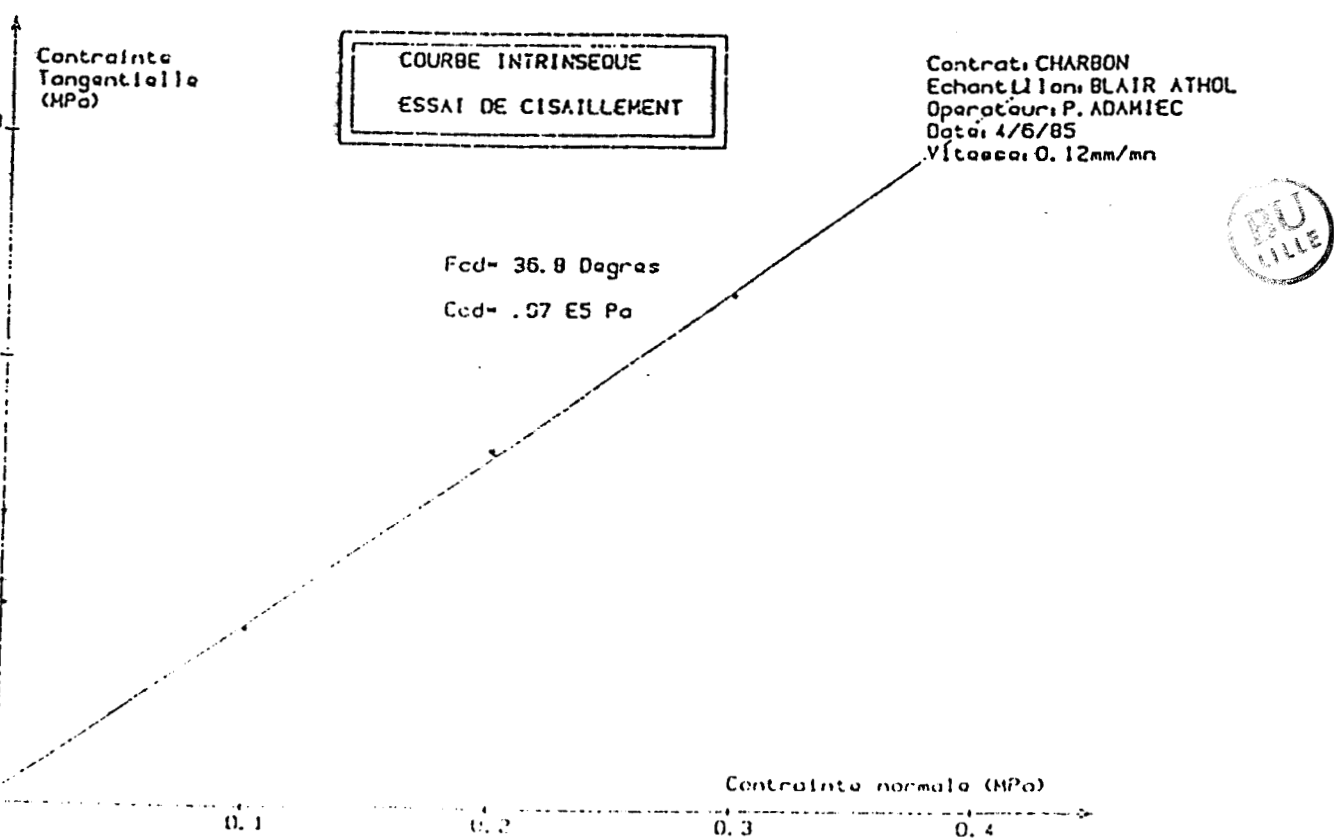
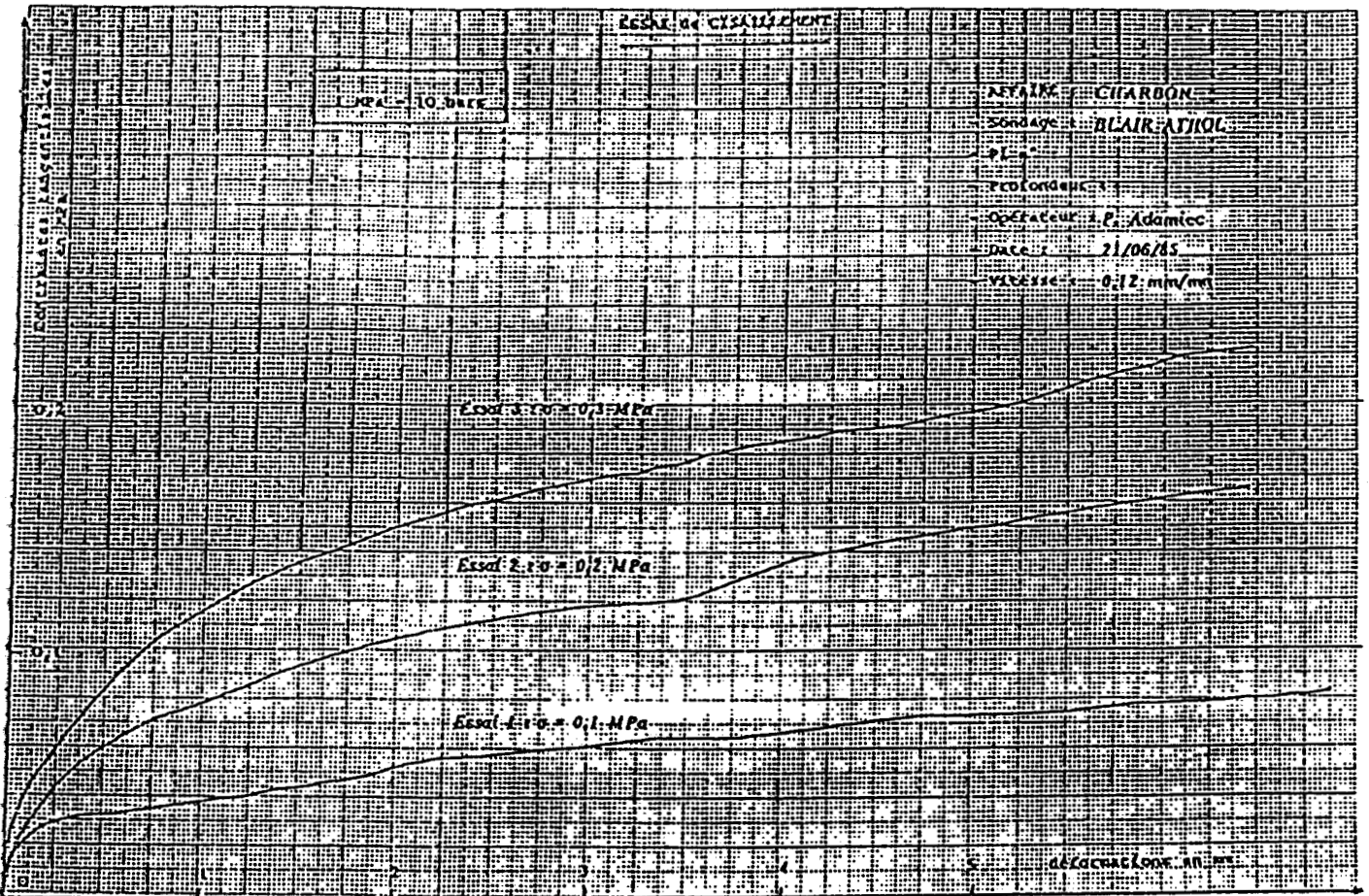
TENEURS EN EAU	INITIALE		FINALE
Poids total humide			211,291
Poids total sec			181,739
Poids de la terre			31,630
Poids de l'eau			29,552
Poids sec WS			150,109
W %			19,7 %
W moyen			

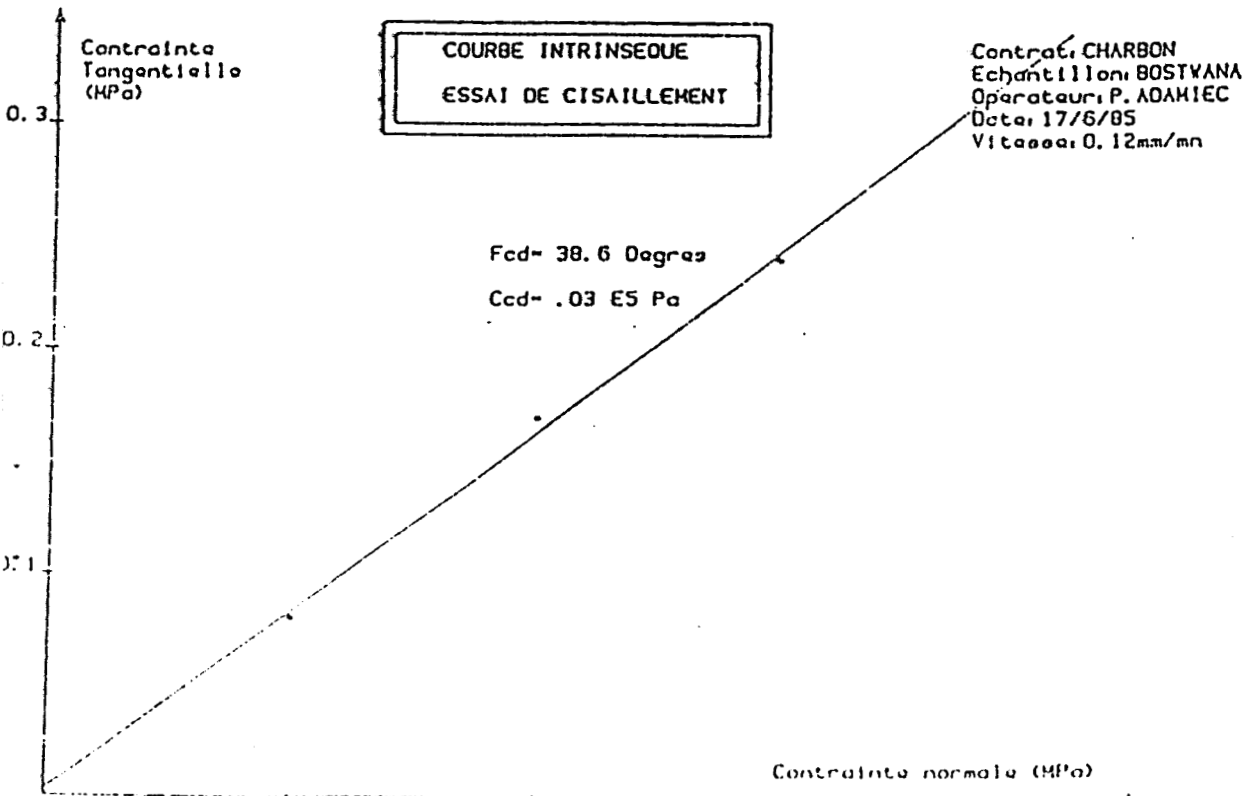
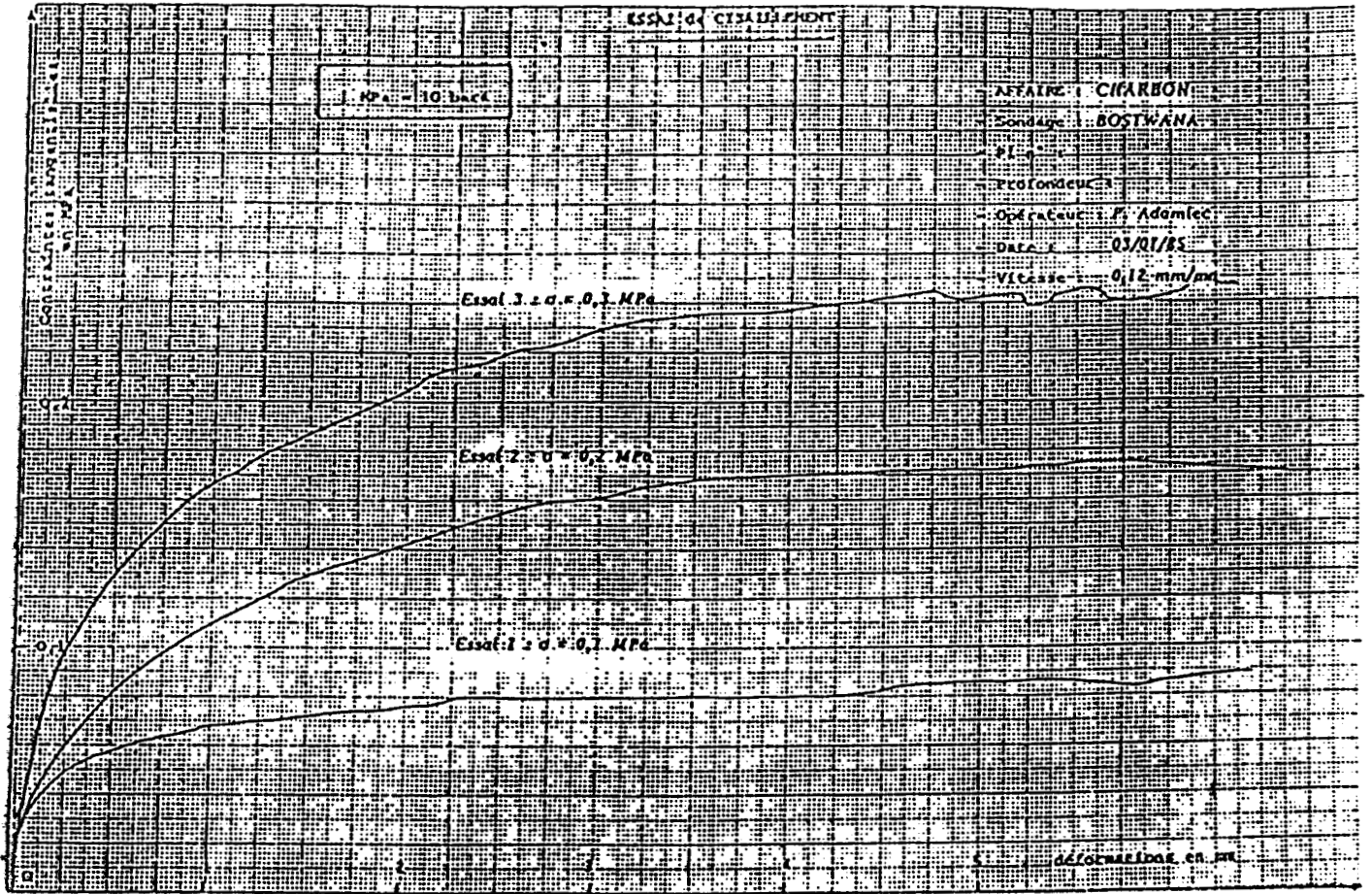
COURBE DE COMPRESSIBILITE

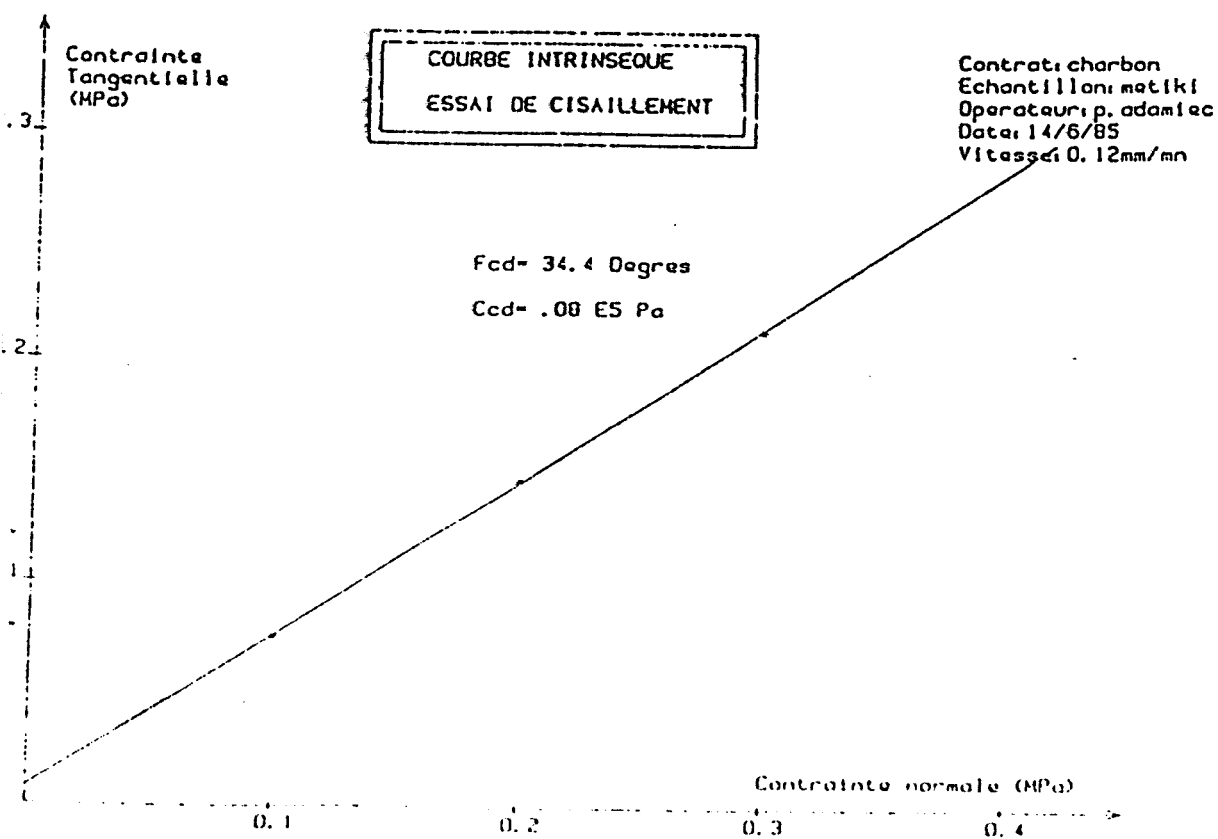
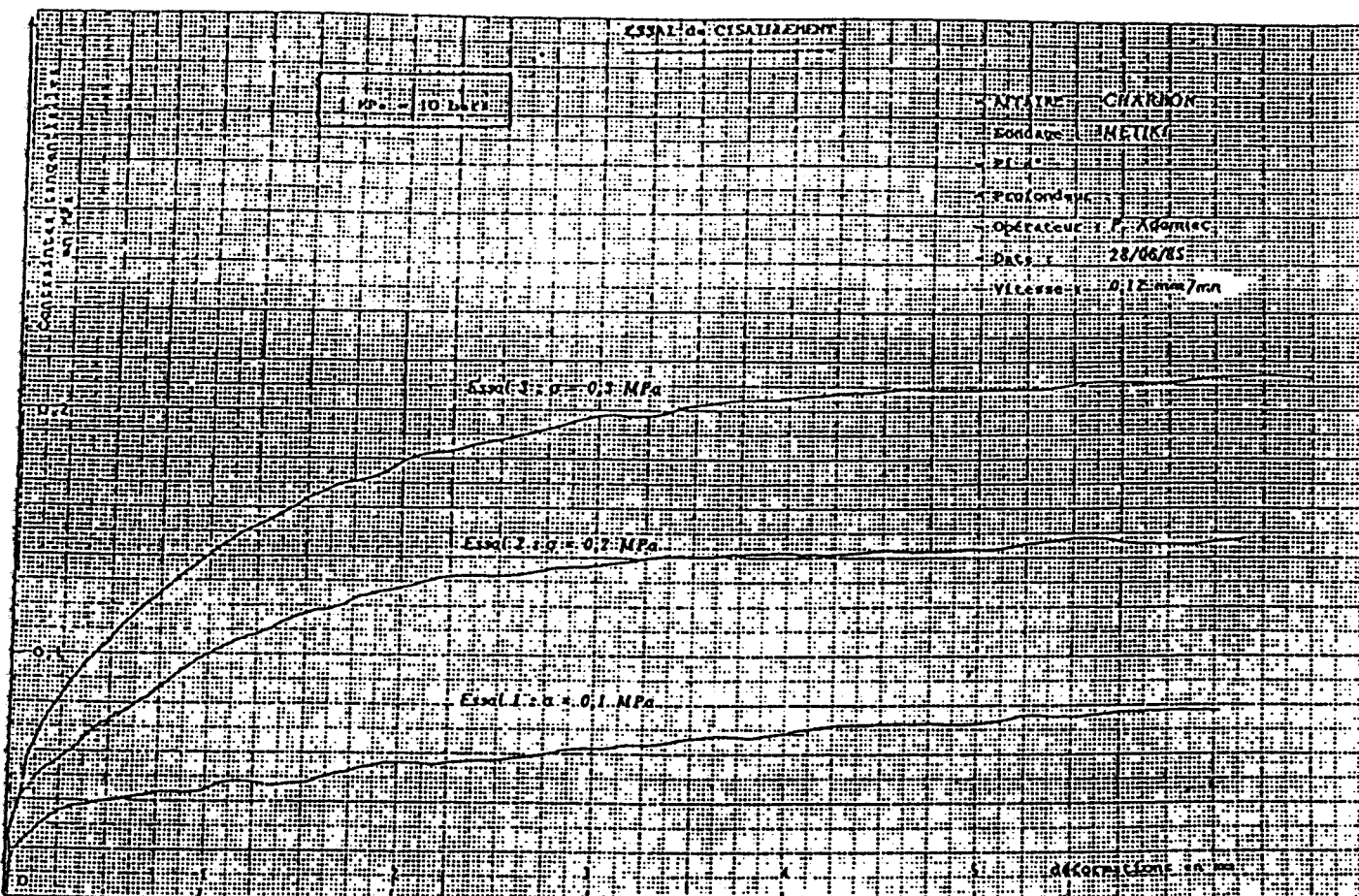
CHARGES en kg	PRESSIONS en kg/cm ²	TASSEMENTS Δh en 1/100 mm	Haut. Eprouvette h = h ₀ - Δh en mm	Indice des vides $e = \frac{h}{h_p} - 1$ $e_0 = 0,611$	$\frac{\Delta h}{h_0}$ %
PISTON	0,047	19	23,51	0,598	0,80
2	0,110	31	23,39	0,590	1,30
5	0,700	36	23,34	0,587	1,52
10	1,350				
20	2,650				
5	0,700				
PISTON	0,047	32	23,38	0,589	1,35
2	0,110	35	23,35	0,587	1,48
5	0,700	39	23,31	0,585	1,64
10	1,350	49	23,21	0,578	2,07
20	2,650	60	23,10	0,570	2,53
40	5,250	73	22,97	0,561	3,08
80	10,450	94	22,76	0,547	3,97
5	0,700	74	22,96	0,560	3,12
PISTON	0,047	64	23,04	0,566	2,78

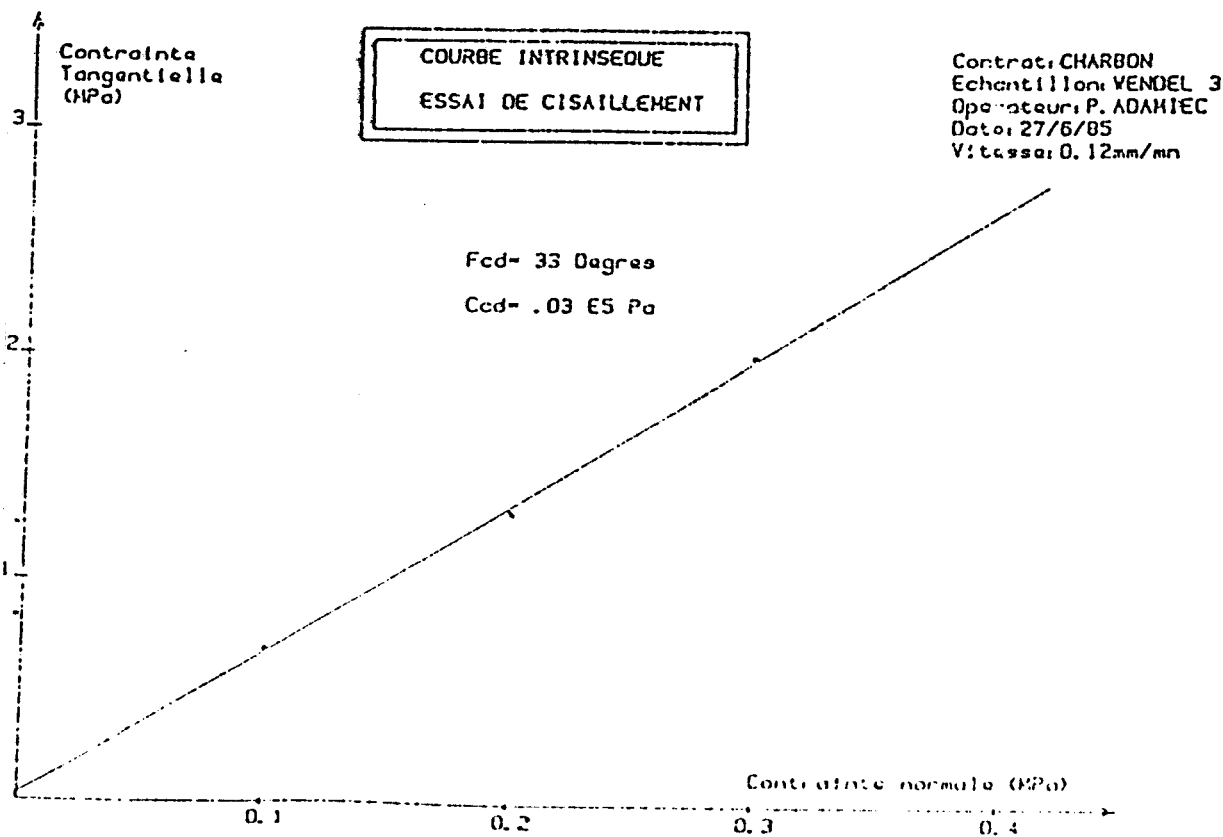
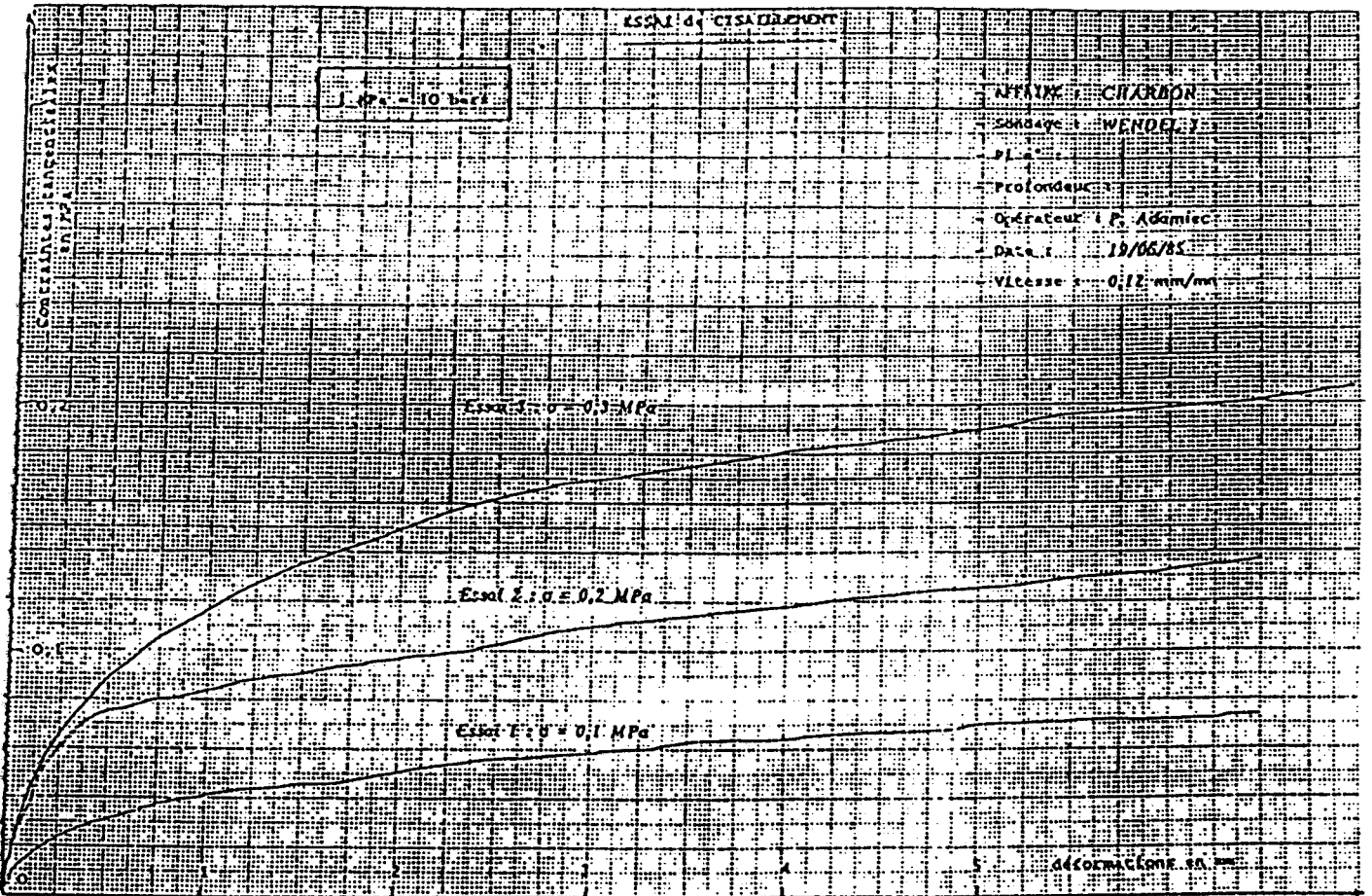


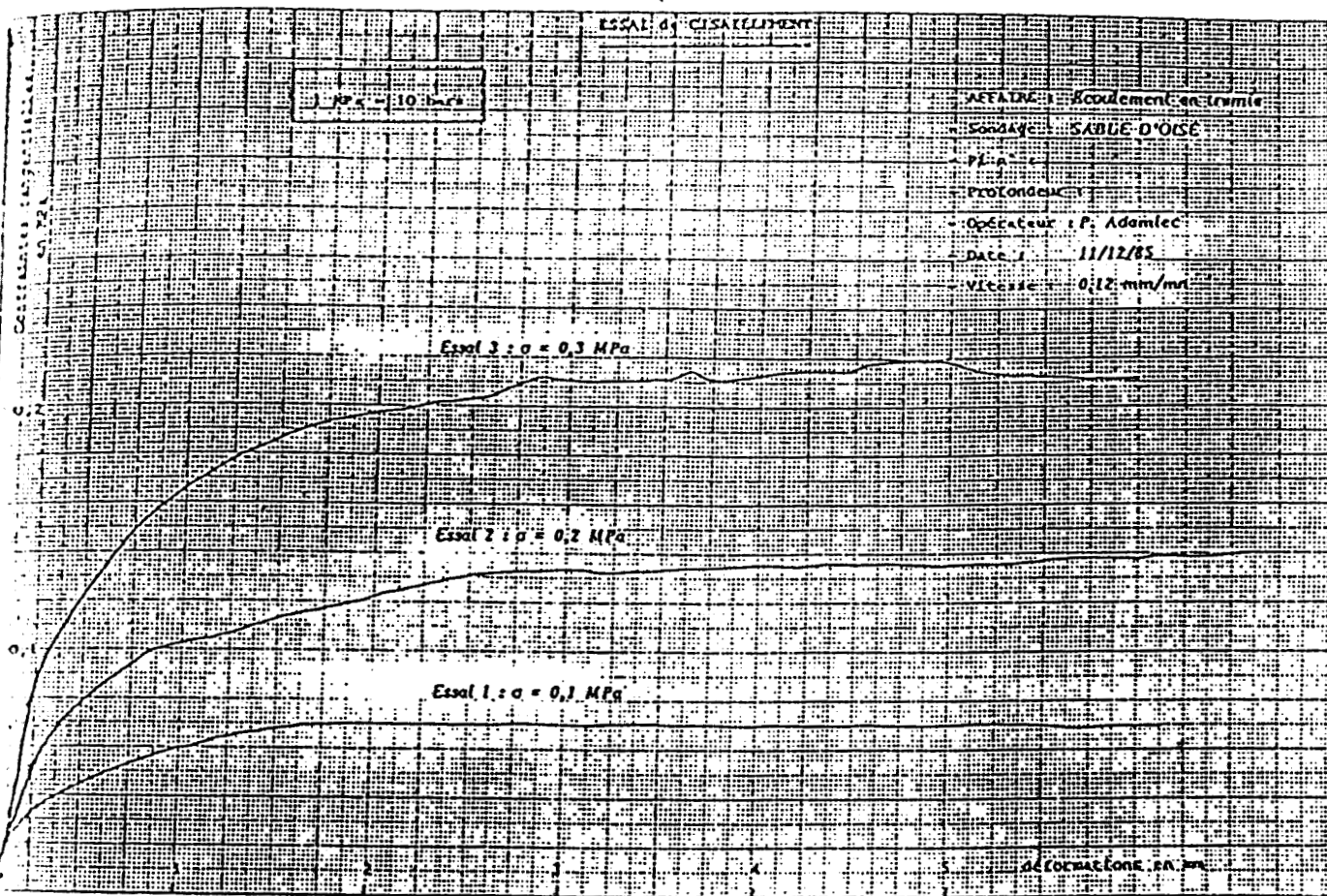
ESSAIS DE CISAILLEMENT
A LA BOITE











Contrainte tangentielle (MPa)

COURBE INTRINSEQUE
ESSAI DE CISAILLEMENT

Contraint SABLE D'OISE
 Echantillon SATURE
 Opérateur: P. Adamiec
 Date: 21-10-85
 Vitesse: 0,12mm/mn



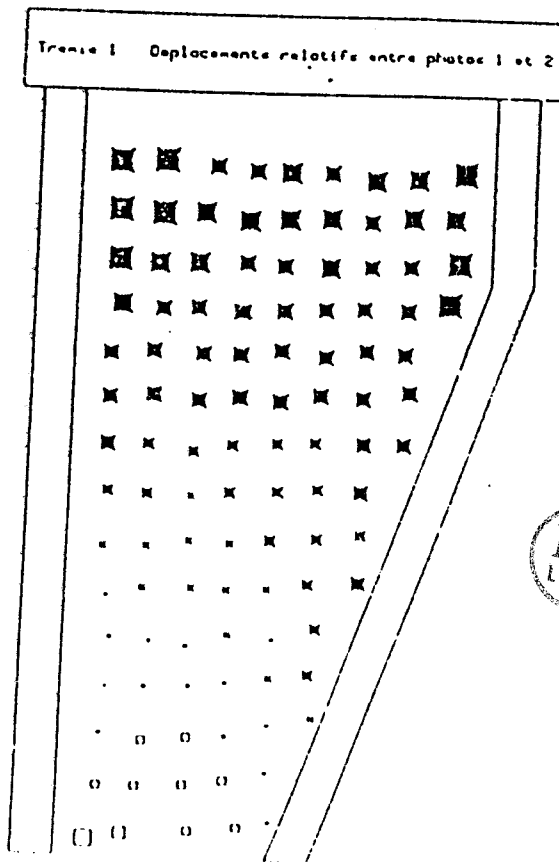
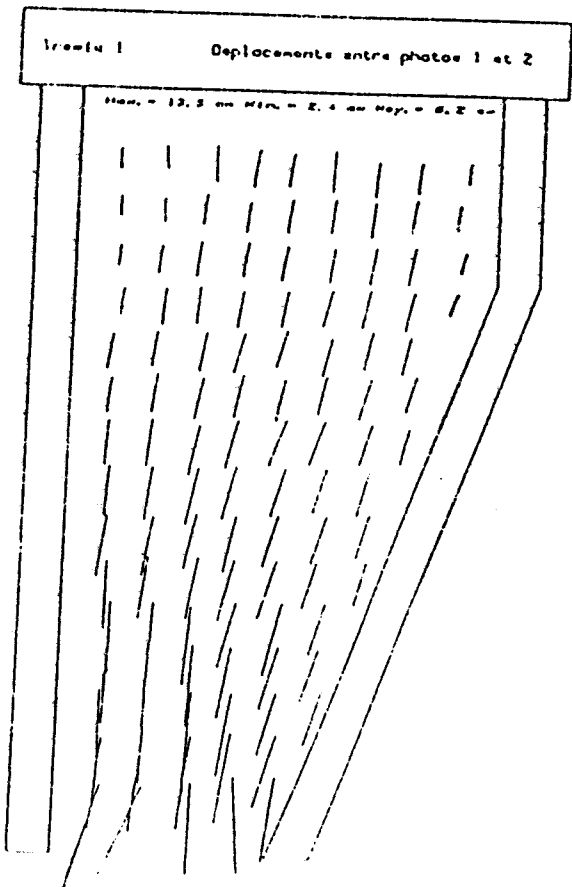
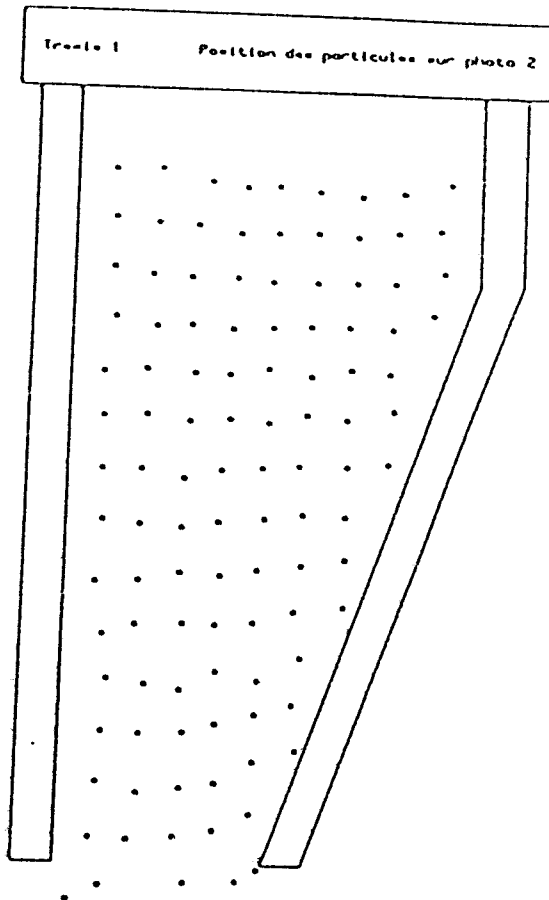
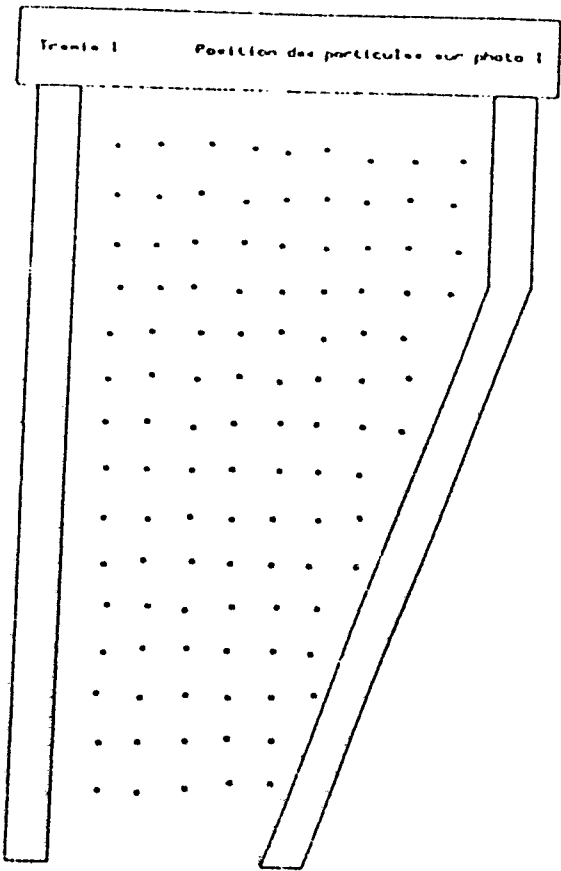
FCO- 35,1 Degrés
 CCD--0,01 ES Pa

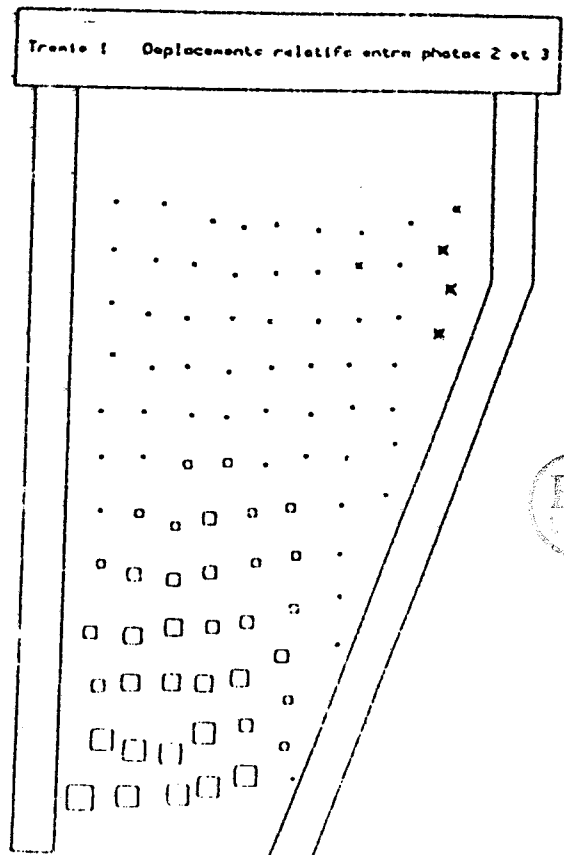
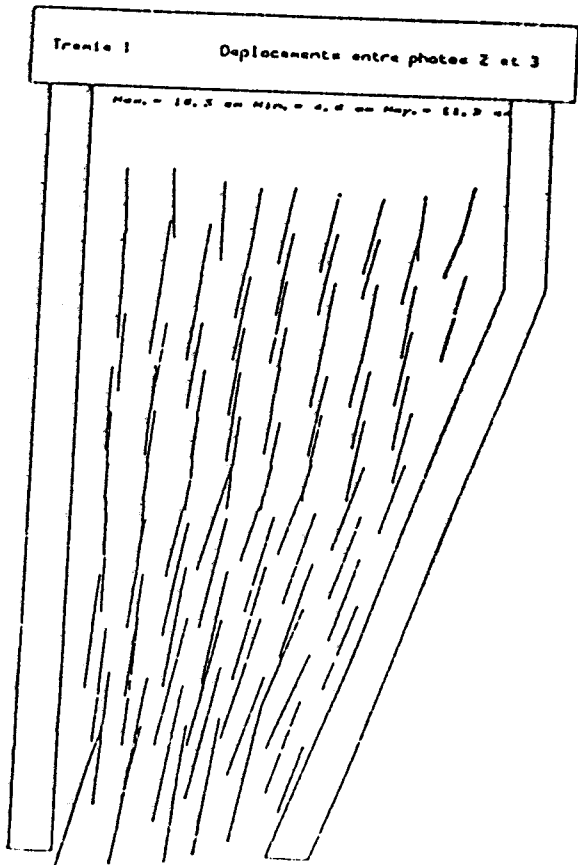
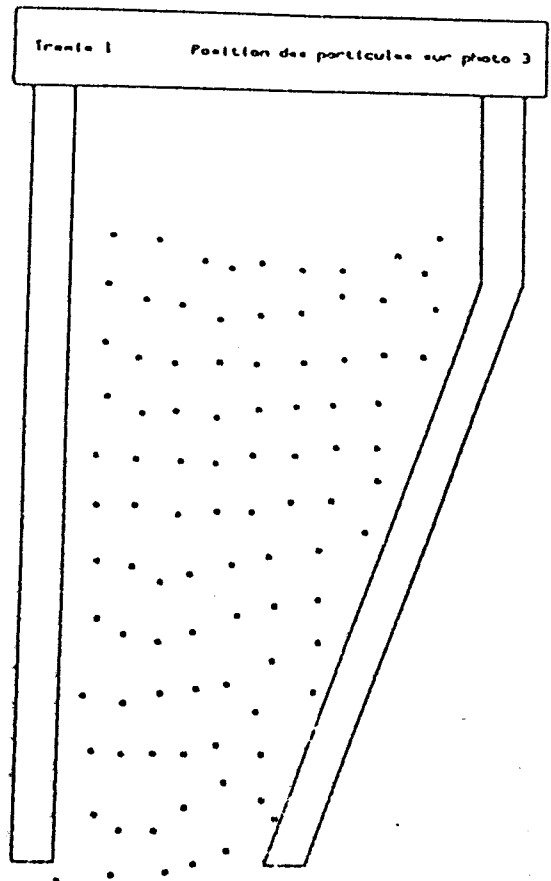
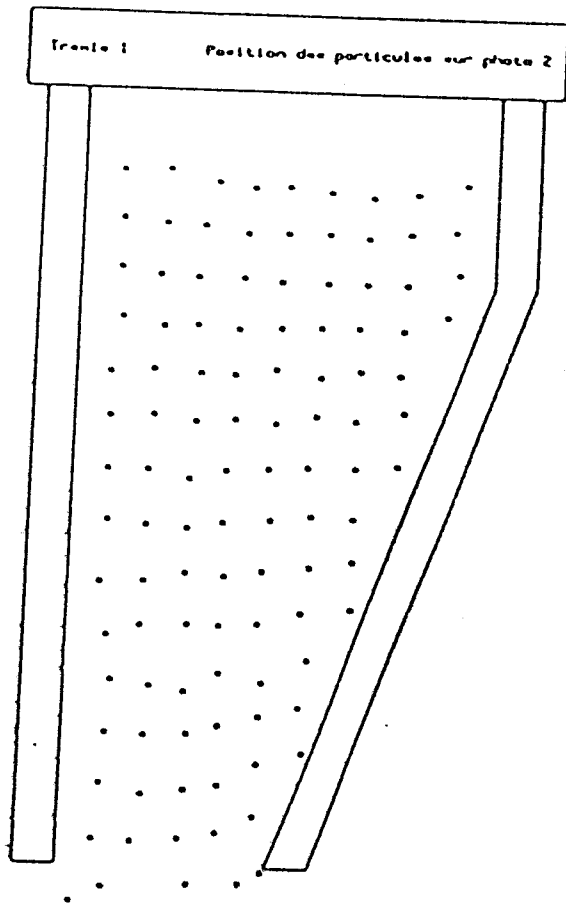
Contrainte normale (MPa)

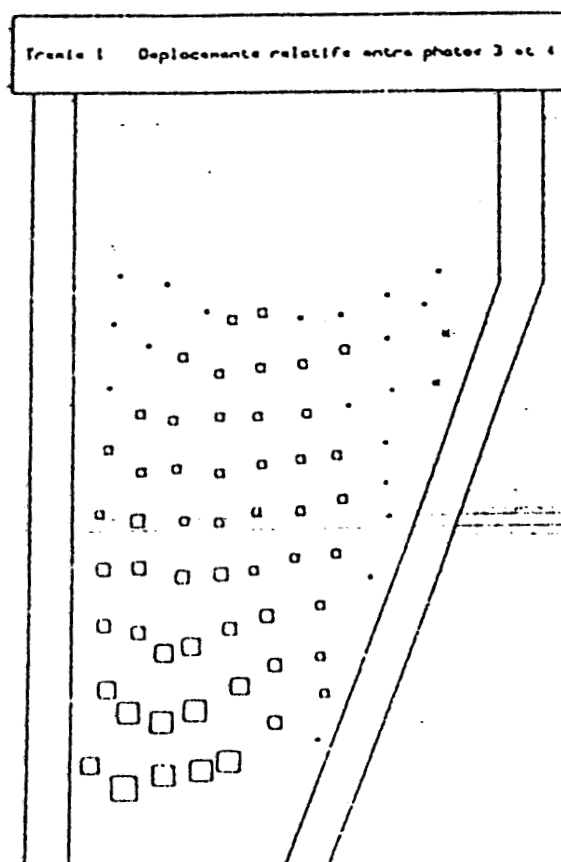
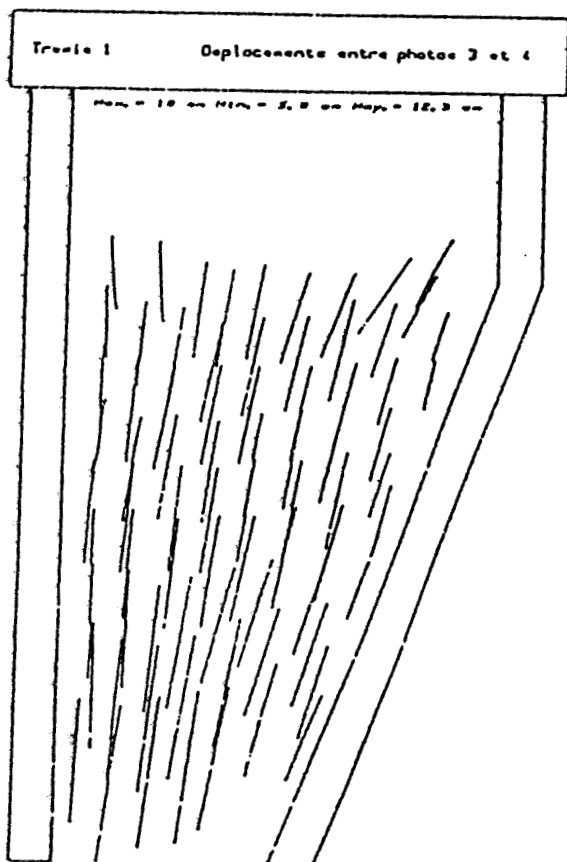
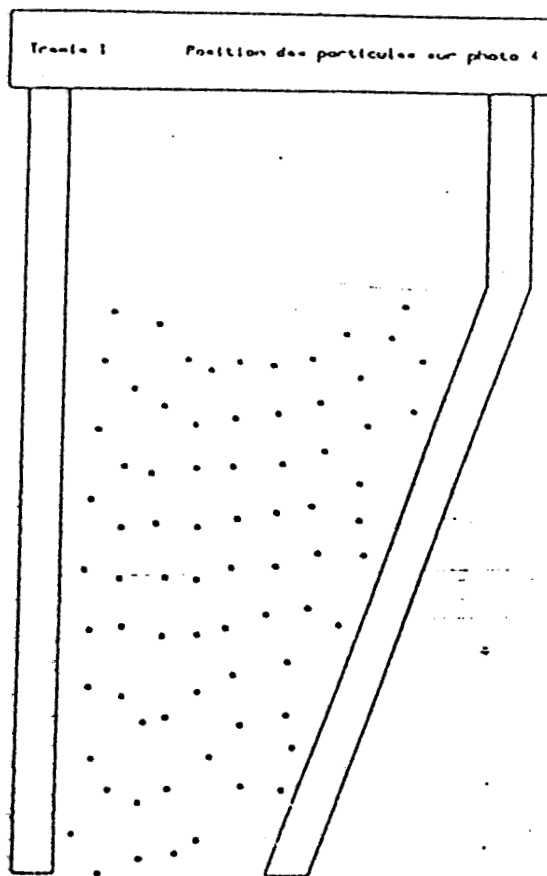
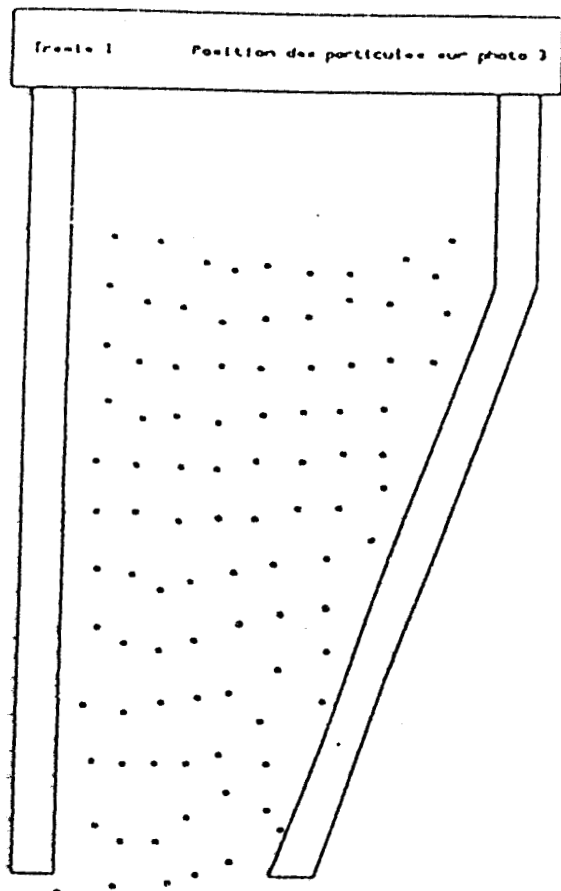
0.1 0.2 0.3 0.4

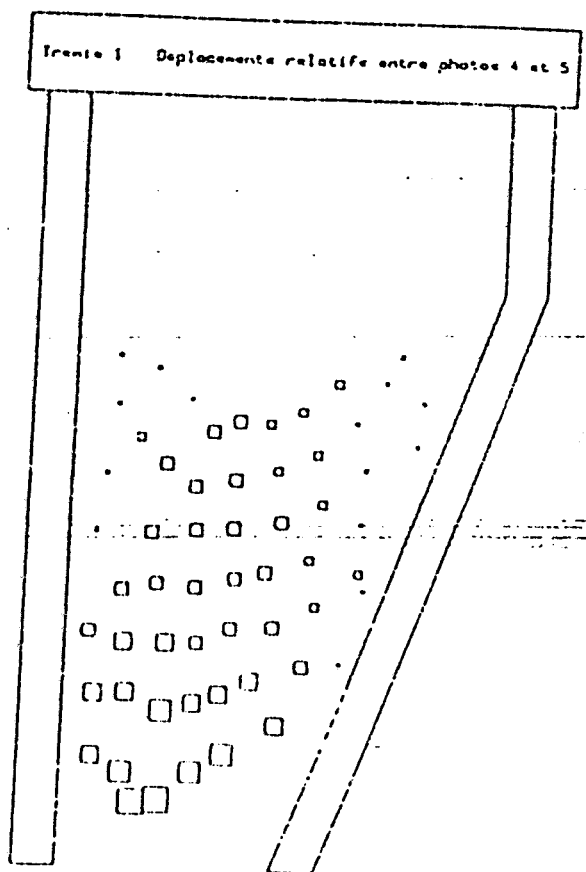
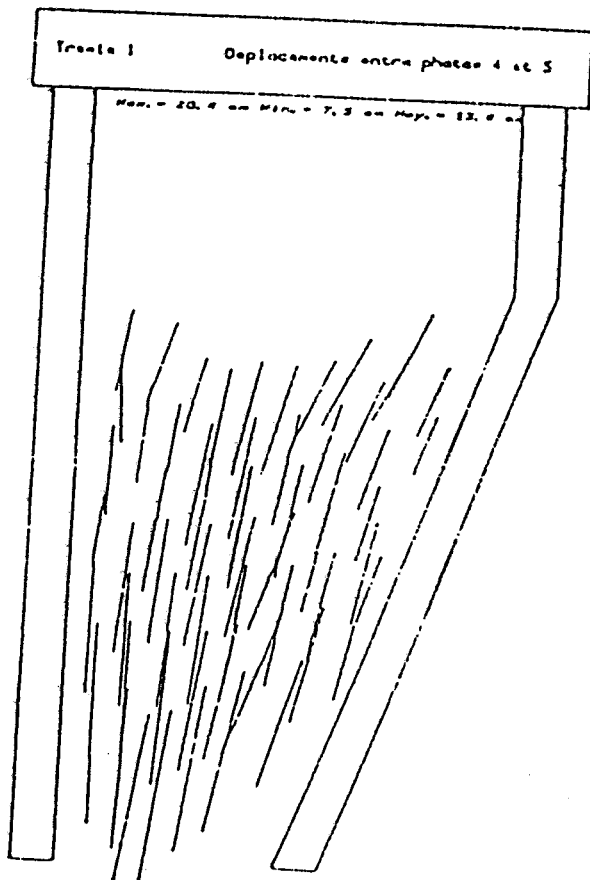
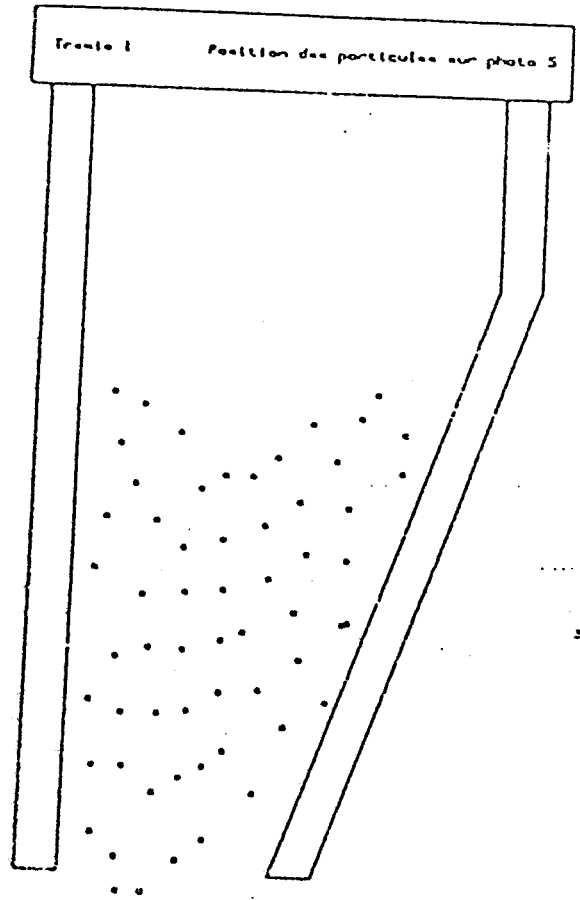
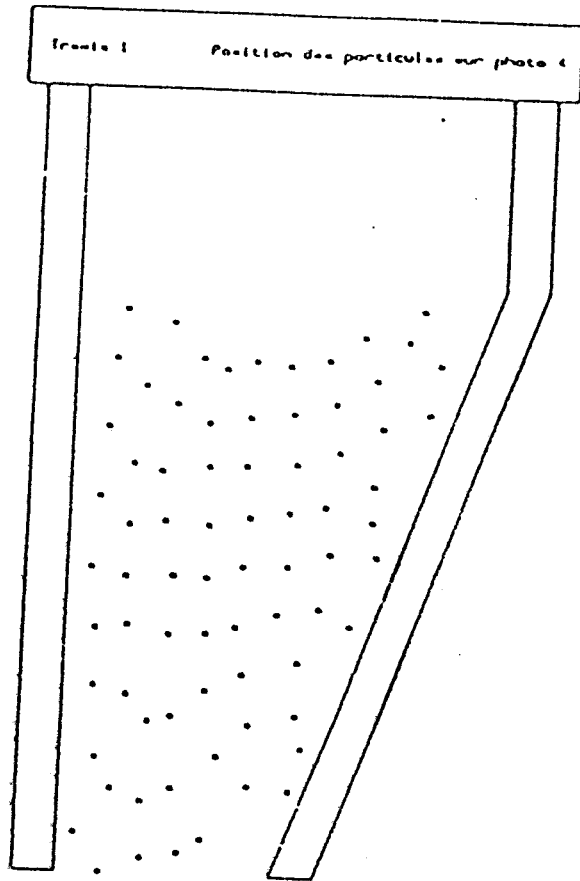
ANNEXES III

TREMIE N° 1 (70°)



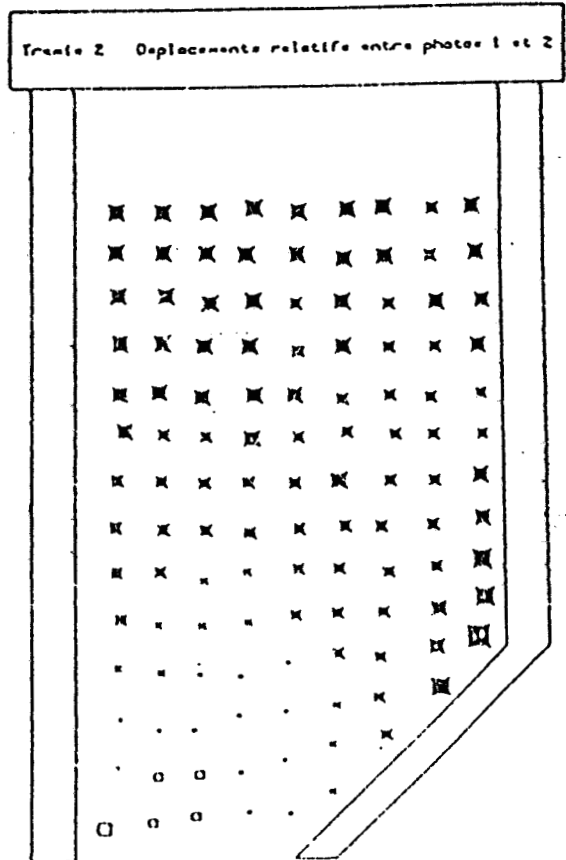
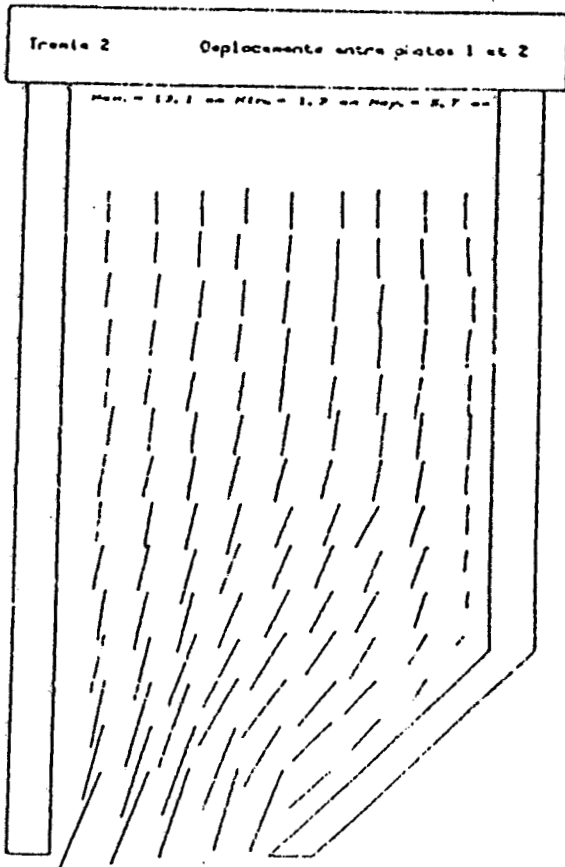
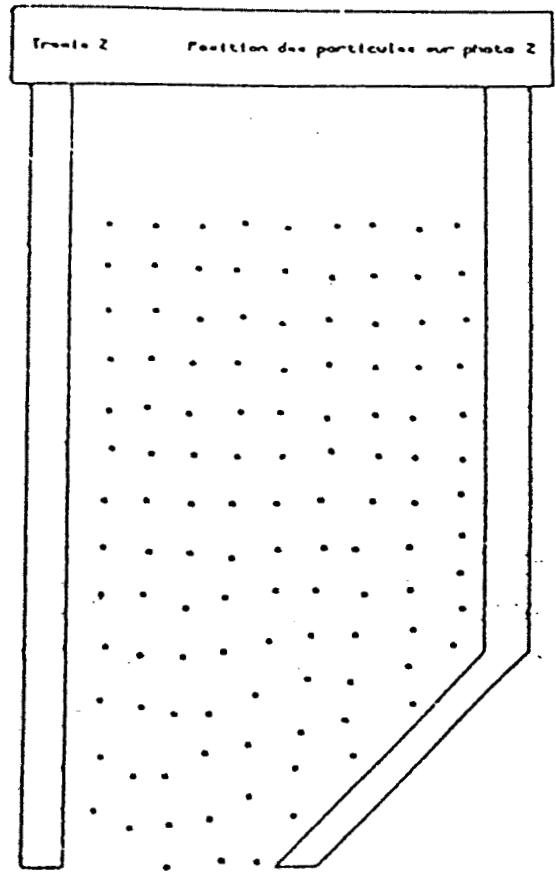
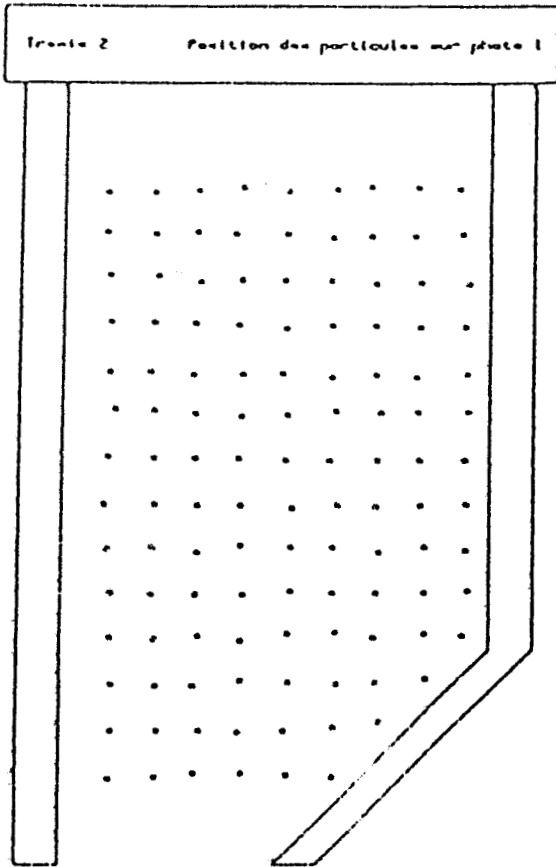


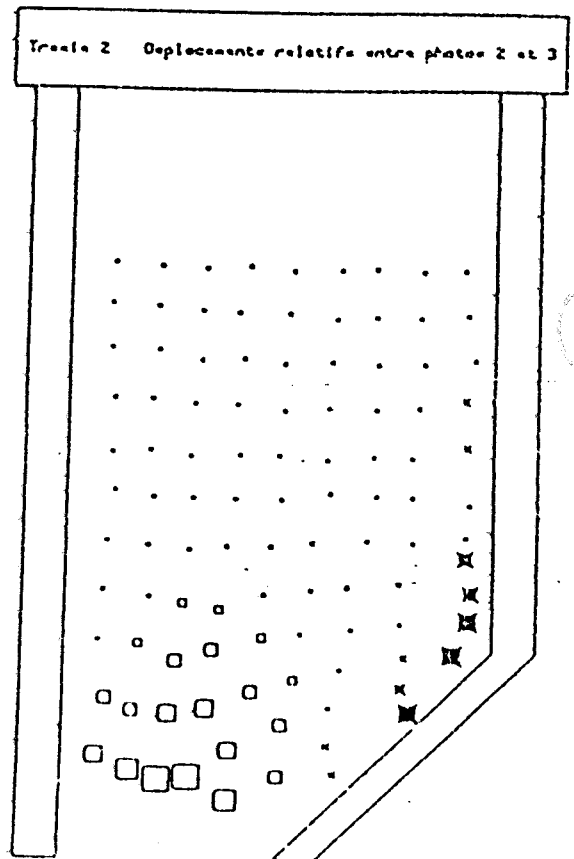
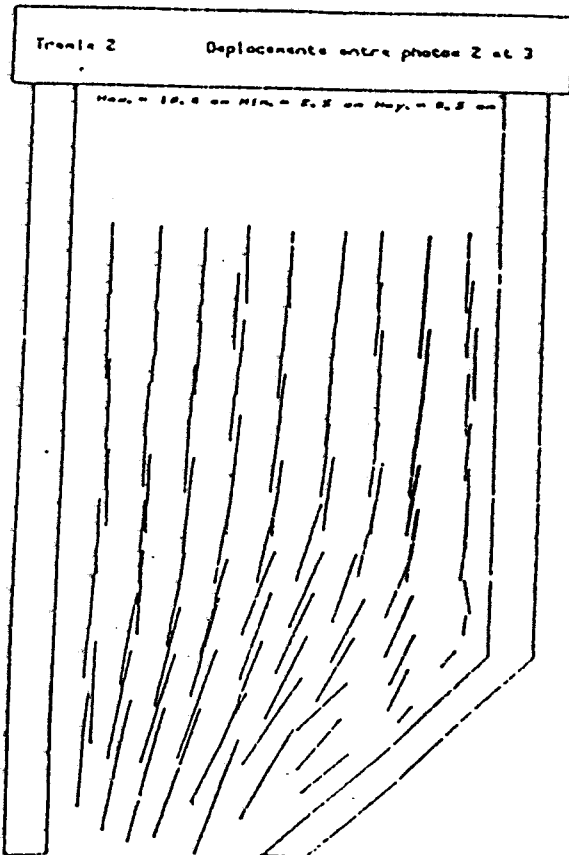
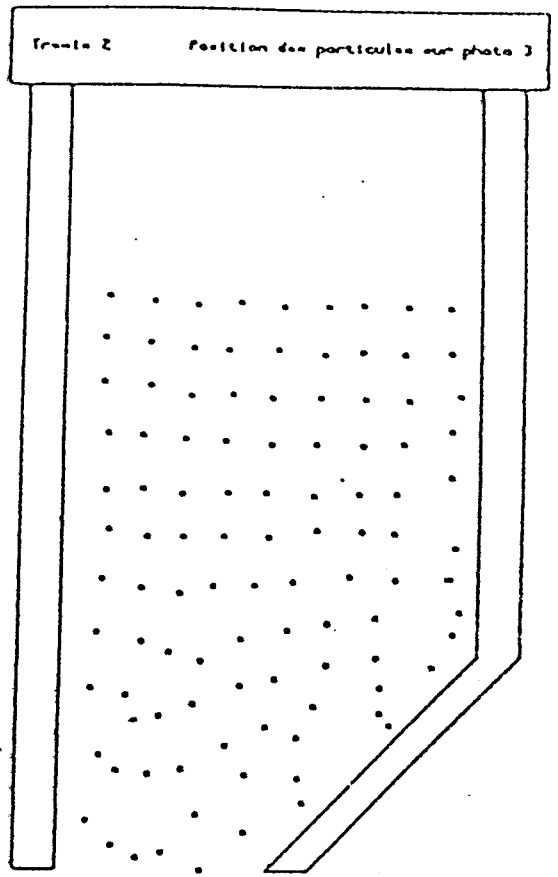
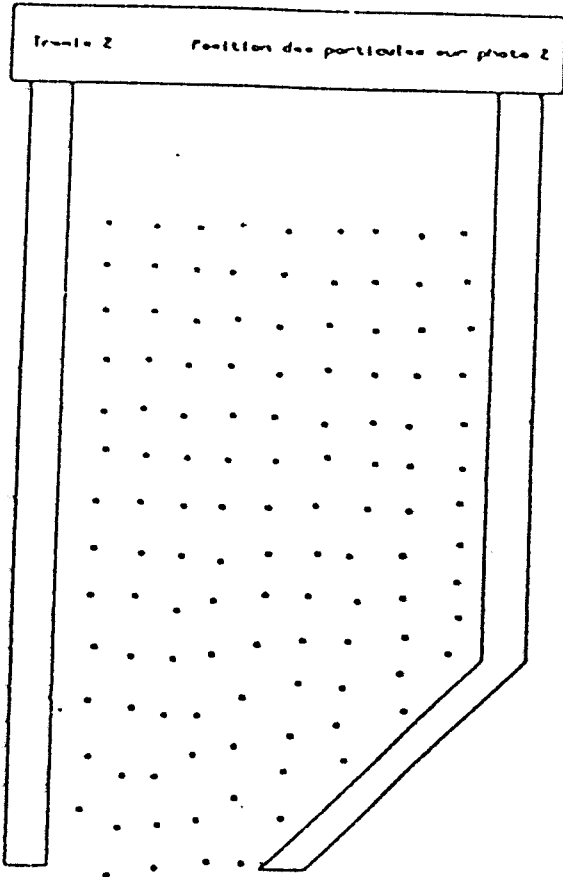


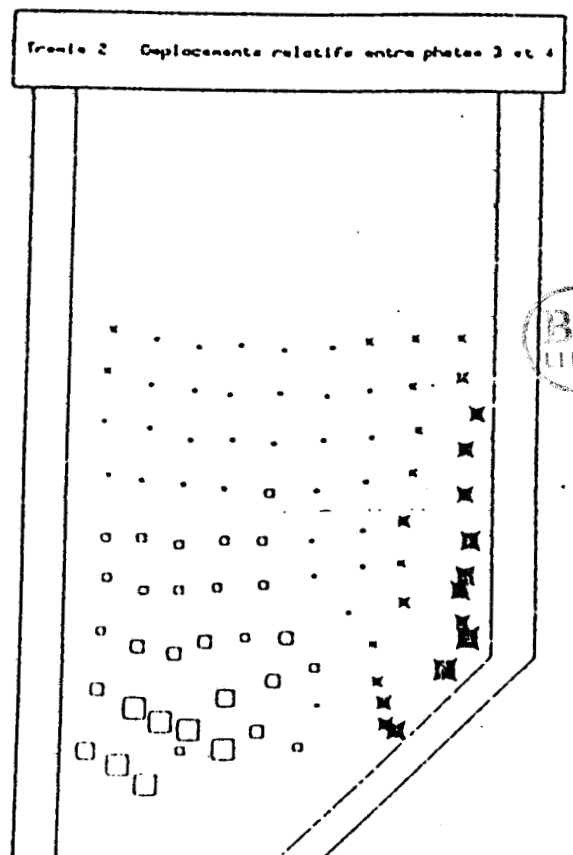
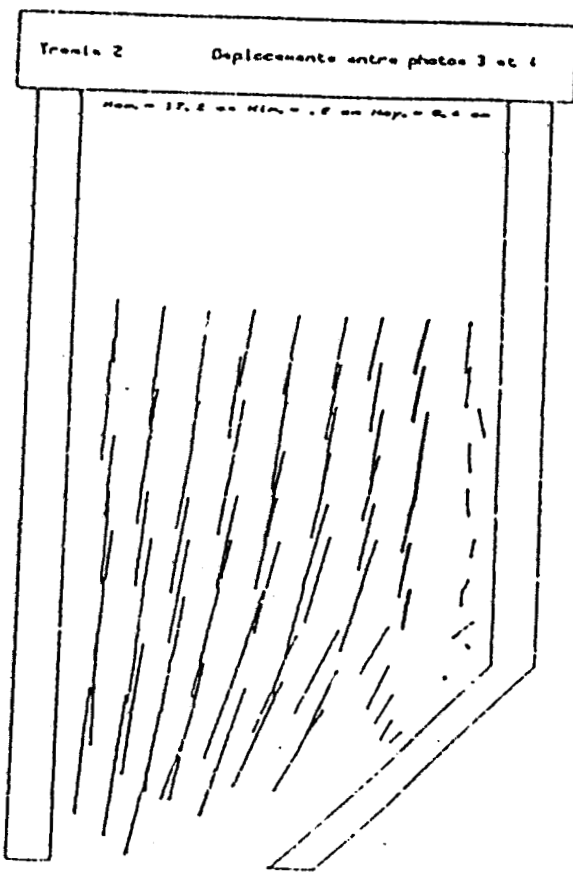
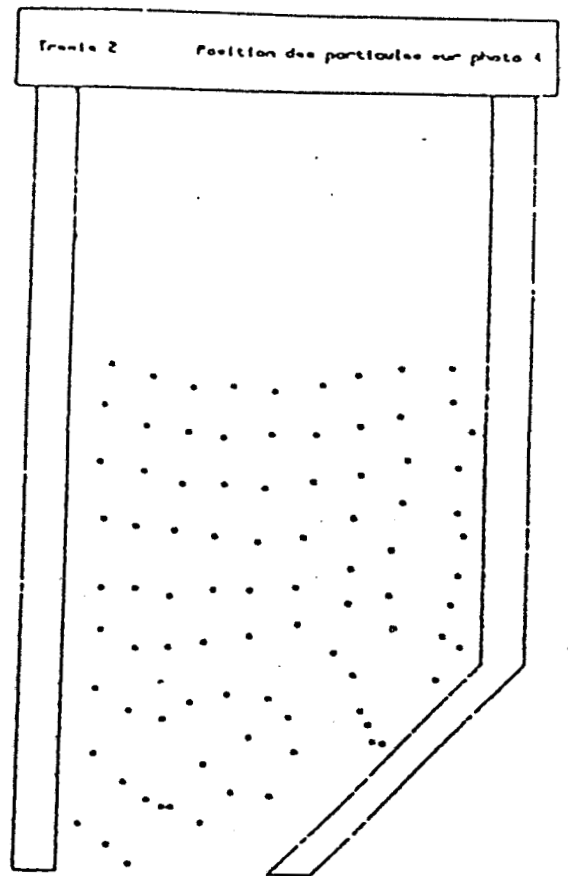
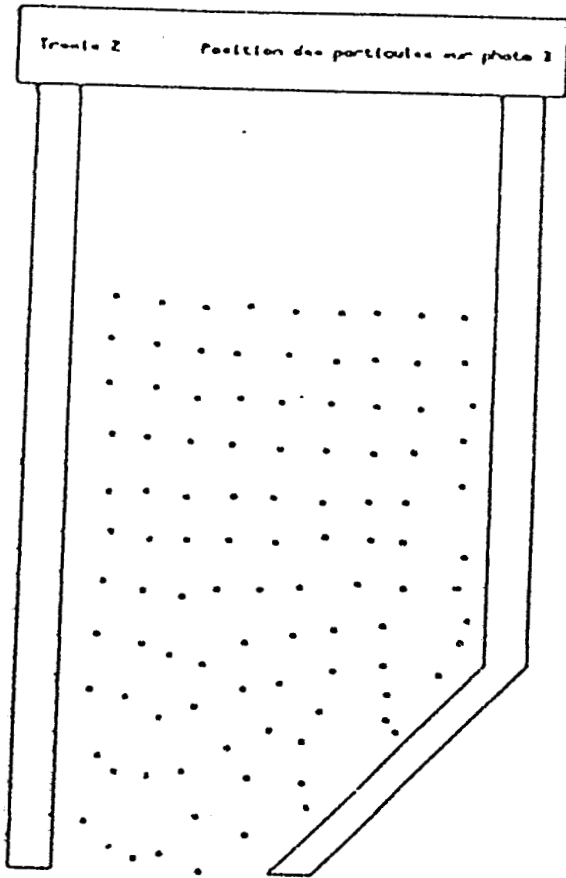


TREMIE N° 2 (45°)

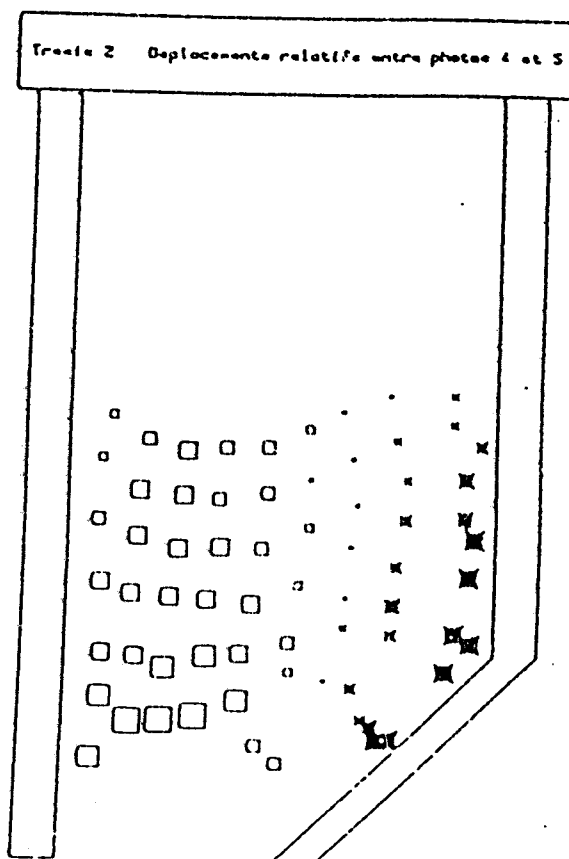
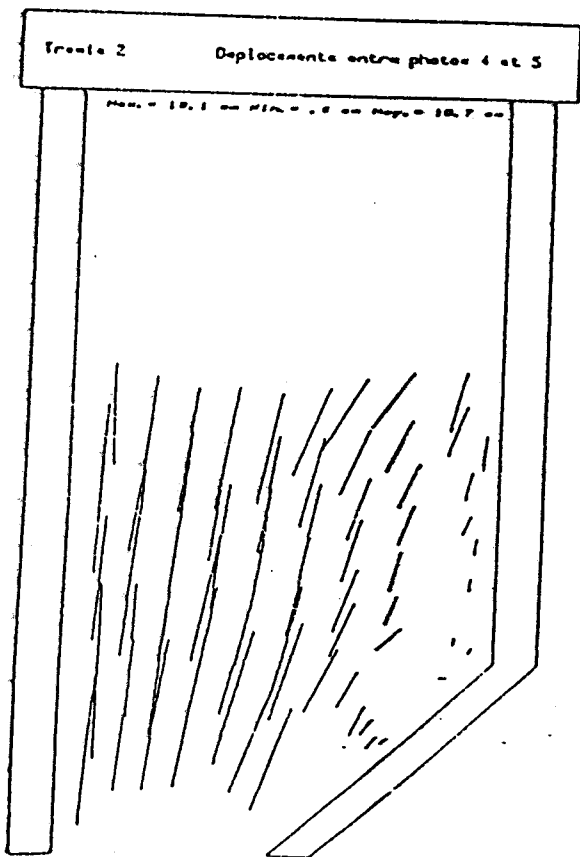
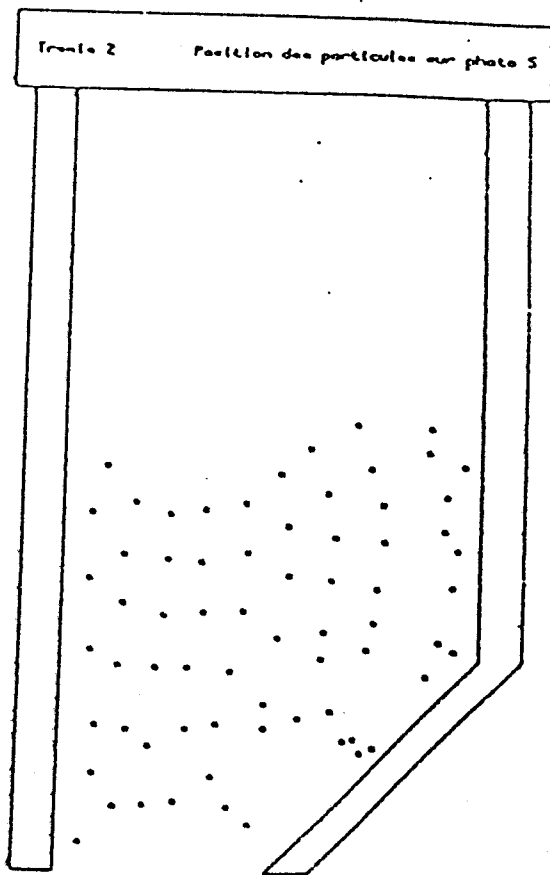
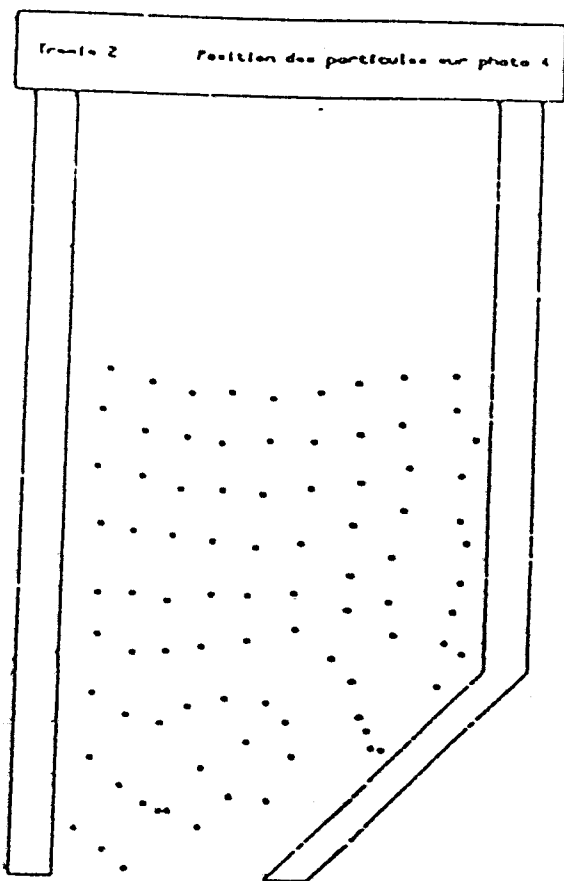








BU
LILLE



Université des Sciences
et Techniques de
Flandres - Artois

THESE DE : Doctorat Université
DISCIPLINE : Mathématiques

N° d'Ordre : 12

DSR

Mécanique

R Y : Président - Rapporteur : Monsieur PARSY, Professeur Université de Lille
Examineur : Monsieur HENRY, Professeur Université de Lille
Examineur : Monsieur MERIAUX, Professeur de l'IUT d'Amiens
Examineur : Monsieur NOMINE, Adjoint aux Recherches CERCHAR
Invité : Monsieur GRATEPANCHE, Directeur des Recherches
ENSTIMD
Invité : Monsieur TARDY, Professeur ENSTIMD

TITRE DE LA THESE : Contribution à l'étude de la manutention des charbons fins et humides.
Application à l'écoulement en silos.

S U M E : Les stations utilisatrices de charbon sont plus ou moins confrontées à des difficultés dans les opérations de transport de matériau, et particulièrement lors de phases d'écoulement en trémie.

Après avoir évalué pour des charbons d'une dizaine de provenances différentes les caractéristiques physiques et mécaniques afin d'estimer l'influence de chacune de ces caractéristiques sur le comportement du matériau lors des phases définies plus haut, l'examen d'un point de vue général du phénomène de l'écoulement d'un milieu granulaire en trémie a été abordé.

Dans un premier temps, les perturbations provoquées par la présence de l'angle de repos situé à la jonction des parois verticales et inclinées ont été mises en évidence grâce au modèle mécanique à rouleaux.

L'influence du paramètre teneur en eau, ce sur un sable d'oïse de caractéristiques mécaniques voisines de celles de la plupart des charbons préalablement testés, a été ensuite abordée dans la recherche.

De plus un dispositif mécanique permettant d'agrandir l'orifice de vidange par l'inclinaison des parois inférieures a été réalisé. Les mesures effectuées ont permis de mettre en évidence l'existence d'une teneur en eau critique au delà de laquelle la formation d'une voûte au voisinage de l'orifice empêche tout écoulement. L'efficacité du dispositif d'agrandissement de l'orifice s'est avérée.

Les résultats des essais ont montré aussi l'existence d'un angle optimal de la paroi pour lequel l'écoulement était possible, ceci quelle que soit la teneur en eau du matériau.

MOTS-CLEFS

Mécanique des Sols
Matériaux pulvérulents
Cohésion apparente
Foisonnement