



**HAL**  
open science

## Contribution à l'étude géologique et géotechnique des glacis d'accumulation en Iran

Chahpour Azimi

► **To cite this version:**

Chahpour Azimi. Contribution à l'étude géologique et géotechnique des glacis d'accumulation en Iran. Géologie appliquée. Université Scientifique et Médicale de Grenoble, 1976. Français. NNT : . tel-00814359

**HAL Id: tel-00814359**

**<https://theses.hal.science/tel-00814359>**

Submitted on 17 Apr 2013

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

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

N° d'Ordre :

DOUBLE  
205142  
1976  
161

205142  
1976  
161

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE  
DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR INGENIEUR

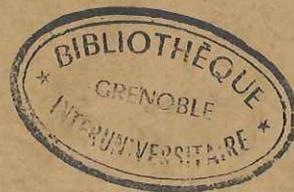
par

Chahpour AZIMI

Ingénieur Géologue de l'Université Lomonosov de Moscou

CONTRIBUTION A L'ETUDE GEOLOGIQUE ET  
GEOTECHNIQUE DES GLACIS D'ACCUMULATION EN IRAN

Soutenu le 4 Octobre 1976 devant la Commission d'Examen



Messieurs

<b>R. BARBIER</b>	Professeur	Président
<b>J. BIAREZ</b>	Professeur	Rapporteur
<b>R. MICHEL</b>	Professeur	} Examineurs
<b>P. DESVARREUX</b>	Docteur - Ingénieur	

GRENOBLE

N° d'Ordre :

205142  
1976  
161

# THÈSE

présentée à

L'UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE  
DE GRENOBLE

pour obtenir

LE GRADE DE DOCTEUR INGENIEUR

par

Chahpour AZIMI

Ingénieur Géologue de l'Université Lomonosov de Moscou

CONTRIBUTION A L'ETUDE GEOLOGIQUE ET  
GEOTECHNIQUE DES GLACIS D'ACCUMULATION EN IRAN

T. 76/209

Soutenu le 4 Octobre 1976 devant la Commission d'Examen



Messieurs

R. BARBIER	Professeur	Président
J. BIAREZ	Professeur	Rapporteur
R. MICHEL	Professeur	} Examineurs
P. DESVARREUX	Docteur - Ingénieur	

GRENOBLE

LE SITE SCIENTIFIQUE  
ET MÉDICAL DE GRENOBLE

M. Michel SOUTIF

M. Gabriel CAU

INSTITUT NATIONAL POLY-  
TECHNIQUE DE GRENOBLE

Présidents M. Louis NEEL  
Vice-Présidents M<sup>rs</sup>. Lucien BONNETAIN  
Jean RENOU

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE L'U.S.A.G.

PROFESSEURS TITULAIRES

M<sup>rs</sup>. ANGLES D'ALRIC Paul  
ARNAUD Georges  
AUBERT Guy  
AYAT Yves  
BARBIER Marie-Jeanne  
BARBIER Jean-Claude  
BARLON Robert  
BARQUIN Fernand  
BARRE Jean-Benoît  
BARRIE Joseph  
BEAUBAT André  
BERNARD Albert  
BERTRANDAS Françoise  
BÈRES Henri  
BUNGER Maurice  
BILLET Louis  
BONNET Jean-Louis  
BOUCHERLE André  
BOUCHERLE Joseph  
BOUCHERLE Robert  
BOUSSARD Jean-Claude  
BRAYARD Yves  
CABANEL Guy  
CALAS François  
CARAZ Gilbert  
CAU Gabriel  
CAUQUIS Georges  
CHABAUTY Claude  
CHAPACHON Robert  
CHATEAU Robert  
CHIBON Pierre  
COEUR André  
CONTAMIN Robert  
COURCÈRE Pierre  
CRAVA Antoine  
DEBELMAS Anne-Marie  
DEBELMAS Jacques  
DEGRANGE Charles  
DESPORTS Charles  
DESRE Pierre  
DESSAUX Georges  
DODU Jacques  
DOLIQUE Jean-Michel  
DREYFUS Bernard  
DUCROS Pierre  
DUGOS Pierre  
FAU René

Mécanique des fluides  
Mécanique des maladies infectieuses  
Chimie  
Physique  
Physique approfondie  
Electrochimie  
Physique expérimentale  
Physiologie cellulaire  
Statistique  
Cytologie  
Chirurgie  
Mécanique des Pures  
Mathématiques Pures  
Mathématiques Pures  
Informatique (IUT B)  
Electrotechnique  
Chirurgie ophthalmologique  
Pathologie médicale  
Chimie et Toxicologie  
Physique nucléaire  
Mathématiques Appliquées  
Géographie  
Clinique rhumatologique et hydrologie  
Anatomie  
Biologie animale et pharmacodynamie  
Médecine légale et Toxicologie  
Chimie organique  
Mathématiques Pures  
Oto-Rhino-Laryngologie  
Thérapeutique  
Biologie animale  
Pharmacologie et chimie analytique  
Clinique gynécologique  
Anatomie Pathologique  
Mécanique  
Géologie générale  
Zootomie  
Chimie minérale  
Métallurgie  
Physiologie animale  
Mécanique appliquée  
Physique des plasmas  
Thermodynamique  
Cristallographie  
Clinique de dermatologie et Syphiligraphie  
Clinique neuro-psychiatrique

M<sup>rs</sup>

DEBELMAS Anne-Marie  
DEBELMAS Jacques  
DEGRANGE Charles  
DESPORTS Charles  
DESRE Pierre  
DESSAUX Georges  
DODU Jacques  
DOLIQUE Jean-Michel  
DREYFUS Bernard  
DUCROS Pierre  
DUGOS Pierre  
FAU René

M<sup>rs</sup>

DEBELMAS Anne-Marie  
DEBELMAS Jacques  
DEGRANGE Charles  
DESPORTS Charles  
DESRE Pierre  
DESSAUX Georges  
DODU Jacques  
DOLIQUE Jean-Michel  
DREYFUS Bernard  
DUCROS Pierre  
DUGOS Pierre  
FAU René

PROFESSEURS ASSOCIÉS

M<sup>rs</sup>. ASCARELLI Gianni  
CHEEKE John  
GILLESPIE John  
ROCKAFELLAR Ralph  
WOHLFARTH ERICH

M<sup>rs</sup>

GAGNAIRE d'Ar  
GALLISSY François  
GALVANI Octave  
GASTHEL Noël  
GAVERO Michel  
GERBER Robert  
GERMAIN Jean-Pierre  
GIRAUD Pierre  
KLEIN Joseph  
KOSZUL Jean-Louis  
KRAYTCHENKO Julian  
KUNTSMANN Jean  
LACAZE Albert  
LACHARME Jean  
LAJZERONICZ Joseph  
LATREILLE René  
LAURENT Jean  
LEDUR Jean  
LEBOUZY Louis  
LONGUEUE Jean-Pierre  
LOUP Jean  
LUTZ Elisabeth  
MAGNANCE Bernard  
MALINS Yves  
MARTIN-NOEL Pierre  
MAZRE Yves  
MICHEL Robert  
MOURQUAND Claude  
MOUSSE André  
NEEL Louis  
PAYAN Jean-Jacques  
PEBAY-PEYROLA Jean-Claude  
RASSAT André  
REMYARD Michel  
REULOS René  
RINALDI Renaud  
ROBERT Jean  
DE ROUGEMONT Jacques  
SEIGNERIN Raymond  
SENGEL Philippe  
SOUTIF Michel  
TANCHE Maurice  
TRAYNARD Philippe  
VAILLANT François  
VALENTIN Jacques  
VALQUOIS Bernard  
VERAIN Alice  
VEYRE André  
VEYRE Paul  
VIGNAIS Pierre  
YOCOZ Jean

M<sup>rs</sup>

Chimie Physique  
Mathématiques Pures  
Mathématiques Pures  
Analyse numérique  
Pharmacologie  
Electroradiologie  
Mathématiques Pures  
Géologie  
Physique générale  
Mathématiques Pures  
Mécanique  
Thermodynamique Appliquées  
Biologie végétale  
Physique  
Chirurgie générale  
Biochimie pharmacologique  
Mathématiques Appliquées  
Clinique médicale  
Physiologie  
Géographie  
Mathématiques Pures  
Mathématiques Pures  
Clinique obstétricale  
Sémiologie médicale  
Clinique médicale A  
Minéralogie et Pétrographie  
Histologie  
Chimie analytique  
Botanique  
Mathématiques Pures  
Physique  
Chimie systématique  
Thermodynamique  
Physique Industrielle  
Physique  
Neurochirurgie  
Microbiologie et Hygiène  
Zoologie  
Physique générale  
Chimie générale  
Zoologie  
Physique Nucléaire  
Calcul électronique  
Pharmacie générique  
Géographie  
Physique  
Physique nucléaire théorique

PROFESSEURS SAUS CHAIRE

M<sup>rs</sup>. AGNIUS-DELORD Claudine  
ALARY Josette  
BELOPITZKY Ella  
BERZAKEN Claude  
BERTANDIAS Jean-Paul  
BIAREZ Jean-Pierre  
BONNIER Jeanne  
BRUGEL Lucien  
CARLIER Georges  
COTTE René  
DEPASSEL Roger  
GAUTHIER Yves  
GAUTRON René  
GIDON Paul  
GLÉNAT René  
HACQUES Gérard  
HOLLARD Daniel  
HUGONOT Robert  
JACQUIN Simon  
JANNIN Bernard  
JULLIEN Pierre  
KOHANE Josette  
KORN Gérard  
LLOU-DUC-Cuong  
MULLER Jean-Michel  
PERRAUX Jean-Jacques  
PIESTER Jean-Claude  
PIERRE Yvette  
REBECQ Jacques  
Urologie  
Biologie (CUS)  
Chirurgie générale  
Chirurgie orthopédique  
Chimie papetière  
Anatomie et chirurgie  
Géologie  
Construction Mécanique  
Chirurgie générale  
Géologie  
Mathématiques appliquées

MAITRES DE CONFÉRENCES ET MAITRES DE CONFÉRENCES AGRÉGÉS

M<sup>rs</sup>. AMBLARD Pierre  
Parasitologie  
ARMAND Yves  
Chimie  
BEGUIN Claude  
Chimie organique  
BILLET Jean  
Géographie  
BOUCHART Jacques  
Psychiatrie adultes  
BOUCHE Liane  
Anatomie  
BRODEAU Yves  
Mathématiques (CUS)  
BUISSON Roger  
Mathématiques (IUT B)  
BUTEL Jean  
Physique  
ORINOPOLIO  
CHAMBAZ Edmond  
Biochimie médicale  
CHAMPETIER Jean  
Anatomie et organogénèse  
CHERADAME Hervé  
Chimie papetière  
CHIARIERNA Jean  
Biologie appliquée

- Mme COHEN-ADDAD Jean-Pierre  
 M. COLOVA Maurice  
 COULOMB Max  
 CROUZET Guy  
 CYROU Michel  
 DELOBEL Claude  
 DISSAUD René  
 ETEPADOSSI Jacqueline  
 FAURE Jacques  
 FONTAINE Jean-Marc  
 GENSAO Pierre  
 GIDON Maurice  
 GRIFFITHS Michabé  
 GROS Yves  
 GROULADE Joseph  
 GUITTON Jacques  
 IVANES Marcel  
 JALBERT Pierre  
 JALBERT Pierre  
 KRANKOWSKA Secha  
 LAJZEROWICZ Jeannine  
 LEROY Philippe  
 LOISEAUX Jean-Marie  
 MACHE Régis  
 MAGNIN Robert  
 MARECHAL Jean  
 MARTIN-BOUYER Michel  
 MICHAUX Jean  
 MINIER Colette  
 M. NICOD Max  
 NEGRE Robert  
 PARAVELLE Bernard  
 PECCOLD François  
 PELLEN René  
 PELVON Jean  
 PERRET Jean  
 PHELIP Xavier  
 RACHAIL Michel  
 RACINET Claude  
 RAYNAUD Hervé  
 RAYNAUD Hervé  
 RENAUD Maurice  
 RICHARD Lucien  
 M. RIVAUDO Marguerite  
 M. RONTIER Guy  
 SHOW Jean Claude  
 STIEGLITZ Paul  
 STOEBERN Pierre  
 VROUSOS Constantin

- Spectrométrie physique  
 Biochimie médicale  
 Radiologie  
 Radiologie  
 Physique du solide  
 M.I.A.G.  
 Mathématiques (CJIS)  
 Physiologie  
 Médecine légale  
 Mathématiques Pures  
 Potentielle  
 Géologie  
 Mathématiques Appliquées  
 Physique (strag.)  
 Biochimie médicale  
 Electricité  
 Histologie  
 Mathématiques appliquées  
 Physique  
 Mathématiques  
 Physiologie Nucléaire  
 Physiologie végétale  
 Hygiène et Médecine préventive  
 Mécanique  
 Chimie (CJIS)  
 Physique (I.U.T. 7<sup>ème</sup>)  
 Physiologie  
 Maladies Infectieuses  
 Mécanique  
 Pneumologie  
 Analyse (IUT B)  
 Métallurgie  
 Physiologie animale  
 Neurologie  
 Rhumatologie  
 Médecine Interne  
 Gynécologie et obstétrique  
 M.I.A.G.  
 Chimie  
 Bactériologie  
 Botanique  
 Chimie macromoléculaire  
 Mathématiques (IUT B)  
 Chimie Générale  
 Anesthésiologie  
 Anatomie pathologique  
 Radiologie

MAITRES DE CONFERENCES ASSOCIES

- M. CRABEE Pierre  
 CASOT  
 CURRIE Jan

CHARGES DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

- C.E.R.M.O.  
 Mathématiques appliquées  
 Mathématiques appliquées  
 Neuro-chirurgie  
 Chirurgie thoracique et cardio-vasculaire  
 Néphrologie  
 Cardiologie  
 Hématologie  
 Pédiatrie  
 Hygiène et hydrologie

MEMBRES DU CORPS ENSEIGNANT DE L'U.N.E.S.C.

PROFESSEURS TITULAIRES

- M. BENOIT Jean  
 BESSON Jean  
 BONNETAIN Lucien  
 BONNIER Etienne  
 BRISSONNEAU Pierre  
 BUILE-BODIN Maurice  
 COUMES André  
 FELICI Noël  
 PAUTHRENET René  
 PERRET René  
 SANTON Lucien  
 SILBER Robert

- Radiodélectricté  
 Electrochimie  
 Chimie Minérale  
 Electrochimie, Electrometallurgie  
 Physique du solide  
 Electronique  
 Radiodélectricté  
 Electrostatique  
 Physique du solide  
 Sovromécanismes  
 Mécanique  
 Mécanique des Fluides

PROFESSEUR ASSOCIE

- M. BOUDOURIS Georges

PROFESSEURS SANS CHAIRE

- M. BLIHAN Samuel  
 BLOCH Daniel  
 COHEN Joseph  
 DURAND Francis  
 MOREAU René  
 POLQUADOFF Michel  
 VEILLON Gérard  
 ZADKORNY François

- Radiodélectricté  
 Electronique  
 Physique du solide et Cristallographie  
 Electrotechnique  
 Métallurgie  
 Mécanique  
 Electrotechnique  
 Informatique fondamentale et appliquée  
 Electronique

MAITRES DE CONFERENCES

- M. BOUVARD Maurice  
 CHARTIER Germain  
 FOULARD Claude  
 GUYOT Pierre  
 JOURBERT Jean Claude  
 LACOURNE Jean Louis  
 LANCIA Roland  
 LESPINARD Georges  
 MORET Roger  
 ROBERT François  
 SABONNIERE Jean Claude  
 SAUCIER Gabrièle  
 Mme SAUCIER Gabrièle

- Génie mécanique  
 Electronique  
 Automatique  
 Chimie minérale  
 Physique du solide  
 Géophysique  
 Mécanique  
 Electrotechnique nucléaire  
 Analyse numérique  
 Informatique fondamentale et appliquée  
 Informatique fondamentale et appliquée

MAITRE DE CONFERENCES ASSOCIE

- M. LANDAU Jean Doré

CHARGE DE FONCTIONS DE MAITRES DE CONFERENCES

- M. ANCEAU François  
 Mathématiques appliquées

Je dédie cet ouvrage  
à mon fils

AVANT - PROPOS

Je veux tout d'abord exprimer ma profonde reconnaissance aux gouvernements Iranien et Français dont les aides financières m'ont permis de réaliser le présent travail.

J'y associe ma reconnaissance à Monsieur ASSEFI et Monsieur EFTEKARNEJAD, Directeur et Sous-Directeur du Service Géologique d'Iran, ainsi qu'à l'ancien Directeur Monsieur KHADEM, au Sous-Directeur Monsieur SABETKADAM et à Monsieur SARABI.

Je remercie vivement Monsieur le Professeur BARBIER qui m'a fait l'honneur de superviser cette thèse. J'exprime aussi mes remerciements les plus sincères à Monsieur le Professeur BIAREZ qui m'a accueilli au Laboratoire de Géotechnique de Grenoble et qui a assuré la direction de mes travaux. Je remercie également Monsieur le Professeur MICHEL pour l'intérêt qu'il a porté à mes recherches.

Ma reconnaissance va également à tout le personnel du Laboratoire de Géotechnique, en particulier Monsieur Chahrock AZIMI pour sa collaboration extrêmement fructueuse et Monsieur DESVARREUX qui m'a fait profiter de son expérience. J'y ajoute Monsieur KIRCHER qui m'a aidé à réaliser plusieurs essais au laboratoire et qui m'a mis au net toutes les figures de ce mémoire. Enfin Madame LAURENT pour la réalisation matérielle du manuscrit.

Je mentionnerai également le personnel du CROUS à Grenoble qui m'a apporté une aide appréciable durant mon séjour en France et que je tiens à remercier.

Enfin, je voudrais remercier mon collègue Monsieur KIMIAGHALAM ainsi que Monsieur D. JIOTTA pour leur aide dans les corrections du texte.

S O M M A I R E

	Pages
INTRODUCTION .....	1
 <u>PREMIERE PARTIE</u>  <u>LES TERRAINS QUATERNAIRES EN IRAN</u>	
 <u>CHAPITRE I - APERCU GEOGRAPHIQUE DE L'IRAN</u>	
1 - Géographie .....	11
2 - Climat .....	14
3 - Réseaux hydrographiques .....	15
4 - Végétation .....	15
 <u>CHAPITRE II - ETUDE DES TERRAINS QUATERNAIRES EN IRAN</u>	
1 - Développement des glacis d'accumulation	19
2 - Mécanisme de formation des glacis par sédimentation d'alluvions .....	19
3 - Lithologie des alluvions des glacis	20
4 - Pétrographie des alluvions des glacis	21
5 - Morphologie des glacis d'accumulation	21
a) Zone des cônes de déjection	21
b) Zone de piémont .....	22
c) Zone de plaine	22
 <u>CHAPITRE III - HYDROGEOLOGIE DES ALLUVIONS DES GLACIS ET METHODE D'EXPLOITATION DES NAPPES AQUIFERES</u>	
1 - Les ghanates .....	25
2 - Les forages profonds .....	28
3 - Les puits semi-profonds .....	30
CONCLUSIONS .....	31

DEUXIEME PARTIE

DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES ALLUVIONS  
DES GLACIS DANS LA REGION ETUDIEE

Pages

CHAPITRE IV - CARACTERISTIQUES DE LA REGION ETUDIEE

1 - Introduction .....	37
2 - Situation géographique .....	37
3 - Géomorphologie .....	38
a) Zone montagneuse .....	38
b) Zone de transition au pied des versants .....	39
c) Glacis d'accumulation de la plaine de Tabasse .....	39
d) Zone située en bordure de la rivière Zayendeh-Roud .....	40
e) Zone du lit majeur et du lit actuel du Zayendeh-Roud .....	40
4 - Climat .....	45
5 - Histoire des études de géologie .....	47
6 - Géologie de la région .....	48
a) Jurassique .....	48
b) Crétacé .....	48
7 - Hydrogéologie de la région .....	53
a) Nappe correspondant au lit majeur du Zayendeh-Roud .....	53
b) Nappe des alluvions de plaine .....	56
c) Caractéristiques hydrogéologiques des couches supérieures de la nappe .....	57

CHAPITRE V - ESSAIS AU LABORATOIRE

1 - Granulométrie .....	62
2 - Teneur en eau .....	62
3 - Plasticité .....	67

4 - Poids spécifique, poids volumique sec et poids volumique in situ, indice des vides, porosité et degré de saturation .....	67
5 - Essais Los-Angeles .....	78
6 - Détermination de la résistance du conglomérat à la compression simple .....	78
7 - Détermination de l'angle de talus naturel des graviers .....	78
8 - Essais de cisaillement .....	82

#### CHAPITRE VI - ESSAIS IN SITU

1 - Liste des essais faits in situ .....	85
2 - Essais de granulométrie, pétrographie, poids volumique in situ .....	85
a) Poids volumique .....	85
b) Granulométrie .....	89
c) Pétrographie visuelle des matériaux grossiers .....	89
3 - Détermination de la corrosion des sols sur les métaux par la méthode électrique .....	89
4 - Essais de plaque .....	90
5 - Essais de cisaillement .....	98
6 - Mesure de perméabilité in situ .....	98

#### CHAPITRE VII - SYNTHESE DES RESULTATS DES PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES ALLUVIONS DE LA PLAINE DE TABASSE

I - <u>Propriétés physiques des alluvions de la plaine de Tabasse</u> .....	107
1 - Granulométrie .....	108
2 - Poids spécifique .....	125
3 - Poids volumique .....	125
4 - Plasticité .....	138

	Pages
5 - Teneur en eau et degré de saturation	141
6 - Pétrographie .....	141
7 - Porosité et indice des vides .....	144
8 - Salinité et influence de la corrosion	144
 II - <u>Caractéristiques mécaniques des alluvions de la plaine de Tabasse</u>	 146
1 - Module de déformation .....	146
2 - Cohésion et angle de frottement interne	151
CONCLUSIONS .....	153

TROISIEME PARTIE

ETUDE DES CORRELATIONS ENTRE L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE ET D'AUTRES PARAMETRES POUR DES SOLS PULVERULENTS SANS FINS

CHAPITRE VIII - ETUDE DU PROBLEME DES CORRELATIONS EN MECANIQUE DES SOLS

1 - Classification .....	163
2 - Etude des corrélations entre ces paramètres	165
a) Les corrélations à l'intérieur d'une même classe .....	165
b) Les corrélations faisant intervenir les paramètres des trois classes .....	165

CHAPITRE IX - ETUDE DE L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE

1 - Définition de l'angle de frottement interne	169
2 - Présentation des essais effectués .....	171
a) Raison du choix du matériau .....	171
b) Description du matériau .....	171

	Pages
3 - Description des essais effectués	172
a) Mesure des densités extrêmes $\gamma_m$ et $\gamma_M$	172
b) Mesure de l'angle de talus $\beta$ .....	172
c) Essais à l'appareil triaxial .....	173

CHAPITRE X - RESULTATS DES ESSAIS SUR LES GRAINS D'ACIER  
ET LES SABLES

1 - Densités extrêmes .....	177
a) Influence de la dimension .....	177
b) Influence de l'angularité .....	177
2 - Angle de talus naturel $\beta$ .....	181
3 - Essais triaxiaux .....	185
a) Courbes de déformations .....	185
b) Influence de la compacité .....	185
c) Influence de la pression latérale $\sigma_3$	197
d) Influence de la dimension des particules	201
4 - Résultats relatifs au problème de la forme des particules .....	206
5 - Résultats des essais sur des sables ....	211
CONCLUSIONS .....	221

## INTRODUCTION GENERALE

Les terrains quaternaires en Iran ont une vaste étendue et ils ont des caractéristiques communes au point de vue sédimentation, géologie et morphologie. Ce sont des caractéristiques dues à une série de développement de l'érosion et de l'accumulation dans les régions montagneuses avec des conditions climatiques particulières. Par conséquent, ces sédiments devraient avoir aussi des caractéristiques physico-mécaniques en commun dont nous parlerons dans les chapitres suivants.

Au point de vue de la création de centres industriels, centres d'habitation et de réseaux routiers, ces terrains sont les meilleurs parce qu'ils ont des propriétés mécaniques excellentes, ils ne sont pas beaucoup utilisés à notre époque pour les cultures et les habitations, ils ne nécessitent pas de dépenses.

Malheureusement, les terrains quaternaires en Iran ne sont pas étudiés suffisamment, sauf dans quelques régions limitées où ont travaillé les experts Iraniens ou étrangers. Le Professeur le plus célèbre qui a approfondi ces études est Mr. H. RIBEN. Il a étudié quelques régions en Gorgan et en Azerbaïdjan, dans la plaine Sud de l'Alborze, entre Gazvin et Garmessar, et il a classé les alluvions développées aux environs de Téhéran au point de vue lithologie et en fonction de leur âge. Il a divisé ces alluvions en 4 catégories A, B, C, D.

M. ENGALENC a continué les études de RIBEN dans la région de Téhéran au point de vue morphologie et hydrogéologie pour faire une thèse de Sciences. Il y a eu encore quelques sociétés et des experts qui ont aussi étudié les alluvions de Téhéran et d'autres régions de l'Iran, au point de vue géologie et hydrogéologie.

.../...

Les experts du Service National de Géologie et le Ministère de l'Eau et de l'Electricité ont aussi étudié les alluvions dans certaines régions au point de vue hydrogéologie et géologie, et dans certains cas pour l'exploitation des sables et des graviers. En ce moment, les études de géologie de l'ingénieur sont faites par le Laboratoire de Mécanique des Sols (Ministère des Ponts et Chaussées). C'est un laboratoire bien équipé, il travaille pour l'Etat et pour des sociétés privées qui ont des projets routiers dans différentes régions de l'Iran. Leurs études consistent pour la plupart en analyses et essais sur des échantillons au laboratoire, recueillis pour la future construction. Il existe d'autres laboratoires plus petits et privés qui s'occupent aussi des analyses.

Malheureusement, ce laboratoire ne fait pas d'études scientifiques de géologie de l'ingénieur sur les alluvions développées en Iran et nous constatons que les terrains quaternaires en Iran n'ont pas fait l'objet d'une étude complète de géologie et surtout au point de vue géotechnique. Par conséquent, sauf dans certains cas, il n'existe pas de publications ou de rapports sur les terrains quaternaires.

Le seul grand projet pour lequel on a fait des études approfondies, avec de nombreux essais mécaniques et physiques des alluvions in situ et au laboratoire, est celui de la fondation d'une usine sidérurgique dans les années 1965 à 1967. Le Gouvernement a choisi la région d'Ispahan et les experts iraniens, avec la collaboration des experts soviétiques, ont commencé par faire une étude très précise sur les alluvions de cette région. J'étais le responsable de ces études du côté Iranien et j'y ai participé directement.

Ayant acquis une expérience grâce à 12 années de travail dans différentes régions de l'Iran sur les alluvions, et après avoir profité des autres études qui ont été faites, j'ai essayé de faire une synthèse sur les alluvions développées en Iran, laquelle fait l'objet de cette thèse.

On a étudié premièrement la genèse de ces alluvions et les facteurs et les conditions qui ont donné lieu à la naissance de ces alluvions. Puis on a étudié les conditions géomorphologiques et lithologiques, et enfin les propriétés mécano-physiques de ces alluvions. En profitant des résultats obtenus par les essais in situ et au laboratoire qui ont été faits sur les alluvions de la région d'Ispahan, j'ai essayé de trouver des relations entre les propriétés physico-mécaniques, lithologiques et morphologiques de ces

.../...

alluvions. C'est la première fois que ces alluvions font l'objet d'une étude de géotechnique approfondie, et considérant leur étendue, cette étude pourra être une base pour d'autres plus ponctuelles. Ces problèmes ont été étudiés en trois parties.

PREMIERE PARTIE

LES TERRAINS QUATERNAIRES EN IRAN

CHAPITRE I : APERCU GEOGRAPHIQUE DE L'IRAN

CHAPITRE II : ETUDE DES TERRAINS QUATERNAIRES EN IRAN

CHAPITRE III : HYDROGEOLOGIE DES ALLUVIONS DES GLACIS  
ET METHODE D'EXPLOITATION DES NAPPES  
AQUIFERES

CONCLUSIONS

CHAPITRE I

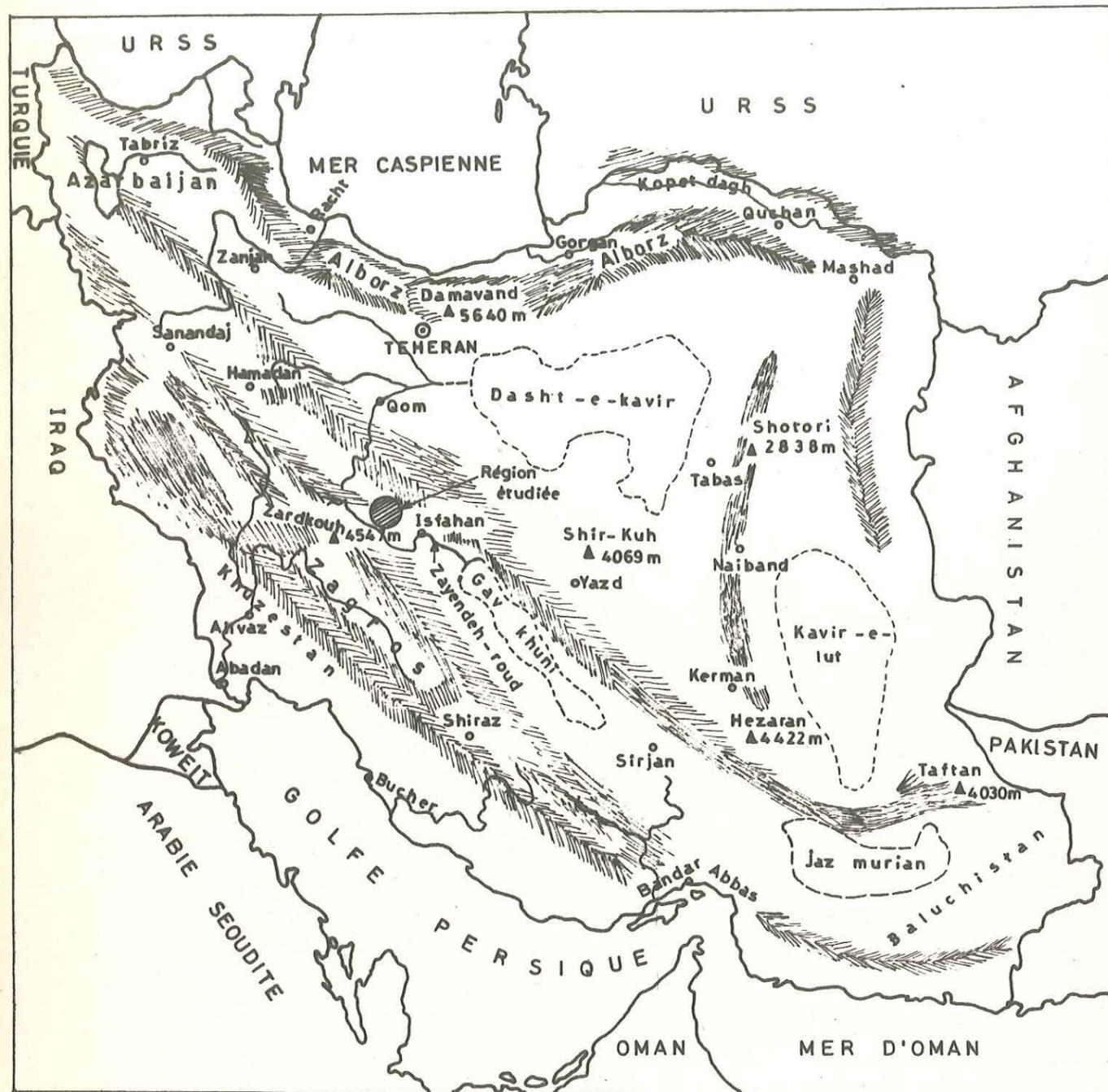
I - APERCU GEOGRAPHIQUE DE L'IRAN

1 - Géographie

2 - Climat

3 - Réseaux hydrographiques

4 - Végétation



Carte n° 1 - Carte générale de l'Iran, situation de la région étudiée.

Echelle 1/10 000 000

I - APERCU GEOGRAPHIQUE DE L'IRAN

1 - Géographie

L'Iran, dont la superficie est 1 648 000 km<sup>2</sup>, est situé entre la Mer Caspienne au Nord et la Mer d'Oman et le Golfe Persique au Sud (entre 44° et 64° de longitude, 25° et 40° de latitude). Il est entouré à l'Ouest par la Turquie et l'Irak, au Nord par l'U.R.S.S., à l'Est par le Pakistan et l'Afghanistan (carte n° 1).

Ce pays est situé sur un plateau dont l'altitude moyenne est de 1000 à 1500 m environ, et l'on peut distinguer les trois chaînes principales suivantes :

- . La chaîne d'Alborze se manifeste tout d'abord en Azerbaïdjan au Nord-Ouest, et se continue au Nord de l'Iran vers l'Afghanistan (au bord de la Mer Caspienne). La direction de cette chaîne est W - E. Son altitude générale est de 3000 mètres. Les hauts sommets dépassent 4000 m (Damavand : 5 640 m, Takhte Soleyman : 4 818 m, etc.)
- . La chaîne Zagros se manifeste tout d'abord en Azerbaïdjan au Nord-Ouest et elle continue vers le Sud-Est jusqu'au Pakistan. L'altitude générale de cette chaîne est comprise entre 2500 à 3000 m. On peut remarquer que les plus hauts sommets de cette chaîne sont Zardkuh : 4 547 m, Chirkuh : 4 069 m et Hezaran : 4 420 m, etc.
- . Dans le plateau central de l'Iran, il y a des chaînes qui ont une direction N - S et qui sont moins élevées que les deux premières chaînes, car le plus haut sommet atteint environ 3000 m. Ces chaînes sont situées entre le Khorassan au Nord et le Mokran au Sud.

Entre les trois chaînes montagneuses que l'on vient d'énumérer se situe un grand plateau dont l'altitude est d'environ 1000 m. A l'intérieur de ce plateau existent deux zones de dépression qui correspondent à deux grands déserts : le Dachte-Kevir qui se situe au Nord et le Dachte-Lut au Sud-Est. Il y a encore d'autres dépressions situées entre la chaîne Zagros, mais elles sont moins importantes que les deux premières (Gave-Khuni qui s'étend vers la région d'Ispahan, Dachte-Sir Jan et Jaz-Murian, etc.

.../...

Tableau n° 1 - PRECIPITATIONS ET TEMPERATURES ANNUELLES DANS DIFFERENTES VILLES d'IRAN

Villes	Altitude	Année	TEMPERATURES (°C)				PLUVIOMETRIE (mm)			Nbre de j. de neige par an
			Moyen.	Max.	Min.	Nbre de j. - 0°C par an	Total par an	Max. par j.	Nbre de j. de pluie par an	
Téhéran	1 191	1966	17,9	41,2	-2,2	15	160,2	15,9	62	0
	"	1967	16,2	41,6	-10,5	69	106,0	9,6	52	16
	"	1968	16,8	40,6	-9,6	47	208,1	14,1	87	6
	"	1969	-	39,7	-14,8	58	386,2	25,1	105	20
Ispahan	1 500	1960	15,9	41,5	-7,5	82	39,7	13,2	8	3
	"	1961	15,7	40,4	-10,5	84	115,5	25,5	20	1
	"	1962	15,9	38,4	-6,5	74	85,6	22,4	18	-
	"	1963	16,5	40,0	-13,5	51	50,9	6,0	20	5
	"	1964	-	40,2	-16,0	85	62,5	9,1	15	8
	"	1965	16,1	39,4	-9,2	81	54,2	10,4	26	11
	"	1966	16,8	40,0	-5,2	59	90,8	19,0	42	3
	"	1967	15,5	40,0	-10,0	90	76,7	20,1	35	10
	"	1968	16,0	39,5	-10,4	64	148,8	18,2	53	3
"	1969	16,0	41,0	-15,0	77	104,5	15,0	46	6	
Usine sidérurgique	1 768,5	1967		40,3	-10,6	103	74,0	13,3	24	-
	"	1968		39,3	-10,3	65	154,3	14,4	50	-
Chahre-Kord	2 066	1960	12,8	39,0	-19,0	115	184,2	36,0	36	7
	"	1964	11,2	38,6	-28,5	136	381,2	62,0	44	17

Birjand	1 465	1961	17,3	41,0	-9,0	72	145,1	24,0	30	6
	"	1962	16,7	39,6	-9,0	63	98,5	17,1	20	1
	"	1963	17,6	40,0	-10,2	45	79,6	18,6	23	3
Kerman	1 749	1966	-	38,4	-14,8	110	46,8	6,0	18	0
	"	1967	15,2	40,0	-14,6	92	127,4	25,0	26	3
	"	1969	15,8	40,0	-11,8	86	96,0	17,0	32	1
Yazd	1 240	1966	19,1	43,5	-8,2	27	43,2	24,4	13	0
	"	1967	18,3	44,0	-10,0	68	52,8	11,6	21	0
	"	1968	18,4	43,6	-9,8	48	87,9	10,3	35	1
Tabriz	1 362	1967	11,0	37,2	-22,2	132	289,6	26,3	95	36
	"	1968	12,0	36,4	-19,8	97	476,8	32,0	114	28
	"	1969	11,9	36,8	-15,8	106	412,8	32,7	85	26
Hamedan	1 644	1966	11,3	38,0	-12,6	128	273,9	24,2	57	7
	"	1967	10,5	38,6	-24,5	139	214,1	22,0	45	19
	"	1969	10,7	39,0	-31,0	120	408,9	39,2	95	22
Bandar-Abas	9	1966	27,3	43,0	8,5	0	32,4	10,0	7	0
	"	1967	27,1	44,0	7,0	0	60,3	33,3	9	0
	"	1968	27,0	45,0	7,5	0	151,1	49,8	16	0
	"	1969	27,6	43,5	9,0	0	127,7	50,8	24	0
Bandar-Pahlavi	- 15	1966	19,1	34,4	3,1	0	1605,6	115,3	109	0
	"	1967	15,9	33,6	- 2,0	9	1528,4	126,8	120	3
	"	1968	16,3	33,2	- 0,3	4	1522,4	74,7	133	1
	"	1969	13,3	31,9	- 2,8	35	2310,8	109,0	163	20

## 2 - Climat

Il est, dans l'ensemble de l'Iran, aride et semi-aride, sauf dans les zones côtières de la Mer Caspienne. Les précipitations sont de l'ordre de 150-250 mm par an en moyenne. Il y a beaucoup plus de précipitations au N-O de l'Iran car il y a l'influence de la Mer Méditerranée (400 mm par an en moyenne). Dans le centre et le Sud-Est de l'Iran, elles diminuent progressivement. Elles sont de l'ordre de 50-150 mm par an.

On peut dire aussi que les précipitations augmentent avec l'altitude. Dans les régions voisines de la Mer Caspienne, le climat est très humide et les précipitations sont de l'ordre de 1500 mm par an environ.

La température suit les variations des précipitations, c'est-à-dire que la moyenne de température augmente du N - O vers le S - E et elle varie aussi avec l'altitude. Pour le centre et le Sud-Est de l'Iran, la température maximum varie de 40 à 50° en été. Au Nord et N - O de l'Iran, la température maximum est de l'ordre de 35-40° en été. En général, en Iran, l'hiver est froid, sauf dans les zones côtières du Sud. Dans les zones montagneuses du Nord et de l'Ouest, les températures atteignent - 20° à - 30° quelquefois. Finalement, en Iran, il y a quatre saisons distinctes. L'été est chaud, l'hiver est froid avec beaucoup de neige dans les régions montagneuses. Le Tableau n° 1 nous montre l'évolution des précipitations et des températures dans les différentes régions de l'Iran.

## 3 - Réseaux hydrographiques

Au point de vue réseaux hydrographiques, nous pouvons distinguer trois bassins maritimes :

- . le bassin de la Mer Caspienne : Il est constitué par de grandes rivières comme l'Araxe, le Sefid-Roud, l'Atrak et par d'autres beaucoup moins importantes et plus courtes situées sur le versant Nord de l'Alborze ;
- . le bassin du Golfe Persique et de la Mer d'Oman. C'est là que le Karoun, seule rivière pratiquement navigable, avec ses affluents, forme le cours d'eau le plus important. Par ailleurs, il se jette dans le Golfe Persique et dans la Mer d'Oman un assez grand nombre de rivières moins importantes.

.../...

- . Le bassin de l'Iran central. A part les deux grands bassins que nous avons énumérés, il y a les bassins fermés dans le plateau central de l'Iran, comme le Dachte-Kevir, le Dachte-Lut, le Jaz-Murian, le Sistan, etc. Dans les vallées des régions montagneuses, il y a d'autres bassins moins importants comme le Gave-Khuni et le Dachte-Sirjan ; ils sont alimentés par des rivières saisonnières, et parfois par des rivières qui coulent toute l'année comme le Zayendeh-Roud. Parmi ces bassins, il y a le lac Rezaheh en Azerbaïdjan et Maharlou, à côté de la ville de Chiraz.

## 4 - Végétation

L'Iran n'est pas un pays riche en végétation. Dans les régions centrales et de l'Est de l'Iran on observe une végétation de steppe des déserts tempérés. Les régions les plus importantes en forêts se situent au Nord de la chaîne d'Alborze et tout près des rives de la mer Caspienne. On trouve une végétation comprenant des forêts de pistaches, d'amandes sauvages et des châtaigniers dans les régions montagneuses de la chaîne Zagrosse et parfois sur la chaîne d'Alborze.

CHAPITRE II

II - ETUDE DES TERRAINS QUATERNAIRES EN IRAN

- 1 - Développement des glacis d'accumulation
- 2 - Mécanisme de formation des glacis par sédimentation d'alluvions
- 3 - Lithologie des alluvions des glacis
- 4 - Pétrographie des alluvions des glacis
- 5 - Morphologie des glacis d'accumulation

## II - ETUDE DES TERRAINS QUATERNAIRES EN IRAN

### 1 - Développement des glacis d'accumulation

La plupart des alluvions qu'on rencontre en Iran sont les alluvions des glacis d'accumulation ; elles sont formées de matériaux déposés par des torrents et elles couvrent la plus grande partie des plaines et des piémonts.

D'après ce que nous avons vu, l'Iran est un pays montagneux, avec un climat aride et semi-aride ; les précipitations sont donc faibles en général. Néanmoins, dans les zones montagneuses, les précipitations sont plus importantes et dans certains cas tombent en forme de pluies torrentielles à la suite desquelles se forment des torrents temporaires.

Nous allons expliquer maintenant les caractéristiques géologiques et le mécanisme de sédimentation de ces alluvions qui est un phénomène des régions montagneuses en climat aride et semi-aride.

### 2 - Mécanisme de formation des glacis par sédimentation d'alluvions

Les torrents les plus importants se forment au printemps car c'est la saison de plus forte pluviométrie et en même temps il y a la fonte des neiges. A cause de la faible perméabilité des sols rocheux et de la raideur des pentes des montagnes, les eaux de pluie s'écoulent rapidement dans les vallées étroites où elles forment des torrents. A cause de l'érosion, les roches des pentes ont été détruites et les sédiments se sont accumulés dans la vallée grâce à la raideur des pentes et aux ruissellements des pluies. D'autre part, le manque de végétation qui aurait pu retenir des sédiments en place, accélère encore la vitesse d'accumulation de ces matériaux au fond des vallées.

Pendant ce temps-là, des oueds à sec deviennent d'immenses rivières coulant à grande vitesse, mais leur durée est éphémère. Les sédiments qui déjà ont été accumulés dans la vallée lors de la venue des torrents, sont entraînés vers le piémont.

Dès que les torrents sortent des zones montagneuses, il y a une brusque diminution de vitesse due à la pente beaucoup moins raide et à la divagation des eaux. Les premiers sédiments à se déposer sont les blocs, les galets et les graviers. Ensuite, se déposent beaucoup plus loin les matériaux plus fins comme le sable, le silt et l'argile.

Le transport et la sédimentation de ces alluvions ont donc un rapport avec l'intensité des précipitations, la surface du bassin, la résistance des roches mères à l'érosion et la couverture végétale.

Ce phénomène se retrouve dans toutes les régions de l'Iran avec différentes intensités. Les alluvions de terrains quaternaires que nous pouvons voir dans toutes les régions de pieds de montagne et dans les plaines sont formées la plupart du temps par des apports de torrents ; ces alluvions sont bien développées et elles sont assez épaisses.

### 3 - Lithologie des alluvions des glacis

Donc, nous pouvons dire en résumé que dans ce genre de sédimentation, le facteur le plus important qui influence l'apport des matériaux et la sédimentation est celui de l'intensité du courant car il change assez fréquemment. Par conséquent, les alluvions de différentes dimensions se déposent plus ou moins loin dans la plaine. C'est pourquoi, si nous faisons un sondage dans ce genre d'alluvions et préparons une coupe géologique, on n'obtiendra pas une coupe régulière, mais on rencontrera les différents sédiments qui formeront des couches minces ou épaisses.

Les matériaux fins se sédimentent dans les bassins fermés des plaines, mais dans certains ils se déposent dans les fossés qui se trouvent par hasard sur le trajet du torrent, et l'argile, le silt et quelquefois le sable forment des lentilles. Mais en général, d'après ce que nous avons remarqué dans les analyses de granulométrie de la région d'Ispahan dans les dépôts de piémont, il existe 15 à 25 % de silt et d'argile qui se trouvent entre les espaces vides des graviers. Dans certains cas, ils jouent un rôle de ciment pour ces graviers, mais ce ciment n'est pas résistant à l'eau, sauf dans les cas où les argiles contiennent des particules calcaires. Ces alluvions forment alors un genre de conglomérat. On a remarqué des cas où ces matériaux fins remplissent tellement les espaces vides des graviers, qu'ils deviennent assez imperméables, c'est-à-dire le contraire

.../...

de leur état initial.

On peut donc expliquer l'existence des matériaux fins dans les graviers de la manière suivante :

. La diminution de la vitesse du courant lors de la pénétration de l'eau dans les graviers permet aux matériaux fins de se déposer entre les espaces vides des matériaux grossiers.

### 4 - Pétrographie des alluvions des glacis

Au point de vue pétrographie, les alluvions des glacis sont très variées. Elles sont formées de différentes roches qui se trouvent dans les bassins versants et c'est pourquoi les types de matériaux déposés par des oueds varient d'un bassin à l'autre. Par exemple, dans les alluvions développées dans le piémont Sud de la chaîne d'Alborze (région de Téhéran), du fait du développement des tufs verts, les principaux matériaux sont formés par ces tufs.

Le pourcentage des matériaux fins est différent dans chaque région où se sont développées les alluvions des glacis. Ces variations ont une relation avec le développement du Miocène dans les bassins versants. Le Miocène existe dans la plus grande partie de l'Iran et il est formé de sédiments continentaux et de sédiments d'eaux peu profondes ou d'eaux de bassins fermés. Il est constitué de conglomérats, de grès friables peu cimentés, de marnes, d'argile, accompagnés par des lentilles de gypse et de sel. Ces sédiments se trouvent en général aux bordures des chaînes montagneuses et ils donnent des reliefs relativement bas. Quand ils se trouvent dans les bassins versants, on aura une plus grande sédimentation de matériaux fins.

### 5 - Morphologie des glacis d'accumulation

La morphologie des glacis d'accumulation est assez monotone. Ce sont des cônes de déjection des piémonts et de plaines de différentes grandeurs, aux bordures des zones montagneuses. Au point de vue lithologie et morphologie, nous distinguons trois zones.

#### a) Zône des cônes de déjection

Dans cette zone, les alluvions sont formées plutôt de matériaux gros-

.../...

siers angulaires. Ils se développent en forme de cônes avec une forte pente vers la plaine. Ils sont élevés de quelques mètres par rapport au sol voisin. La grandeur de ces cônes est liée directement à l'intensité et à l'action des torrents. La surface des cônes de déjection est creusée par des écoulements superficiels dont les profondeurs sont de l'ordre de quelques mètres, et leur profondeur maximum se situe aux sorties des zones montagneuses.

b) Zône de piémont

Cette zône s'est développée en forme de bande aux bordures des chaînes de montagnes. On peut la différencier par certaines caractéristiques morphologiques. Cette zône est située entre la plaine et les cônes de déjection. Elle a une pente faible du côté de la plaine, tandis qu'elle peut être forte au voisinage des cônes de déjection. Les sédiments sont formés de graviers, de cailloux et de matériaux fins comme le sable, le silt et l'argile. Cette zône est couverte normalement par une végétation de steppe. L'épaisseur des alluvions dans la partie médiane est maximum et dans plusieurs cas, de l'ordre de quelques centaines de mètres. Ces alluvions sont coupées par différents oueds dont la profondeur est de l'ordre de 1 ou 2 mètres.

c) Zône de plaine

Cette zône a une pente très douce (< 1 %). Elle est située entre les piémonts et les déserts. Les sédiments développés dans cette zône sont l'argile, l'argile sableuse et silteuse et le loess. Les eaux souterraines ne sont pas profondes et elles se trouvent à 5-10 mètres de profondeur. Cette zône est cultivable.

CHAPITRE III

III - HYDROGEOLOGIE DES ALLUVIONS DES GLACIS ET METHODE  
D'EXPLOITATION DES NAPPES AQUIFERES

1 - Les ghanates

2 - Les forages profonds

3 - Les puits semi-profonds

### III - HYDROGEOLOGIE DES ALLUVIONS DES GLACIS ET METHODE D'EXPLOITATION

#### DES NAPPES AQUIFERES

Les eaux emmagasinées dans les alluvions des glacis en Iran ont une importance capitale. Nous avons vu que le plateau de l'Iran a un climat aride et semi-aride, avec peu de pluie, environ 100-200 mm par an.

Les réseaux des rivières ne sont pas étendus, sauf quelques rivières ; les débits sont en général inférieurs à 5 m<sup>3</sup>/s ; elles deviennent de plus en plus maigres en été et sèchent. L'eau de ce genre de rivières vient des sources qui se trouvent en montagne, et ces eaux ne sont utilisées en été que pour les cultures des villages situés en bordure des montagnes. Les eaux des alluvions des glacis sont donc la principale source pour des villes et des villages d'Iran, surtout en Iran central où on exploitait (et où on exploite encore) ces eaux par les ghanates et les puits. Nous allons préciser leur mode de réalisation.

#### 1 - Les ghanates

Les ghanates sont maintenant le principal moyen d'exploitation des eaux pour les villes situées aux bordures des déserts comme Bafgh, Ardestan, Yazd, Kerman, Kachan, etc.

La longueur des ghanates est de quelques kilomètres sauf dans certains cas où elle atteint 20 à 30 kilomètres et même plus. La profondeur des puits des ghanates varie selon le niveau de la nappe phréatique ; dans plusieurs cas, cette profondeur est de l'ordre de 100 m environ.

La construction des ghanates est faite par des spécialistes. Ceux-ci choisissent un endroit favorable dans les cônes de déjection et ils commencent par faire un puits circulaire d'un diamètre de 70-80 cm. La vitesse de creusement de ces puits est de 2 à 3 m/jour dans les premiers jours. Lorsque le puits devient de plus en plus profond, on utilise un treuil spécial pour évacuer les déblais et l'on continue jusqu'au niveau de la nappe. En ce moment, les spécialistes, d'après le lieu d'utilisation de l'eau, déterminent la direction d'une galerie. La section des galeries est en général de

Les puits servent à évacuer les déblais de creusement de la galerie.  
 La Fig. 1 nous donne le schéma d'un ghanate. La distance entre les puits verticaux dans les endroits où la galerie est peu profonde est de l'ordre de 25 à 30 m, et dans les parties profondes, elle est de l'ordre de 100-150 m environ. Les ghanates sont divisés en deux parties : une partie où la galerie est sèche, une autre où la galerie est creusée à quelques mètres sous le niveau de la nappe phréatique.

Dans certains cas, la galerie se situe à 20-30 m sous la nappe phréatique et la partie des puits verticaux, située sous la nappe dans cette zone, est alors creusée de bas en haut. D'autre part, ceci présente l'avantage que, même en période de sécheresse, la galerie fournit toujours de l'eau.

Comme les ghanates étaient jusqu'à présent le seul moyen d'exploitation des eaux des alluvions des glacis et des eaux superficielles qui coulent normalement dans les zones montagneuses, toutes les grandes villes de l'Iran central sont construites aux bordures des plaines et à côté des zones montagneuses. Le débit et les minéralisations des eaux des ghanates varient selon les conditions des lieux des puits et selon la situation des ghanates. Mais en général, le débit est supérieur à 10-15 l/s et il y a des ghanates qui ont un débit de 50 à 60 l/s d'eau douce et agréable.

L'exploitation des eaux par les ghanates ne nécessite pas des investissements importants, sauf quand les ghanates ont besoin de certaines réparations dues aux torrents ou aux tremblements de terre, ou quand on a besoin de construire quelques puits supplémentaires pour avoir un débit constant, même dans les cas de sécheresse.

Les ghanates en Iran sont parfois très anciens. Ils ont été construits il y a très longtemps mais leurs eaux sont utilisées pendant neuf mois car les paysans ne cultivent rien en hiver. Par conséquent, durant 3 mois on perd de l'eau et d'autre part le ghanate fait baisser le niveau des nappes phréatiques, ce qui est très défavorable pour un pays comme l'Iran.

Entre les années 1950 et 1960, pendant 10 ans, il y a eu une grande sécheresse et le niveau d'eau des nappes phréatiques a baissé, ce qui a entraîné l'assèchement de plusieurs ghanates. A partir de cette époque, les gens ont creusé de nombreux puits pour compenser le manque d'eau. Ces puits

.../...

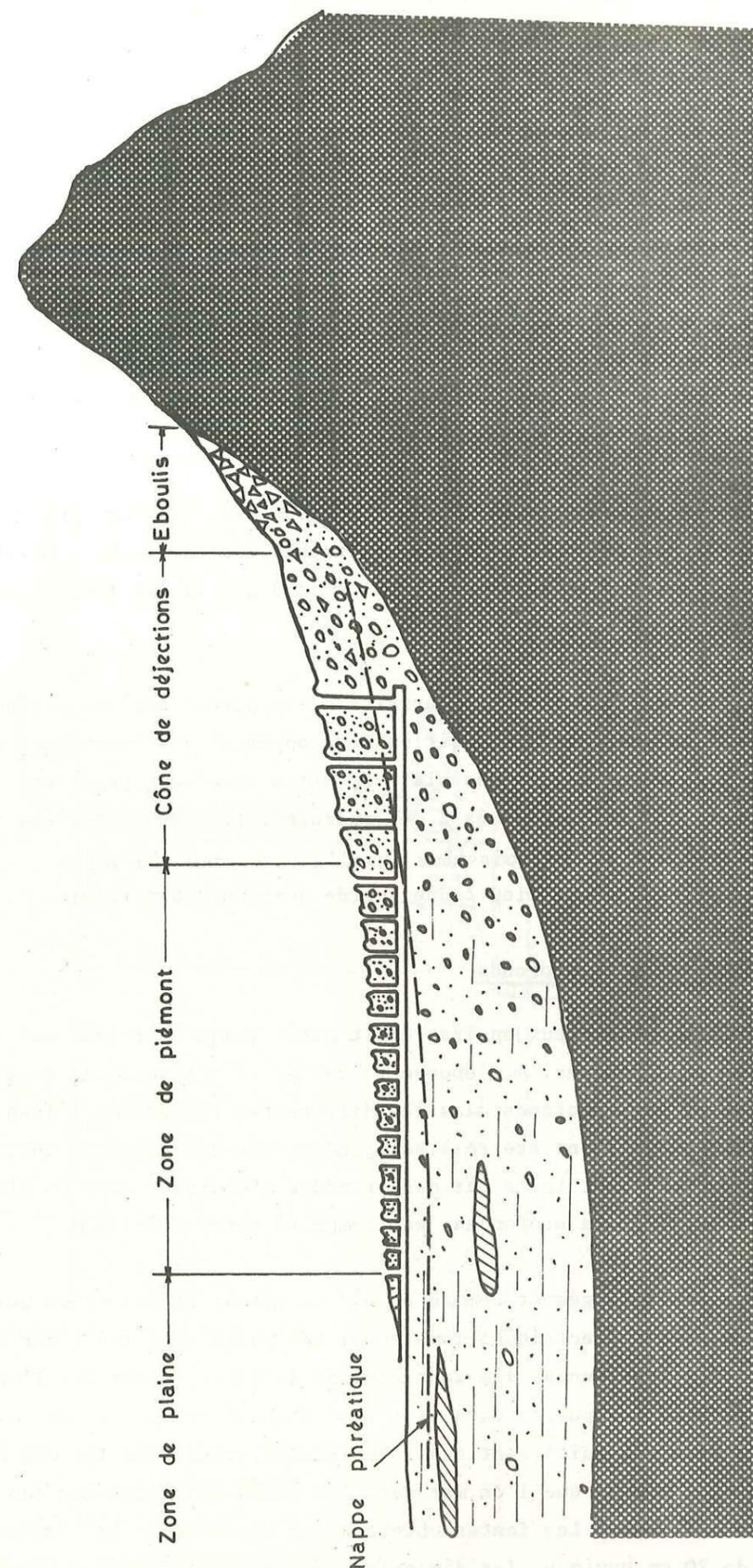


Schéma n° 1 - Coupe d'une Ghanate

sont surtout faits dans les piémonts et aux bordures des plaines où l'on exploitait ces eaux.

Au point de vue minéralogie, l'eau des alluvions de piémont est douce et dans la plupart des cas les eaux des puits ou des ghanates situés dans la partie supérieure de ces alluvions contiennent environ 500 mg/l de sel. Les eaux qui s'écoulent dans les alluvions de piémont vers la plaine accroissent leur teneur en sel et dans plusieurs cas les eaux des puits ou des ghanates sont salées dans les plaines.

Dans la partie centrale de l'Iran, les eaux des alluvions des glaciers sont plus salées et aux bords des déserts toutes les eaux sont complètement salées, c'est-à-dire qu'elles ont plus de 3 g/l de sel (région Bafgh-Ardestan, etc.)

Les nappes des alluvions des terrains quaternaires ont une surface libre, mais dans certains cas, du fait du développement des couches et des lentilles argileuses à côté des plaines, elles sont sous pression, et dans la plupart des puits creusés à ces endroits, le niveau de l'eau remonte de quelques mètres et parfois même jusqu'à la surface du sol ; cela donne lieu à une source avec un débit faible.

2 - Les forages profonds

L'exploitation des eaux en Iran était basée jusqu'à présent sur la construction des ghanates. A l'époque actuelle, il y a beaucoup de forages profonds et semi-profonds dans les différentes régions de l'Iran. La plupart de ces puits ont été réalisés pendant les 20 dernières années. Les puits profonds sont faits par des procédés mécaniques avec un diamètre de 25 à 40 cm et la profondeur est comprise entre 100-150 m.

La pompe est immergée et commandée par un moteur Diésel et on utilise moins de pompes électriques immergées. Les puits sont faits par des sociétés privées iraniennes. Ils sont équipés de tubes, après que l'on ait creusé et terminé les puits. On a fait tout d'abord des puits non tubés parce que les murs des puits sont assez résistants, sauf dans les cas extraordinaires. Les tuyaux que l'on met dans les puits sont perforés sur place avec un chalumeau. Les fentes obtenues ont une largeur de 5 mm et une longueur de 20 cm environ, les dimensions ne sont pas fixées à l'avance. Le

.../...

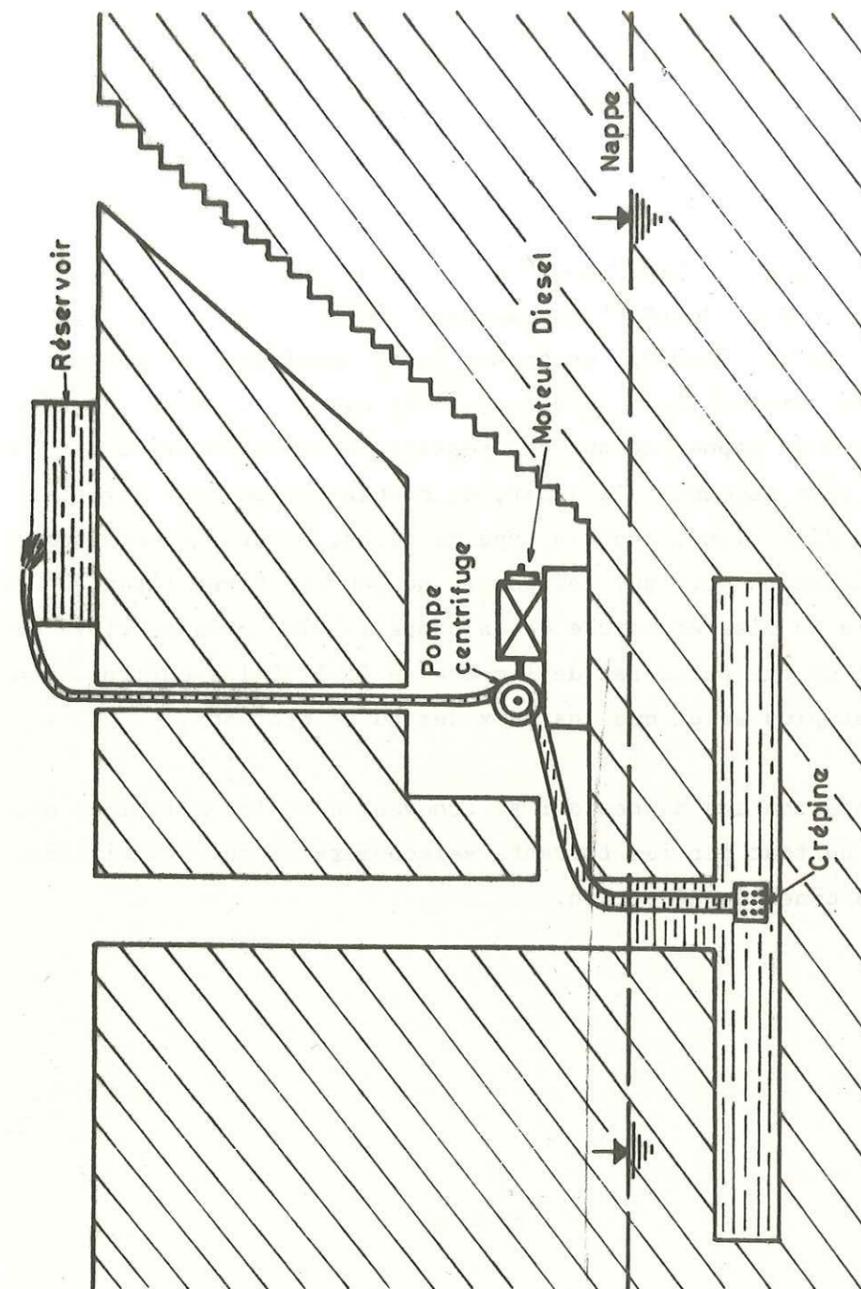


Schéma n° 2 - Coupe d'un puits semi-profond

pourcentage de la superficie perforée est inférieur généralement à 5 % et il est plutôt de l'ordre de 2 à 3 %, ce qui n'est pas assez. Les puits qui ont été faits dans les piémonts et le long des lits des oueds ont un débit de 40 à 50 l/s d'eau douce. Dans ce cas, les puits sont situés dans la plaine où le pourcentage d'argile est le plus élevé. Le débit diminue et la salinité de l'eau augmente (environ 1 g/l et quelquefois davantage).

### 3 - Les puits semi-profonds

Il existe un autre type de puits qu'on fait à la main. On creuse ces puits aux bords des piémonts et des plaines où le niveau de la nappe phréatique est bas (entre 10-20 m). On creuse jusqu'au niveau de la nappe phréatique. Après, en pompant l'eau du puits, on essaie de continuer le forage jusqu'à 5-6 m dans la nappe, ce qui est possible dans la majorité des cas. Généralement, pour augmenter le débit, on creuse une ou deux galeries dans différentes directions. Pour ce type de puits, on utilise des pompes centrifuges. Comme on sait que ces pompes ne peuvent tirer l'eau qu'à 6-8 m, on essaie la mise en marche de la pompe le plus près possible de la nappe. Le débit de ces puits est de l'ordre de 15 à 20 l/s environ. Généralement, l'eau est plus salée que les eaux des puits profonds.

L'alimentation des nappes qui se trouvent dans les alluvions des glacis se fait surtout par les torrents saisonniers et qui s'infiltrent dans la zone des cônes de déjection.

### CONCLUSIONS

Dans la première partie nous avons donné une description de la géographie physique de l'Iran en insistant sur les régions de glacis d'accumulation. Nous avons donné quelques explications sur le mécanisme de formation de ces glacis qui sont essentiellement constitués d'alluvions. Nous avons pu constater que le développement de ces alluvions torrentielles est un phénomène de régions montagneuses en climat aride et semi-aride. Nous avons également constaté que ces alluvions ont sensiblement les mêmes caractéristiques géotechniques partout. Par conséquent, les résultats des études effectuées dans la région d'Ispahan, et qui font l'objet de la deuxième partie, pourront être utilisés pour d'autres régions d'Iran à formation analogue.

DEUXIEME PARTIE

---

DETERMINATION DES PROPRIETES PHYSIQUES  
ET MECANQUES DES ALLUVIONS DES GLACIS  
DANS LA REGION ETUDIEE

---

CHAPITRE IV - CARACTERISTIQUES DE LA REGION ETUDIEE

CHAPITRE V - ESSAIS AU LABORATOIRE

CHAPITRE VI - ESSAIS IN SITU

CHAPITRE VII - SYNTHESE DES RESULTATS.  
PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANQUES  
DES ALLUVIONS DE LA PLAINE DE TABASSE

CONCLUSIONS

CHAPITRE IV

IV - CARACTERISTIQUES DE LA REGION ETUDIEE

1 - Introduction

2 - Situation géographique

3 - Géomorphologie

4 - Climat

5 - Histoire des études de géologie

6 - Géologie de la région

7 - Hydrogéologie de la région

#### IV - CARACTERISTIQUES DE LA REGION ETUDIEE

##### 1 - Introduction

Pour choisir un endroit convenable pour le plus grand ensemble actuel d'industries de l'Iran, c'est-à-dire l'usine sidérurgique, on a commencé les études dès la fin de l'été de 1965. On a fait une étude générale sur 11 sites possibles aux environs d'Ispahan dans un rayon de 50 km. Les études ont compris des sondages, des puits faits à la main de 0,75-0,85 m de diamètre et d'une profondeur de 5 à 10 m, des études visuelles, des coupes géologiques des puits, des études de granulométrie sur les puits et quelques essais.

D'après les résultats obtenus, on a choisi le site n° 7. Il est situé au N - W d'Ispahan. Après avoir choisi ce site, les experts soviétiques ont préparé un programme très détaillé pour étudier la géologie et l'hydrogéologie de la région. Ils ont prévu de réaliser ce programme en deux ans. Il comportait pratiquement tous les essais mécaniques et physiques in situ et au laboratoire. Les travaux ont été commencés par les experts Iraniens. Cette étude a duré de la fin de 1965 jusqu'à l'été 1967.

##### 2 - Situation géographique

La région étudiée est située au Nord-Ouest à environ 40 km d'Ispahan, entre 32°21' et 32°29' de latitude N et 51°13' et 51°27' de longitude E et la superficie de cette région est de 250 km<sup>2</sup>. Dans le Sud de la région coule la plus grande rivière de l'Iran central : le Zayendeh-Roud. Elle coule de l'Ouest vers l'Est. La région est entourée par des chaînes de montagnes à l'Ouest, au Nord et à l'Est. La zone intéressée est une plaine située entre ces montagnes et elle continue au N-W avec une pente très faible vers le lit du Zayendeh-Roud, situé au Sud.

.../...

### 3 - Géomorphologie

Dans la région étudiée, nous pouvons distinguer les unités morphologiques suivantes :

- a. zone montagneuse,
- b. zone de transition au pied des versants,
- c. glacis d'accumulation de la plaine de Tabasse,
- d. zone située en bordure de la rivière Zayendeh-Roud,
- e. zone du lit majeur et du lit actuel du Zayendeh-Roud.

Nous expliquons les caractéristiques des zones distinguées, ci-dessous :

#### a. Zone montagneuse

Cette zone entoure la région étudiée du côté Nord, à l'Est et à l'Ouest. L'altitude moyenne de ces montagnes est de 2000 à 2200 m. On peut remarquer que le sommet le plus élevé est le Josan et son altitude est de 2 396 m. Il est situé au Nord-Est de la région. Au Nord et à l'Est, ces montagnes sont formées de calcaires, de grès et de conglomérats (Crétacé inférieur) ; au Sud-Ouest, les montagnes sont formées de schistes et de grès (Jurassique).

#### b. Zone de transition au pied des versants

On peut remarquer deux éléments morphologiques dans cette zone :  
- Les éboulis et le glacis colluvial. Ils comportent des blocs, des débris et des matériaux fins qui restent en place ou, sous l'action de la gravité et de l'eau superficielle, se déplacent très peu ; ils couvrent la partie inférieure des montagnes. Ils ont une pente très forte de l'ordre de 15 à 25°. Ce genre de dépôt se rencontre généralement aux bordures des zones montagneuses et des vallées, avec quelques mètres d'épaisseur.

- Les dépôts des cônes de déjection. Ils sont formés de matériaux grossiers angulaires et ils se sont déplacés vers la plaine à cause du torrent, puis ils se sont sédimentés dans les ouvertures des vallées sous forme de cônes. Les épaisseurs varient beaucoup, en général elles atteignent quelques mètres. On trouve des développements maximum au Nord et au Nord-Est où l'on peut distinguer les plus grandes chaînes. Les cônes de déjection ont normalement une pente assez forte, de l'ordre de 5° environ, et ils sont plus élevés que la terre des sols environnants.

.../...

Les sédiments de ces deux zones sont formés naturellement des débris de roches qui se trouvent dans les montagnes. Dans la partie Sud-Ouest, ce sont des schistes, du grès, des conglomérats ; dans la partie Nord et Est, ce sont des fragments calcaires (90 %) avec des traces de grès et de conglomérats.

#### c. Glacis d'accumulation de la plaine de Tabasse

Au point de vue morphologie, la zone étudiée s'étend sur une partie de piémont et de plaine et notre description de la plaine de Tabasse se rapporte à l'ensemble de ces deux unités qui sont situées dans le centre de la région et dont la superficie est à peu près égale à 100 km<sup>2</sup>. On a choisi le centre de cette plaine pour les installations de l'usine, et par conséquent les alluvions développées dans le centre ont fait l'objet d'études géotechniques. L'altitude maximum de cette plaine est à peu près de 1 900 m dans la partie Nord, puis elle diminue lentement vers le lit du Zayendeh-Roud où l'altitude est d'environ 1 720 m. La pente de cette plaine dans la partie voisine des cônes de déjection, est de l'ordre de 2 à 3 % et dans la partie Sud, elle diminue jusqu'à 0,3 - 0,5 %.

La plaine est assez homogène, elle est coupée par plusieurs oueds dont les directions sont N-W et S-E, dont la largeur varie de 1 à 100 m, et la profondeur est de l'ordre de 0,5 m environ. Dans la partie Ouest, on peut remarquer des oueds anciens qui atteignent parfois une profondeur de 10 m. Cette partie de la plaine est tellement coupée par des oueds qu'il en a résulté une région de collines.

Les alluvions de la plaine de Tabasse sont formées par des graviers, des cailloux angulaires et semi arrondis, par du sable et des matériaux fins (15 à 25 %). Dans cette plaine, à différentes profondeurs, on peut remarquer des lentilles de conglomérats et d'argile. Environ 85 % de matériaux grossiers sont formés de calcaire. L'épaisseur de ces alluvions est d'environ 250 m dans le centre de la plaine et elle a été déterminée grâce aux sondages électriques.

Dans la partie Sud-Est de la région, il existe une autre plaine plus petite que la plaine de Tabasse, la plaine de Rise. Les dépôts d'argile y sont très développés. On a consacré cette plaine à l'évaporation des eaux industrielles de l'usine. Cette plaine a une superficie d'environ 20 km<sup>2</sup> et elle a les mêmes caractéristiques que la première plaine, sauf

.../...

que son altitude maximum est de 1 760 m dans la partie Nord et de 1 690 m dans la partie Sud et que les couches d'argile y sont beaucoup plus développées.

d. Zone située en bordure de la rivière Zayendeh-Roud

Cette zone a une largeur comprise entre 0,5 et 1,5 km, sa direction est Ouest-Est. Elle est formée de petites collines qui sont coupées par des oueds anciens de directions N-S, vers le Zayendeh-Roud. Les sédiments de cette zone sont formés alternativement par des apports de différents torrents. Les apports des rivières qui forment les terrasses comportent des séries de matériaux grossiers, cailloux, graviers arrondis qui, dans certains cas, sont cimentés en conglomérat. Ils sont formés de calcaire, de grès, de schiste, et on peut voir des matériaux volcaniques et métamorphiques. Dans les terrasses, on peut remarquer des lentilles d'argile et de sable qui se sont développées dans le Sud-Est, c'est-à-dire au Sud de la plaine de Rise. Ces sédiments sont recouverts alternativement par les apports des oueds dont nous avons déjà parlé.

La sédimentation faite par ces oueds ne présente pas beaucoup de différence avec celle qui s'est développée dans la plaine. Ils sont formés de graviers et de cailloux angulaires et semi-arrondis et d'argile. Le pourcentage des matériaux fins (silt, argile) de ces sédiments est plus élevé que celui de la plaine et dans certains cas, il est supérieur à 50 %, ce qui en fait le principal élément. Les matériaux grossiers sont d'origine calcaire et on note peu de grès.

e. Zone du lit majeur et du lit actuel du Zayendeh-Roud

Le Zayendeh-Roud est la plus grande rivière de l'Iran central. Il est formé de la réunion de quelques grandes sources qui se trouvent dans les montagnes Bakhteyari. Il coule pendant 150 km dans les régions montagneuses et il sort de ces régions à un endroit nommé Poli-Kalé, puis il se dirige vers la ville d'Ispahan qui est située au milieu d'une plaine, il coule ensuite vers le bassin salé et fermé de Gave-Khuni. Après l'endroit où se trouve Poli-Kalé, la rivière n'érode plus mais elle devient une rivière accumulatrice. Son débit avant la construction du barrage Chah-Abasse-Kabir qui se trouve à 60 km en amont, était de 20 à 200 m<sup>3</sup>/s selon les saisons. La largeur de son lit actuel est comprise entre 30 et 60 m dans la région étudiée.

LEGENDE

o Puits destinés à l'identification visuelle

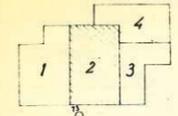
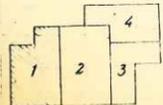
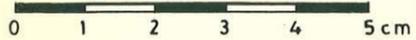
● Puits destinés aux prélèvements d'échantillons pour analyses en laboratoire et aux essais in situ



Lits d'écoulements périodiques

A Coupe géologique A

Echelle 1/42500



ification

vements

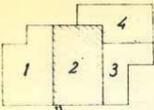
lyses

sais

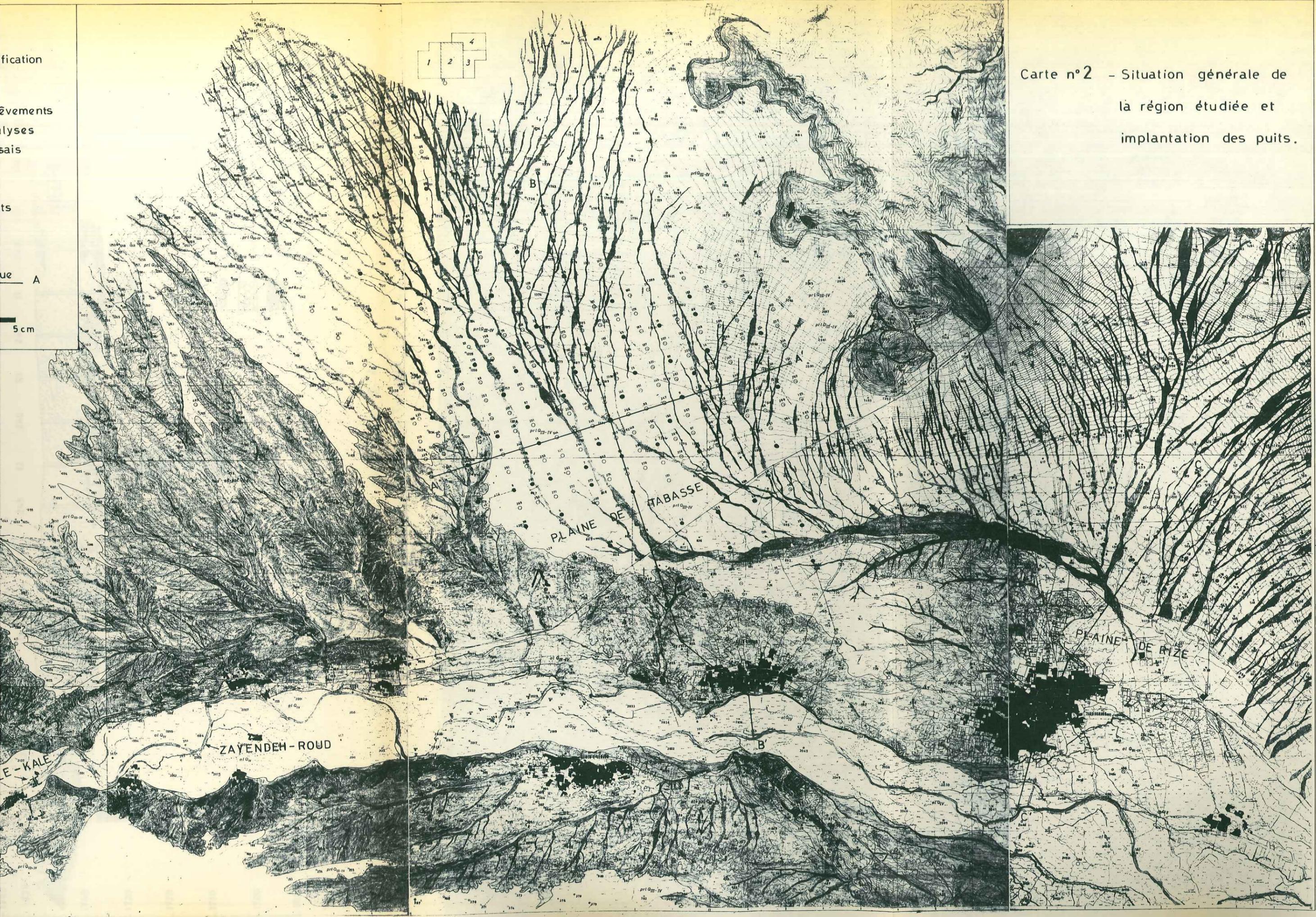
ts

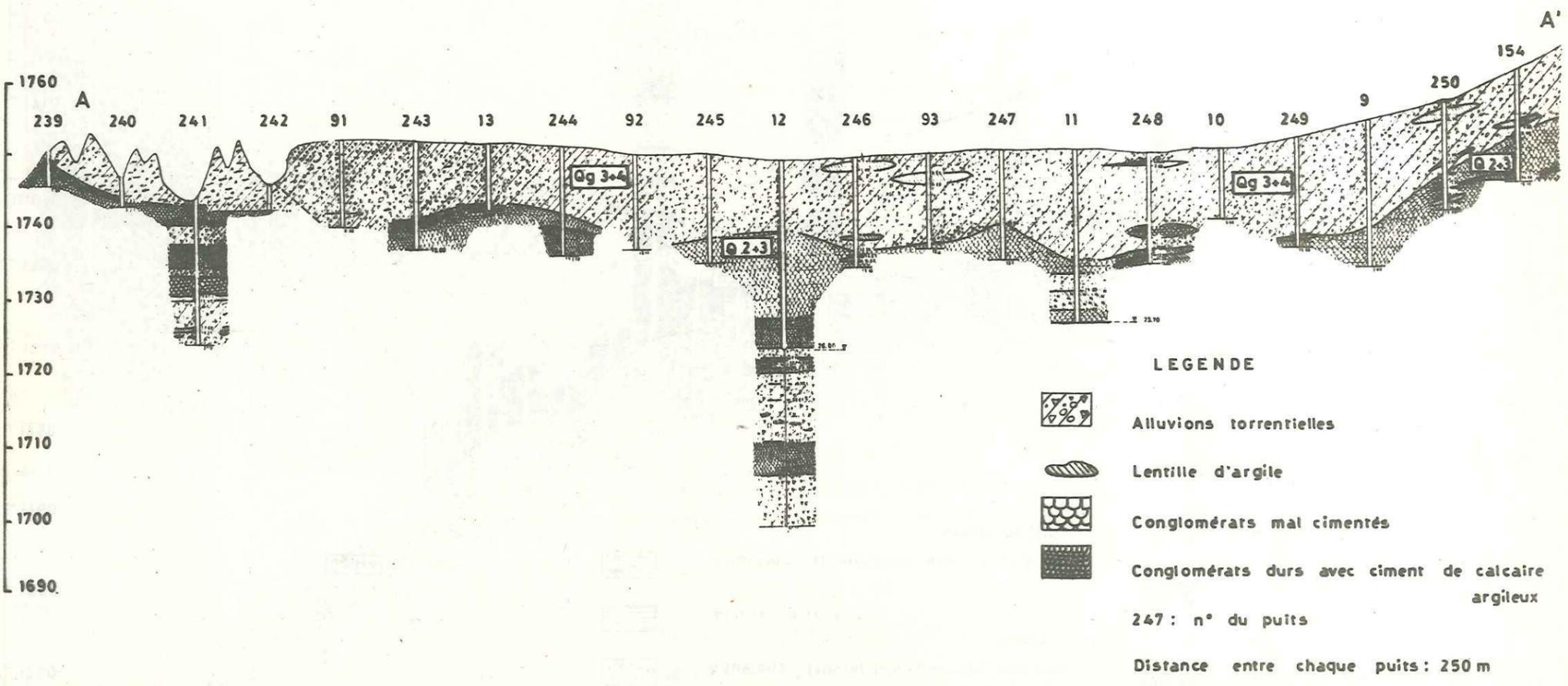
ue A

5 cm

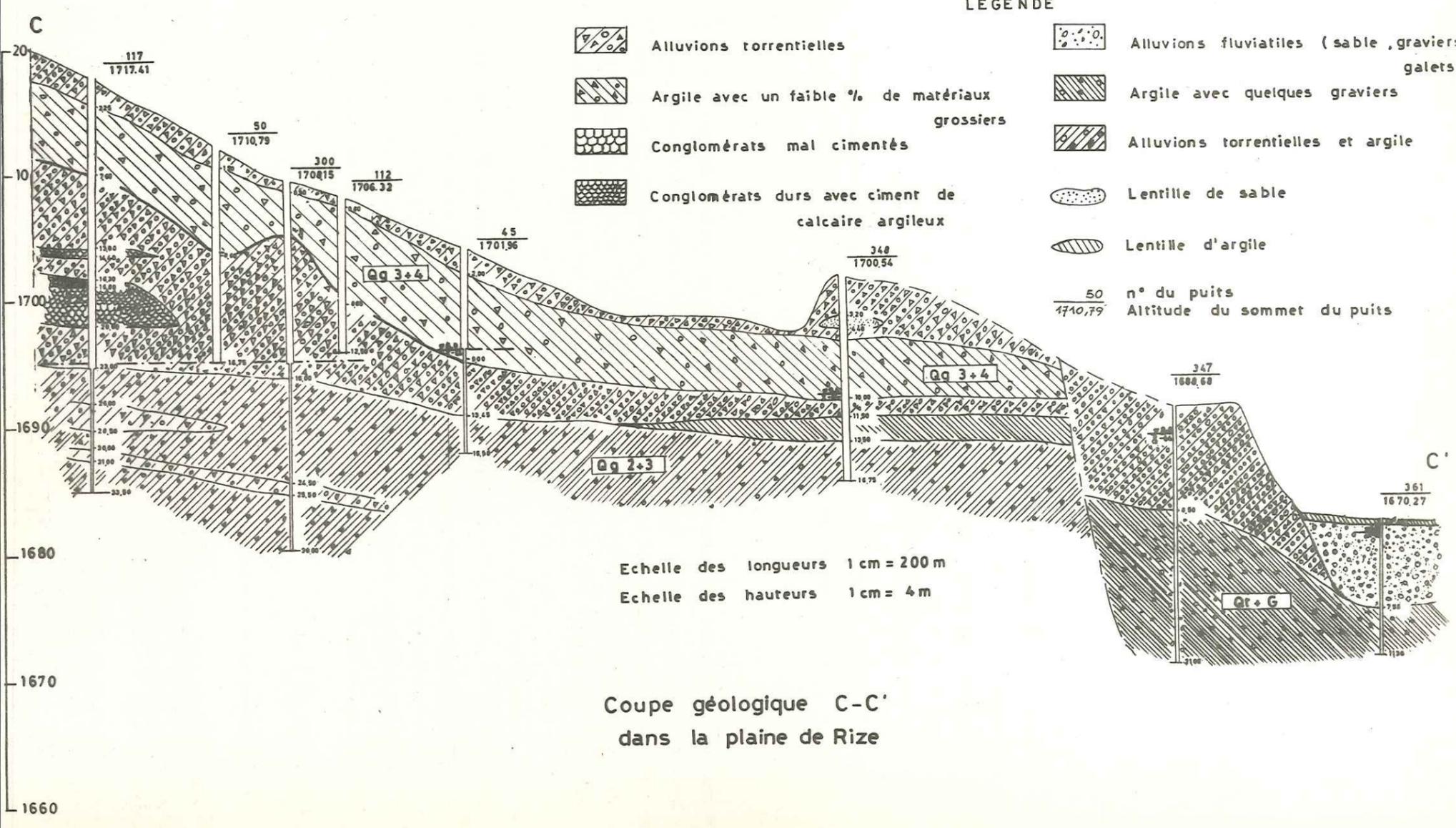
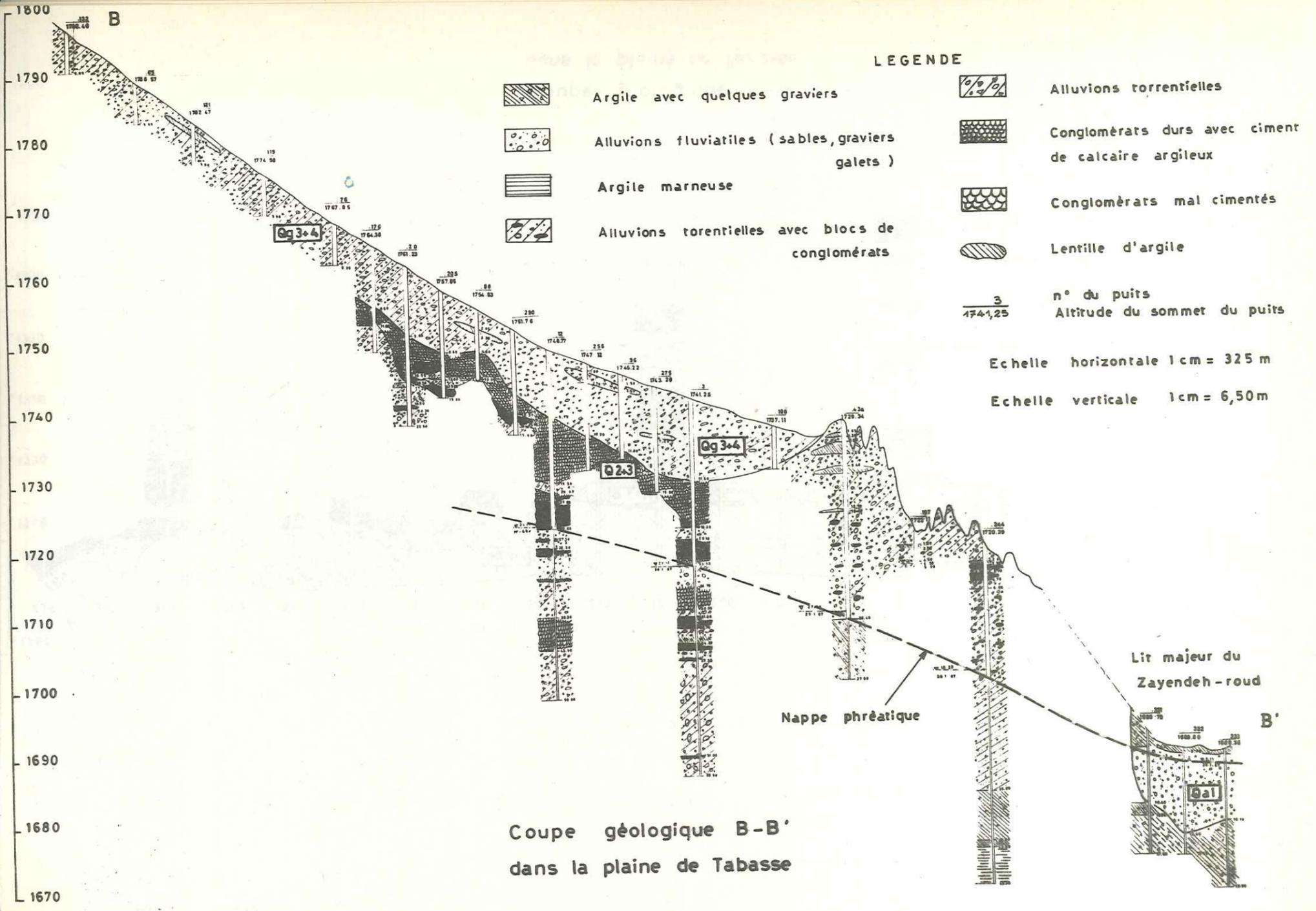


Carte n°2 - Situation générale de  
la région étudiée et  
implantation des puits.





Coupe géologique A-A'  
dans la plaine de Tabasse



Le lit majeur de la rivière a une direction W-E avec différentes largeurs. La largeur minimum se trouve aux environs de Poli-Kalé et du village Tcham-Kordan où la rivière coule au milieu de rochers et son maximum se trouve à l'Est du village de Rise. Mais, en général, cette largeur varie entre 0,5 et 1,5 km. Les dépôts qui se trouvent dans le lit majeur sont formés de graviers, de cailloux et d'un peu de sable. Les matériaux grossiers sont généralement formés de calcaire, de grès et on peut trouver quelques roches volcaniques et métamorphiques. L'épaisseur de ces sédiments d'après les informations données par les sondages est comprise entre 5 et 15 m selon les endroits. On peut remarquer au-dessous des matériaux grossiers des couches d'argile sableuse avec un faible pourcentage de matériaux grossiers. Ces informations ont été prises dans 30 sondages faits dans le lit majeur du Zayendeh-Roud, entre Poli - Kalé et la ville de Rise. L'épaisseur des couches argileuses n'est pas connue.

Dans cette zone, les paysans en couvrant les sédiments par une couche de 0,5 m à 1,5 m de terre arable, font des cultures de riz, etc.

#### 4 - Climat

Cette région, malgré sa situation entre la plaine et les zones montagneuses, a un climat aride et semi-aride, avec des précipitations comprises entre 50 et 150 mm par an. L'été est chaud et les températures maximum varient entre 34 et 41° ; l'hiver est assez froid avec une température minimum comprise entre -10 à -15°. Pendant 180 jours de l'année, le vent souffle avec une vitesse de 10-20 m/s, l'évaporation est de l'ordre de 2 à 4 mm/j en hiver et de 10 à 12 mm/j en été. L'humidité varie entre 25 % en été et 50 % en automne ; l'hiver, le Zayendeh-Roud a une influence notable sur le climat de cette région qu'il rend plus humide. Les précipitations commencent au milieu de l'automne jusqu'au milieu du printemps. A partir du mois de Mai jusqu'au mois d'Octobre, elles sont presque nulles. Quelquefois, en hiver, les précipitations tombent en forme de neige qui fond dans la plaine et demeure dans les montagnes.

.../...

Tableau n° 2 - Précipitations et températures mensuelles

Station Usine sidérurgique - Altitude : 1 768 m - Année 1967

M O I S	Températures					Nbre de jours de gelée	Pluviométrie		
	Moyenne			Absolue			Max. par jour (mm)	Total mensuel (mm)	Nbre de jours
	Max.	Min.	Moyenne	Max.	Min.				
Janvier	8,8	-3,5	2,6	17,2	-10,6	27	2,8	5,7	4
Février	9,3	-1,9	3,7	13,3	- 8,4	19	10,8	21,2	8
Mars	14,5	-0,9	6,8	19,5	- 5,2	18	0,4	0,9	1
Avril	19,0	4,5	11,7	25,5	- 3,6	4	5,5	8,9	2
Mai	26,2	11,1	18,6	31,5	3,9	0	2,2	4,4	2
Juin	31,9	14,7	23,3	35,6	9,7	0	0,0	0,0	0
Juillet	37,4	20,3	28,8	40,3	16,5	0	0,0	0,0	0
Août	34,7	16,6	25,6	36,5	13,1	0	0,0	0,0	0
Septembre	31,2	13,6	22,4	34,9	8,0	0	0,0	0,0	0
Octobre	23,8	7,5	15,6	28,2	2,6	0	0,1	0,1	1
Novembre	16,0	3,0	9,5	23,0	- 3,7	10	13,3	32,8	8
Décembre	10,1	-3,0	3,5	17,9	- 9,3	25	0,0	0,0	0
Annuelle	21,9	6,3	14,3	40,3	-10,6	103	13,3	74,0	26

5 - Histoire des études de géologie

L'histoire des études de géologie dans la région d'Ispahan, qui comporte aussi la zone intéressée, remonte à la fin du XIX<sup>e</sup> siècle et au commencement du XX<sup>e</sup>. Nous allons brièvement présenter les géologues qui ont fait des études dans cette région. Ces études ont été faites par des experts étrangers, mais elles n'ont pas été approfondies. On peut citer les études suivantes :

STALE a étudié les formations des environs d'Ispahan entre 1897 et 1911 et il a déterminé l'âge du Crétacé pour cette formation.

RICHARDSON, LESS, BLOCH ont fait des études en 1929,

GRAY, KUHN et JENNIAGE en 1933,

CLAPP, SCHENCK et FURON, entre 1940 et 1941.

Ces géologues qui ont travaillé à Ispahan et dans ses environs, en déterminant des fossiles (Ammonites et Orbitolines), ont pu donner l'âge du Crétacé et Jurassique à ces formations, et ils ont pu établir une classification stratigraphique.

Après la deuxième guerre mondiale, les experts étrangers ont continué les études dans cette région, on peut citer parmi eux HUBNER, SHTOKLIN et SODER. SODER, à la demande de la Compagnie Pétrolière NIOC, a établi une carte géologique à l'échelle 1/500 000 de cette région. Dans cette carte qui comporte la région qui nous intéresse, les formations des zones montagneuses sont indiquées comme crétacées et jurassiques.

Parmi les experts Iraniens, on peut citer DEHGAN qui a étudié cette région surtout en amont de l'endroit nommé Poli-Kalé pour la construction d'un barrage sur le Zayendeh-Roud, puis les experts du Service National de Géologie DAVOUD-ZADEH, TATAVOUSIAN, MEHRNAUCHE, TEHERANY, SEID-EMAMI et SAMADIAN qui y ont travaillé pendant les années 1968-1973. ZAHEDI a fait les dernières études dans cette région et il a établi une carte à l'échelle 1/100000 mais qui n'est pas terminée. Enfin, l'équipe des géologues du Service National Sidérurgique a fait, entre les années 1966-1967, les études qui comportent des levés de cartes géologiques à l'échelle 1/10000 des zones dont nous avons déjà parlé et des études très précises des alluvions des terrains quaternaires.

## 6 - Géologie de la région

Les principales formations datent du Jurassique et du Crétacé.

### a. Jurassique

Les formations les plus anciennes de la région sont du Jurassique inférieur (plus précisément Toarcien). Elles ont une épaisseur d'environ 900 m elles se sont développées dans la partie S - W et forment différentes montagnes. Ce sont des alternances de schistes et de grès gris foncé, et dans certains cas des grès verts. La base du Jurassique commence par des couches épaisses de schistes et par de fines couches de grès et pelites. Mais au fur et à mesure que l'on monte dans la série, les schistes disparaissent. Il y a environ 4 alternances de cette sorte. Parmi les couches de schistes on a trouvé des ammonites et au milieu des couches de grès on a remarqué des dykes andésitiques.

Ces formations ont un pendage général de 25 à 35° et une direction N-W - S-E.

### b. Crétacé

Les formations crétacées de la région sont bien développées, elles sont formées par les montagnes au N-W, N-E. En général, elles comportent des calcaires, du grès et par endroits du conglomérat. L'épaisseur visible de ces formations est de 800 m environ, avec un pendage faible de 2 à 3° jusqu'à une vingtaine de degrés et dont la direction est N-W - S-E.

Dans la partie Ouest, ces formations reposent en discordance sur les formations jurassiques. Ce sont des formations du Crétacé inférieur (Barrémien, Aptien).

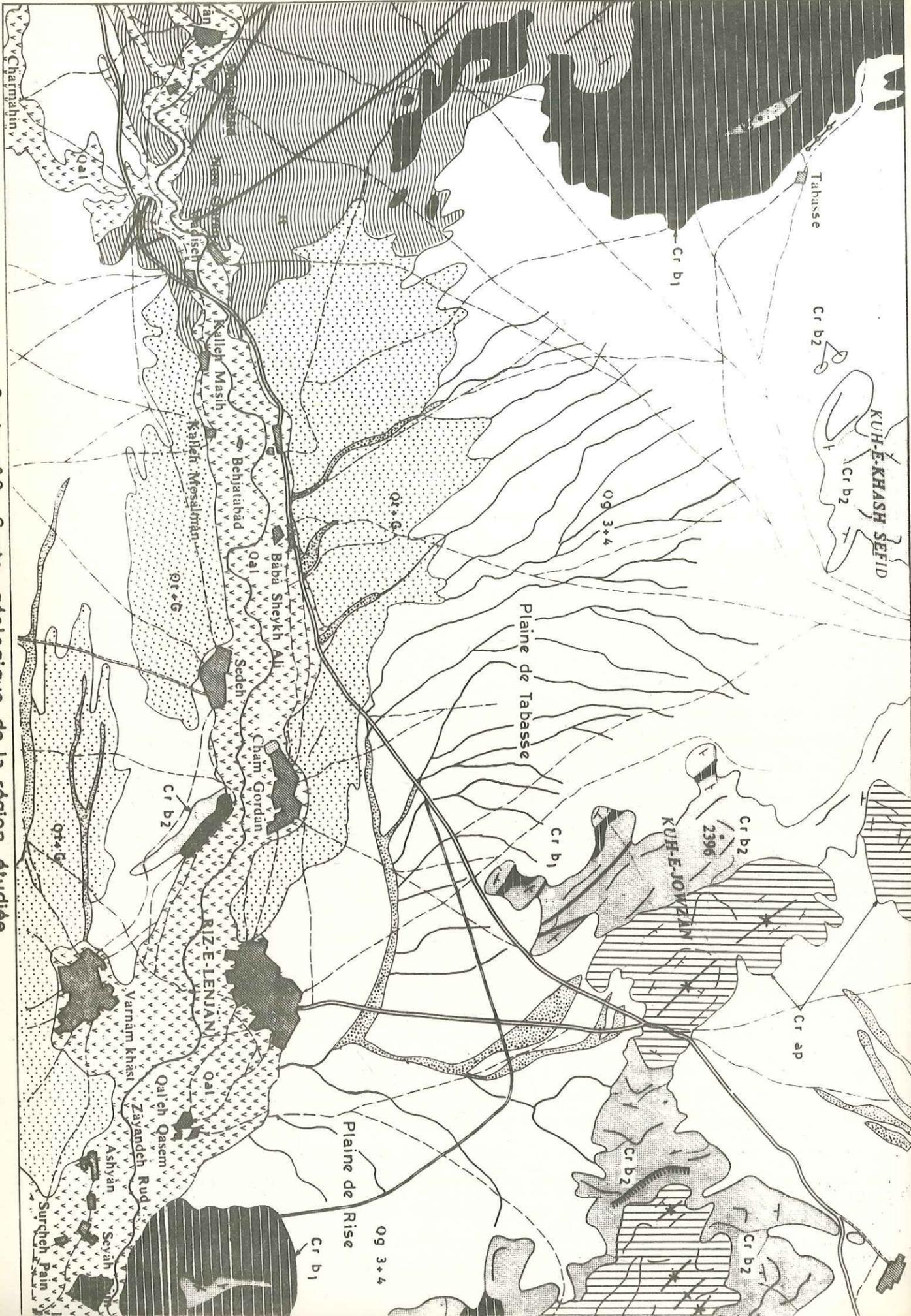
Au point de vue stratigraphie et lithologie, nous divisons ces formations en 4 horizons :

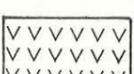
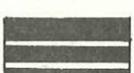
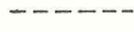
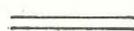
#### - Conglomérat de base

Les formations du Crétacé sont formées à la base par un conglomérat gris qu'on peut trouver au Nord-Ouest et à côté du village de Tabasse, en discordance sur les schistes jurassiques. Il est formé de cailloux arrondis avec un ciment calcaire assez compact. Les matériaux de ce conglomérat sont formés par des roches métamorphiques. On observe très peu de roches volcaniques, de calcaires ou de grès.

LEGENDE de la CARTE GEOLOGIQUE

Carte n°3 - Carte géologique de la région étudiée



QUATERNAIRE		Q4	Alluvions récentes des oueds
		Qg 3+4	Glacis d'accumulation (graviers, cailloux semi-arrondis et matériaux fins)
		Qt + G	Zone collinaire (apports alternés du Zayendeh-Roud et des oueds).
		Qal	Alluvions récentes et première terrasse du Zayendeh-Roud (graviers et cailloux recouverts de terre arable).
CRETACE		Crap	Aptien : calcaires marneux gris clair en minces bancs.
		Cr b2	Barrémien supérieur : calcaire gris foncé compact.
		Cr b1	Barrémien inférieur : conglomérats, grès, pelites marrons et rouges. Schistes et calcaires marneux gris.
JURASSIQUE		Jt	Toarcien : alternances de schistes et de grès gris et vert foncé.
		J	Dykes andésitiques volcaniques
			Oueds
			Routes secondaires
			Routes principales

Echelle : 1/88000

(D'après la carte du Service Géologique d'Iran)

- Barrémien inférieur

Sur ce conglomérat reposent des grès dont les grains sont très gros à la base, puis très fins, avec des pelites dans la partie supérieure. Les grains sont formés de quartz et sont cimentés par un ciment calcaire cristallisé assez compact. Ils sont marrons et rouges (ceci est dû à la présence d'oxyde de fer). Dans la partie supérieure de ces grès, on voit des marnes sableuses qui passent progressivement aux schistes calcaires et aux calcaires marneux. Les schistes ont une couleur gris verdâtre avec une stratification en bancs très minces. Les calcaires ont une couleur grise, avec une stratification fine et moyenne. Ils ont une faible résistance à l'érosion en surface. Dans ces formations on peut trouver de nombreux fossiles Trigonie et Orbitoline et aussi des macro-fossiles comme les brachropodes et les lamellibranches. Par conséquent, on a donné l'âge du Barrémien à ces formations. L'épaisseur de cet horizon varie selon les endroits de 50 à 150 m. L'épaisseur des couches de schistes calcaires et de calcaires marneux est de 80 m.

- Barrémien supérieur

Sur les formations précédentes repose une série calcaire avec des rognons de silex pas complètement cristallisé, gris foncé, compact, avec une stratification épaisse qui s'est développée dans la région et forme les sommets principaux de la région. Dans certains endroits, les calcaires sont légèrement karstiques. D'après les fossiles Orbitolines et Ammonites qu'on a trouvés dans ces calcaires, on a daté ces calcaires du Barrémien supérieur. L'épaisseur de ces calcaires est de 250 m.

- Aptien

L'horizon supérieur du Crétacé est formé par des calcaires marneux, avec une stratification en bancs assez minces et une couleur gris clair. L'épaisseur d'ensemble de cet horizon dans la région est de 300 m. D'après les fossiles (Orbitolines et Ammonites) on a déterminé l'âge Aptien. Les séries géologiques développées dans la région étudiée sont représentées sur les cartes géologiques.

.../...

7 - Hydrogéologie de la région

Nous avons fait des études hydrogéologiques pour trois raisons principales :

1. Déterminer les caractéristiques hydrogéologiques des couches supérieures de la nappe phréatique (plaines de Tabasse et de Rise).
2. Déterminer le coefficient de perméabilité de la nappe phréatique (plaines de Tabasse et de Rise).
3. Etudier les possibilités d'alimentation de l'usine par les eaux souterraines du lit majeur du Zayendeh-Roud.

Pour ces études on a creusé de nombreux puits dans les plaines de Tabasse et de Rise, manuellement au-dessus de la nappe phréatique, et mécaniquement dans la nappe. Dans le lit majeur du Zayendeh-Roud, tous les puits ont été creusés mécaniquement. Pour ces études, on a utilisé la méthode classique de pompage et d'injection dans la nappe phréatique et la méthode du Professeur BOULDROF pour les couches supérieures de la nappe phréatique.

Nous allons étudier brièvement les conditions et les caractéristiques hydrogéologiques des nappes aquifères développées dans la région, et on discutera des caractéristiques hydrogéologiques des sédiments situés au-dessus des nappes aquifères.

a) Nappe correspondant au lit majeur du Zayendeh-Roud

Le lit majeur du Zayendeh-Roud a une direction W-E et il est situé dans le Sud de la région. Il a une largeur qui varie entre 500 et 1500 m, il est formé de graviers et de cailloux arrondis avec un faible pourcentage de sable. Ce type d'alluvions a une épaisseur variable de 5 à 15 m ; au-dessous, on trouve des couches argileuses imperméables. On a fait 35 puits dans le lit majeur du Zayendeh-Roud et on a fait des essais de pompage au moins sur la moitié des puits.

Ces puits ont une profondeur de 10-15 m et le niveau d'eau se trouve entre 0,5 et 2,5 m selon les situations des puits. Cette nappe est en relation hydraulique avec la rivière. Ceci est prouvé par les essais de pompage effectués dans la nappe. D'autre part, cette nappe est alimentée généralement par l'eau des alluvions de la plaine.

.../...

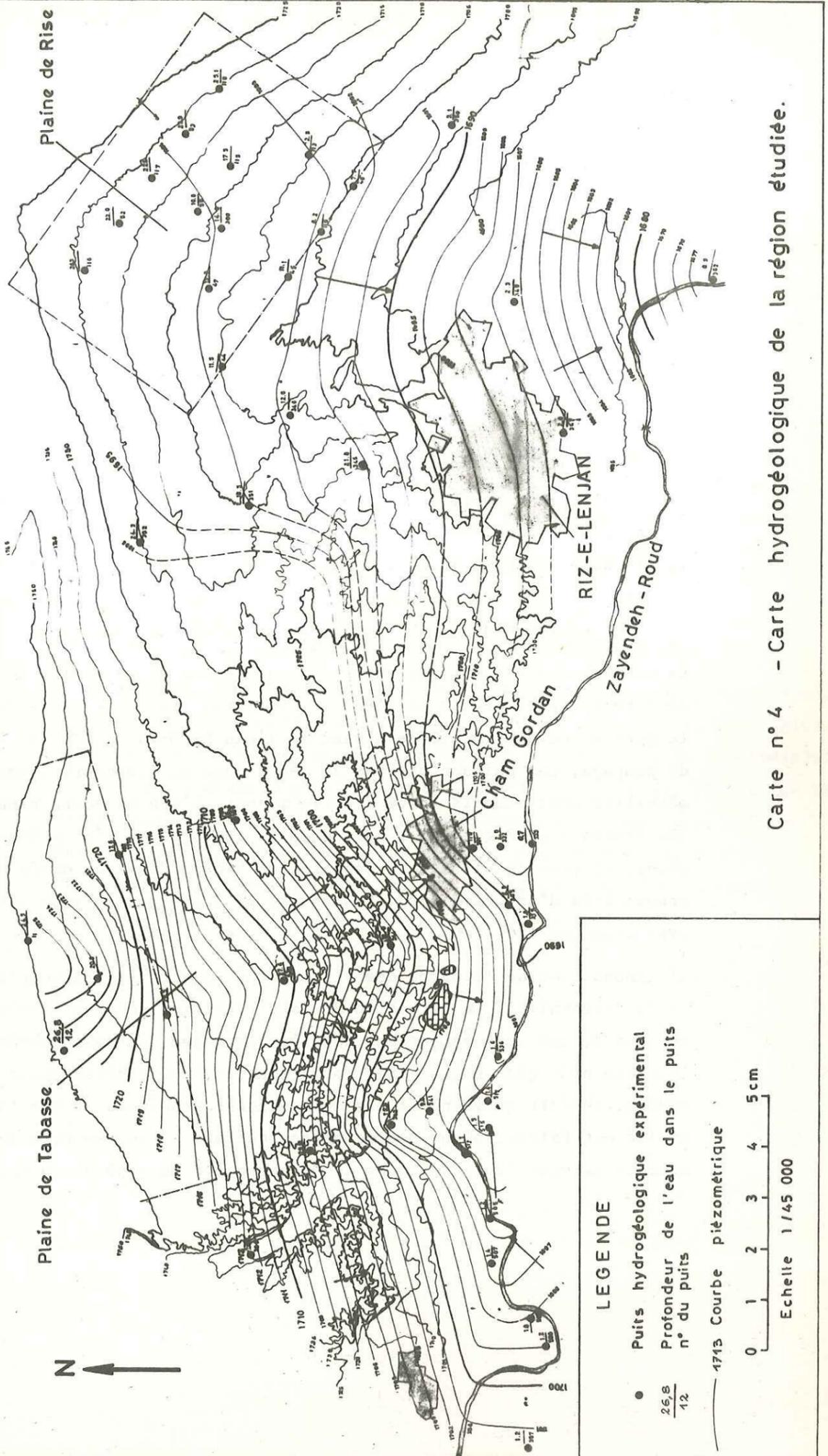


Tableau 3 - ANALYSE CHIMIQUE de l'EAU

N° du puits	Débit (m³/h)	Température (°C)	Anions (mg/l)			Cations mg/litre				Résidu sec (mg/l)	PH	Situation des puits
			Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>			
3	-	18,0	681	1358	234	118	27	1000	1,0	3419	-	Sud de la plaine de Tabasse
12	-	19,0	288	3497	166	635	121	980	5,0	5692	-	"
106	-	17,0	2602	2465	126	488	91	2140	4,0	7916	-	"
46	10 404	-	2574	1985	110	622	152	1670	5,5	7948	7,3	Plaine de Rize
44	3 240	-	2593	1079	128	474	125	1400	4,0	6422	7,5	"
118	6 300	20,0	4590	1440	69	-	-	-	-	10160	7,1	"
116	5 436	20,5	1720	2607	117	-	-	-	-	6926	7,0	"
300	1 872	19,0	1220	1979	140	-	-	-	-	5080	7,5	"
352	7 764	19,8	1610	3845	126	-	-	-	-	8644	7,4	Région située à côté du Zayendeh-Roud
343	6 768	19,8	2260	1568	117	-	-	-	-	6600	7,4	"
350	5 400	19,8	1120	1505	139	-	-	-	-	4368	7,6	"
351	6 048	19,3	1390	2145	141	-	-	-	-	5478	7,5	"
352	7 764	19,8	1610	3845	126	-	-	-	-	8644	7,4	"
345	4 428	18,5	1610	2181	108	-	-	-	-	6112	7,4	"
341	6 660	17,8	1417	1319	190	480	121	850	3,4	4820	7,2	"
346	6 048	23,0	2389	1609	119	740	125	1270	3,9	8770	7,5	"
349	13 608	15,0	352	402	159	152	245	220	3,3	1388	7,4	"
318	16 800	-	22	21	298	80	13	20	0,7	437	7,8	Lit majeur du Zayendeh-Roud
333	88 700	24,0	263	-	-	185	22	180	4,0	654	8,0	"
353	70 900	-	25	21	266	72	12	22	0,9	420	7,7	"
354	68 100	-	22	22	244	55	17	24	1,4	387	8,0	"
362	74 400	21,0	118	95	237	89	24	75	1,2	661	7,6	"

C'est pour cette raison que dans les puits faits aux bords du lit majeur on trouve plus de sel que dans ceux faits à côté de la rivière, les eaux des alluvions de la plaine étant salées. La teneur en sel est comprise entre 0,5 g et 1 g/l et est convenable pour la consommation de l'eau. On a étudié les conditions hydrogéologiques de cette nappe pour la possibilité de fournir de l'eau à l'ensemble sidérurgique.

Les essais de pompage montrent que cette nappe est très aquifère, elle a un coefficient de perméabilité de 200-1200 m/jour. On a donc mis à exécution le projet de fournir à l'usine de l'eau provenant directement des rivières.

b) Nappe des alluvions de la plaine

Ces alluvions sont formées de graviers et de cailloux semi-arrondis et angulaires dans lesquels les espaces vides sont remplis par de l'argile, du silt et du sable dont le pourcentage est de l'ordre de 35 % au Nord de la plaine et de 50 % dans la partie inférieure. Dans certains cas, il est supérieur à 50 %, d'où une perméabilité diminuée.

La plupart des puits faits au Nord et au centre de la Plaine de Tabasse sont secs car le niveau de l'eau est très bas, mais les puits faits dans la partie Sud ont touché le niveau de l'eau à 20-25 m. D'après les essais de pompage, ces puits n'ont pas un débit fort et les coefficients de perméabilité sont compris entre 2 et 15 m/jour. L'eau de cette nappe est salée (entre 2 et 7 g/litre), mais dans la zone N-W où l'on a fait des ghanates, près du village de Tabasse, on trouve de l'eau douce car on se trouve près d'un grand oued. Le tableau n° 3 montre les résultats de l'analyse chimique de l'eau.

L'alimentation de la nappe des alluvions de plaine est faite par les torrents saisonniers. La direction de la circulation des eaux souterraines est N-S et ces eaux se jettent dans le lit majeur du Zayendeh-Roud (voir la carte hydrogéologique). Les formations rocheuses développées dans la région, du fait qu'il n'y a pas de montagnes enneigées et que la perméabilité est faible, n'ont pas de nappe aquifère et on remarque que les sources situées dans ces zones de montagne ont en général un faible débit.

.../...

c) Caractéristiques hydrogéologiques des couches supérieures de la nappe

Pour étudier le coefficient de perméabilité de la couche supérieure de la nappe phréatique, on a fait 98 essais dans les plaines de Tabasse et de Rise, à une profondeur comprise entre 0,3 et 11 m. La méthode utilisée sera expliquée dans le Chapitre VI "Essais in situ".

Les résultats montrent que ces alluvions qui comportent des matériaux grossiers ont un coefficient de perméabilité assez faible et variable. Dans le tableau n° 4, on a indiqué les moyennes des coefficients de perméabilité dans différents endroits, pour la couche supérieure (0,30-1,5 m) et en profondeur. Les résultats nous montrent que le coefficient de perméabilité est fort dans la couche supérieure des alluvions. A partir d'une profondeur d'environ 1,5 m, il y a un brusque changement de perméabilité qui se régularise lentement en profondeur. On s'est aperçu que dans les deux plaines étudiées (Tabasse et Rise) le coefficient de perméabilité augmentait du piémont vers la plaine, ce qui n'est pas normal car le pourcentage des matériaux grossiers diminue vers la plaine.

On a expliqué cela par le fait que les espaces vides situés dans les matériaux grossiers étaient tous remplis par les matériaux fins, et en plus la compacité était très élevée donc la couche devenait très imperméable. Les cartes "indices de vide" que nous avons faites dans la plaine de Tabasse nous montrent également l'augmentation de cet indice du piémont vers la plaine. On a constaté que ce phénomène se produisait dans les couches supérieures, et que dans les couches inférieures les changements de perméabilité vers la plaine étaient très faibles.

Tableau n° 4 - Variations du coefficient de perméabilité dans la couche supérieure du sol (0,3 - 1,5 m) dans les plaines de Tabasse et de Rise

Nombre d'essais	Altitude des points	K Moyenne m/jour	Emplacement des essais
26	1699.7 - 1709.0	1,030	Sud de la plaine de Rise
23	1710.8 - 1718.9	0,765	Nord de la plaine de Rise
15	1722.2 - 1744.2	0,568	Sud de la plaine de Tabasse
15	1745.2 - 1749.0	0,462	Centre de la plaine de Tabasse
11	1763.5 - 1794.6	0,112	Nord de la plaine de Tabasse

Changement du coefficient de perméabilité avec la profondeur

Nombre d'essais	Profondeur (m)	K Moyenne m/jour	Emplacement des essais
13	0,8 - 1,5	2,013	Plaine de Rise
14	1,5 - 3,0	0,431	" "
9	3,0 - 4,0	0,418	" "
15	> - 4,0	0,380	" "
13	0,3 - 1,5	0,580	Plaine de Tabasse
14	1,5 - 3,0	0,375	" "
9	3,0 - 4,0	0,345	" "
7	> - 4,0	0,248	" "

CHAPITRE V

V - ESSAIS AU LABORATOIRE

1 - Granulométrie

2 - Teneur en eau

3 - Plasticité

4 - Poids spécifique, Poids volumique sec et Poids volumique in situ, Indice des vides, Porosité et Degré de saturation

5 - Essais Los Angelès

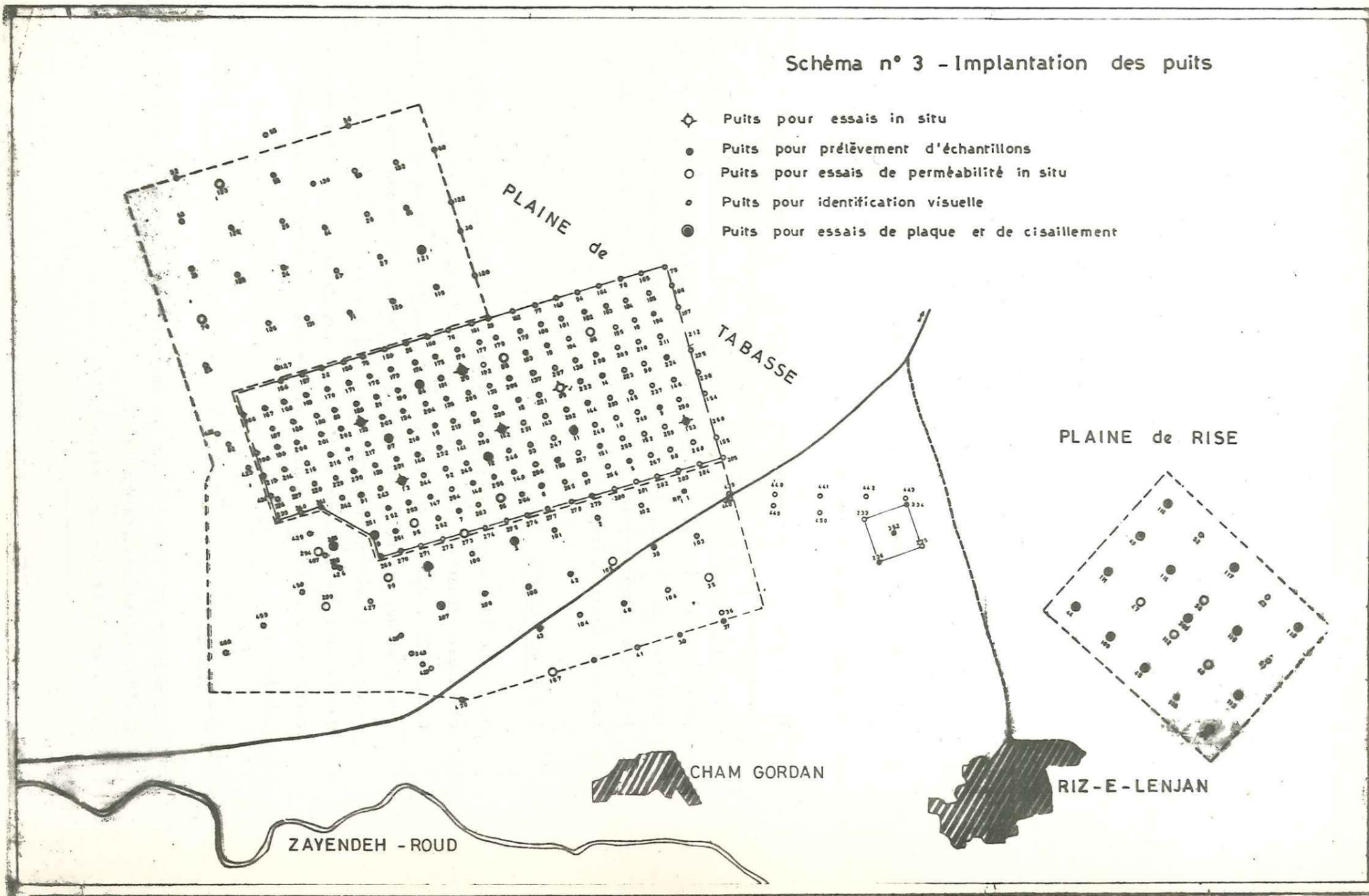
6 - Détermination de la résistance du conglomérat à la compression simple

7 - Détermination de l'angle de talus naturel des graviers

8 - Essais de cisaillement

Schéma n° 3 - Implantation des puits

- ◇ Puits pour essais in situ
- Puits pour prélèvement d'échantillons
- Puits pour essais de perméabilité in situ
- Puits pour identification visuelle
- Puits pour essais de plaque et de cisaillement



V - ESSAIS AU LABORATOIRE

Pour obtenir les valeurs moyennes des caractéristiques physiques et mécaniques des sols, nous avons fait de nombreux essais en laboratoire. Pour prendre les échantillons nécessaires aux essais, on a creusé à la main des puits circulaires d'un diamètre de 80 cm environ. Ces puits ont été creusés jusqu'à 15-20 m de profondeur et parfois plus dans des cas particuliers. Dans le lit majeur du Zayendeh-Roud et sous le niveau d'eau, nous avons creusé des puits mécaniquement et on a retiré les échantillons à la soupape. On a prélevé des échantillons remaniés ou non remaniés de dimensions 30 x 30 x 30 cm. Normalement, on prenait un échantillon tous les mètres.

La carte n° 2 et le schéma n° 3 montrent la situation des puits et les tableaux n° 5, 6 et 7 montrent les résultats obtenus lors des essais faits au laboratoire. Pour certains échantillons nous avons réalisé les essais séparément sur la fraction grossière > 2 mm et sur la fraction fine < 2 mm, en plus des essais sur l'ensemble de l'échantillon. Nous allons expliquer en bref les méthodes de tous les essais faits en laboratoire.

1 - Granulométrie

On a fait 1200 essais de granulométrie au moyen des tamis Standard anglais qui permettent la division des matériaux grossiers de dimensions : 0,1 ; 0,25 ; 0,5 ; 1 ; 2 ; 5 ; 10 et plus que 10 mm et des matériaux plus fins que 0,1 mm ; 0,05 ; 0,01 ; 0,005 et moins que 0,005 mm, déterminés par la sédimentométrie. Les résultats des granulométries sont donnés dans les tableaux n° 5 et 6 et les cartes n° 5 et 6 nous montrent les variations granulométriques des alluvions de la plaine de Tabasse.

2 - Teneur en eau

Les mesures de teneur en eau ont été faites classiquement après passage à l'étuve. Les résultats montrent que la teneur en eau varie de 2 à 15 % pour l'ensemble des échantillons. Les résultats sont inscrits dans les

.../...

Granulométrie

N° du puits	Profondeur m.	cailloux	gravier		sable					silt		argile
		>10 m.m.	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	<0,005
4	1,0-2,0	24	9	14	9	6	5	1	8	6	8	10
	2,0-3,0	23	11	12	13	14	7	3	11	2	1	3
	3,0-4,0	24	13	22	10	9	5	1	10	3	1	2
	4,0-5,0	21	15	21	10	10	6	2	7	4	1	3
	5,0-6,0	16	14	26	12	9	8	2	7	2	1	3
	6,0-7,0	24	18	17	5	6	3	4	8	6	1	8
	7,0-8,0	32	17	14	6	7	5	2	8	3	2	4
	8,0-9,0	53	13	11	3	2	2	2	7	3	1	4
	9,0-10,0	46	18	12	4	3	1	1	8	3	1	3
11	1,0-1,5	20	13	14	5	4	3	2	10	8	5	16
	2,0-3,0	26	16	13	4	7	5	1	7	9	4	8
	3,0-4,2	18	13	14	3	4	8	4	15	8	3	10
	4,2-5,2	36	9	16	5	6	3	6	7	6	2	4
	5,2-6,6	31	13	12	4	5	2	2	18	6	1	6
	6,6-7,6	40	16	15	2	2	4	2	7	5	2	5
	7,6-8,8	35	14	8	4	3	2	2	10	5	2	15
	8,8-9,9	34	17	15	5	4	3	2	12	4	1	3
	9,9-11,0	58	13	8	3	2	2	2	7	7	4	6
	11,0-12,0	62	9	5	2	1	1	1	3	4	3	9
	12,0-13,0	63	8	4	3	2	2	7	2	3	2	10
	13,0-14,4	54	10	6	1,5	2	1,5	1	10	6	2	6
	14,4-15,4	55	12	10	2	3	2	1	4	4	2	5
	16,4-17,4	40	14	10	5	4	3	2	8	5	2	7

Tableau n° 5

granulométrie

N° du puits	Profondeur m.	cailloux >10 m.m.	gravier		sable					silt		argile <0,005
			10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	
12	1,0-2,0	28	20	14	10	5	4	2	4	3	2,5	7,5
	2,0-2,3	26	19	16	9	8	4	2,5	5	6	1,5	3
	2,3-3,3	25	18	15	9	8	7	2	3	4	2	7
	3,3-3,7	28	20	16	6	6	4	2,5	2	4,5	3	8
	3,7-4,6	37	19	11	4	4	3	2	5	5,5	3,5	6
	4,6-5,6	34	20	14	7	7	3	3	2	4	1	5
	5,6-7,6	26	23	14	6	7	3,5	2	2	3,5	3,5	9,5
	6,7-7,3	46	16	12	5	4	3	2	2	4	1	5
	7,3-7,8	27	17	12	6,5	6,5	5	4	7	5	3	7
	7,8-8,8	44	15	11	4	4	3	1,5	4	2	1,5	10
	8,8-9,5	45	17	9	4	3	3,5	1,5	5	4	2,5	5,5
	9,5-10,5	29	20	12	4	3	3	1,5	2,5	3	2	10
	10,5-11,6	48	13	10	3	3	3	1,5	9	4	2	3,5
	11,6-11,9	41	17	12	4	4	2,5	2,5	5	3,5	1,5	7
	11,9-12,9	45	15	8,5	4,5	3	2,5	1,5	7	3	2,5	7,5
	12,9-13,8	47	14	9	4	4	1	1	9	4	2	5
	13,8-14,8	48	14	8	3,5	2	1	1,5	7	3	3	9
	14,8-15,8	56	13	10	3,5	2	1,5	1,5	3	3	1,5	5
	15,8-16,8	57	12	7	3	2	3	1	4	3	2	6
	16,8-18,0	46	23	10	3	4	1	1	2,5	2,5	1	6
	18,0-19,0	54	10	10	4	5	1,5	2	6	2	0,5	5
	19,0-20,1	52	13	10	3	4	1	1	6	3	1	6
	20,1-21,0	33	25	14	3	2	2	2	1	3	1	14

Tableau n° 5

granulométrie

N° du puits	Profondeur m.	cailloux >10 m.m.	gravier		sable					silt		argile <0,005
			10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	
20	1,5-2,0	14	18	22	7	7	4	4	9	6	2	7
	2,0-3,2	25	18	15	9	8	6	2	1	3	4	9
	3,2-4,2	22	19	14	7	3	4	2	7	9	4	9
	4,2-5,2	34	20	12	5	6	4	2	3	5	2	7
	5,2-5,0	47	16	10	3	3	3	1	3	5	3	6
	5,9-6,7	34	16	15	4	4	3	1	9	5	2	7
	6,7-7,7	36	21	13	5	7	4	2	3	5	1	3
	7,7-8,7	38	13	10	6	6	5	2	4	3	2	8
	8,7-9,7	42	17	10	6	5	4	2	3	6	2	7
	9,7-10,7	47	16	12	4	3	2	2	8	4	1	1
	10,7-11,9	40	14	6	1	3	2	3	10	6	5	10
	11,9-12,9	43	19	10	2	2	1	2	13	5	1	2
	12,9-13,9	44	16	12	2	2	1	2	12	5	1	3
	13,9-15,2	32	17	12	2	3	2	3	12	3	5	9
	15,2-16,2	54	13	7	3	4	3	2	4	6	2	2
	17,0-18,2	57	8	8	1	1	2	1	13	6	1	2
	18,2-19,2	56	11	9	2	3	2	2	9	2	2	2
	19,2-20,0	36	17	12	7	6	4	2	8	3	1	4
	20,0-21,0	52	15	10	4	3	2	3	5	2	1	3
	21,0-22,0	45	17	10	2	3	4	1	9	2	3	3
	22,0-22,7	45	16	10	4	5	1	2	3	2	4	8

Tableau n° 5

Granulométrie

N° du puits	Profondeur m.	cailloux >10 m.m.	gravier		sable					silt		argile <0,005
			10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,1	0,1-0,05	0,05-0,01	0,01-0,005	
109	0,7-1,3	1	1	1	2	1	5	15	14	23	13	24
	1,6-2,4	0	4	4	3	2	1	2	14	40	7	23
	2,4-3,4	0	0	1	2	1	2	6	12	24	13	37
	3,4-4,8	0	1	3	2	1,5	4,5	4	9	23	11	42
	4,8-5,8	0	2	1	2	2	1	1	10	40	15	28

Tableau n° 5

tableaux n° 6 et 7.

3 - Plasticité

On a utilisé la méthode d'Atterberg pour déterminer les limites de liquidité et de plasticité des matériaux fins de dimensions inférieures à 0,05 mm. Les résultats montrent que les matériaux fins des alluvions de la plaine de Tabasse ont un indice de plasticité assez élevé, supérieur à 30 % (voir les tableaux n° 6 et 7).

4 - Poids spécifique, Poids volumique sec et Poids volumique in situ, Indice des vides, Porosité et Degré de saturation

On a mesuré le poids spécifique des grains de l'ensemble des matériaux et séparément le poids spécifique des grains des matériaux grossiers et fins au picnomètre.

Pour déterminer le poids volumique in situ, on a utilisé la méthode d'immersion dans l'eau, l'échantillon ayant été auparavant paraffiné. Par ailleurs, on a mesuré aussi le poids volumique des matériaux grossiers et fins, séparément. Le poids volumique sec, la porosité, l'indice des vides et le degré de saturation sont calculés par les formules classiques suivantes :

$$\gamma_d = \frac{\gamma_h}{1 + 0,01W} \quad (\text{poids volumique sec})$$

$$n = \frac{G - \gamma_d}{G} \times 100 \% \quad (\text{porosité en \%})$$

$$e = \frac{G - \gamma_d}{\gamma_d} \quad (\text{indice des vides})$$

$$S = \frac{\gamma_h - \gamma_d}{n \cdot \gamma_w} \quad (\text{degré de saturation})$$

Les résultats obtenus nous montrent que le poids spécifique des grains varie faiblement entre 2,65 et 2,70 g/cm³ ; le poids volumique est assez élevé, il se situe entre 1,75 et 2,30 g/cm³ ; la porosité et l'indice des vides sont assez faibles et ils varient de l'ordre de 12 à 25 % et de 0,15 à 0,28, ce qui est dû à la compacité assez élevée des alluvions de plaine. Le degré de saturation varie entre 0,2 et 1,0 et la plupart du temps il est assez élevé, surtout en profondeur, malgré une teneur

## PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

N° du puits	Profondeur d'échantil- lonnage (m)	Granulométrie				Liquidité	Indice de plasticté	Degré de saturation	Poids volumique sec (g/cm <sup>3</sup> )	Indice des vides
		Cailloux > 10 mm	Gravier 2-10 mm	Sable 0,05-2 mm	Silt et argile < 0,05 mm					
60	1,20	45	26	15	14	68	42	0,36	2,25	0,20
	1,90	32	33	22	15	63	39	0,29	2,28	0,16
	2,80	30	32	17	21	57	35	0,62	2,36	0,15
	3,60	20	44	25	11	78	51	0,51	2,32	0,16
	4,70	45	30	14	11	72	43	0,70	2,32	0,15
	5,60	35	29	19	17	77	48	0,74	2,38	0,14
	Moyenne	34,5	32,3	18,5	14,7	69,1	43	0,536	2,32	0,16
32	1,40	29	21	19	31	62	34	0,37	1,97	0,31
	2,30	53	19	13	15	77	44	0,56	2,26	0,18
	2,80	53	15	12	20	83	51	0,40	2,13	0,25
	3,40	40	29	18	17	59	24	0,34	2,22	0,21
	4,00	52	22	11	15	79	46	0,49	2,11	0,26
	5,50	41	24	17	18	69	38	0,62	2,09	0,29
	Moyenne	44,4	21,4	15,0	19,2	71,5	39,5	0,463	2,13	0,25
58	1,30	15	26	23	26	69	41	0,27	2,01	0,34
	1,90	27	24	17	32	67	38	0,58	2,24	0,21
	2,40	24	26	23	27	75	46	0,54	2,11	0,28
	2,80	27	32	20	28	79	48	0,40	2,02	0,34
	3,80	40	26	15	19	80	47	0,58	2,23	0,21
	4,60	30	30	20	20	81	52	0,36	2,24	0,20
5,60	27	35	21	18	72	41	0,45	2,22	0,22	
	Moyenne	27,3	28,9	19,8	24,4	74,7	44,7	0,454	21,5	0,257
65	1,3	22	25	24	29	63	35	0,49	2,20	0,22
	1,4	27	34	21	18	63	36	0,69	2,35	0,15
	3,0	26	27	28	19	57	34	0,74	2,38	0,14
	3,3	28	34	21	17	58	33	0,58	2,24	0,21
	3,75	23	34	24	19	67	38	0,60	2,26	0,18
	4,50	35	29	19	17	68	38	0,44	2,27	0,19
5,35	32	35	20	13	67	39	0,49	2,27	0,17	
	Moyenne	27,6	31,1	24,4	18,8	66,3	36,1	0,57	2,28	0,18
124	1,30	18	31	24	27	62	36	0,38	2,06	0,31
	2,0	15	21	14	50	68	34	0,50	1,93	0,38
	2,85	26	28	20	26	84	54	0,56	2,10	0,27
	3,70	45	20	12	23	94	59	0,32	2,11	0,28
	4,80	42	25	16	17	79	49	0,60	2,22	0,18
	5,65	28	18	17	37	67	38	0,61	2,12	0,25
	Moyenne	29,0	23,8	17,2	30,0	75,6	45	0,495	2,10	0,278

Tableau n° 6

## PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

N° du puits	Profondeur d'échantil- lonnage (m)	Granulométrie				Liquidité	Indice de plasticté	Degré de saturation	Poids volumique sec (g/cm <sup>3</sup> )	Indice des vides
		Cailloux > 10 mm	Gravier 2-10 mm	Sable 0,05-2 mm	Silt et argile < 0,05 mm					
64	1,40	17	31	31	21	56	33	0,40	2,12	0,27
	2,30	27	31	28	14	66	37	0,33	2,04	0,32
	3,40	28	31	24	17	68	44	0,34	2,12	0,25
	4,40	52	22	13	13	71	40	0,26	2,18	0,24
	5,50	38	26	15	21	82	50	0,67	2,24	0,20
	Moyenne	32,4	28,2	22,2	17,2	68,6	40,8	0,40	2,14	0,26
27	1,6	30	29	23	18	55	31	0,59	2,17	0,23
	2,6	29	31	20	20	73	45	0,47	2,17	0,21
	3,6	24	36	20	20	70	42	0,43	2,23	0,19
	4,5	43	33	12	12	68	40	0,75	2,25	0,19
	5,5	37	30	17	16	68	39	0,39	2,14	0,26
	Moyenne	32,6	31,8	18,4	17,2	66,8	39,4	0,53	2,19	0,22
24	1,4	17	31	24	28	57	33	0,56	2,04	0,27
	2,2	19	34	21	26	64	36	0,58	2,09	0,26
	2,8	18	30	28	24	76	42	0,62	2,13	0,26
	3,1	8	16	32	44	70	41	0,46	2,08	0,31
	3,7	24	29	29	18	69	40	0,40	2,09	0,29
	4,3	36	28	21	15	73	43	0,48	2,14	0,26
4,8	53	21	14	12	74	45	0,52	2,28	0,18	
5,5	47	27	12	14	77	45	0,51	2,25	0,19	
	Moyenne	27,7	27,0	22,6	22,7	70	40,6	0,51	2,13	0,25
196	0,0-1,7	17	33	29	21	52	19	0,46	2,10	0,28
	2,8	17	20	22	41	50	26	0,74	2,04	0,32
	2,9-4,9	63	20	13	4	44	22	0,96	2,23	0,20
	4,9-5,8	36	27	24	13	44	22	0,51	2,16	0,25
	Moyenne	33,2	25,0	22,0	19,8	47,5	22,2	0,667	2,13	0,262
31	1,5	30	29	24	17	60	32	0,40	2,01	0,33
	2,0	45	23	18	14	70	41	0,32	2,24	0,19
	2,8	32	31	25	12	58	35	0,25	2,15	0,25
	3,4	35	26	18	21	71	42	0,49	2,20	0,22
	4,2	55	22	10	13	83	51	0,49	2,21	0,19
5,0	31	31	17	21	81	49	0,56	2,15	0,24	
	Moyenne	38,0	27,0	18,6	16,4	70,5	41,6	0,418	2,16	0,236

Tableau n° 6

PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

N° du puits	Profondeur d'échantil- lonnage (m)	Granulométrie				Liquidité	Indice de plasticité	Degré de saturation	Poids volumique sec (g/cm <sup>3</sup> )	Indice des vides
		Cailloux > 10 mm	Gravier 2-10 mm	Sable 0,05-2 mm	Silt et argile < 0,05 mm					
119	1,05	27	28	23	22	61	31	0,70	2,28	0,17
	1,25	24	33	21	22	64	38	0,62	2,17	0,22
	3,00	27	28	21	24	82	50	0,67	2,22	0,22
	3,75	29	29	22	20	75	47	0,54	2,23	0,20
	5,0	28	21	27	24	65	39	0,83	2,40	0,12
	5,40	36	30	16	18	63	37	0,76	2,35	0,14
	Moyenne	28,5	28,1	21,7	21,6	68,3	40,3	0,69	2,275	0,178
182	2,2-3,7	36	31	26	7	60	34	0,58	2,19	0,23
	3,7-5,5	40	30	18	12	57	32	0,49	2,15	0,26
	5,5-6,9	39	24	14	23	61	33	0,70	2,16	0,25
	0,85-2,0	22	23	17	38	57	33	0,59	1,96	0,37
Moyenne	30,4	27,8	19,6	22,2	58,8	33	0,61	2,11	0,30	
29	1,5	25	38	25	12	47	27	0,25	2,13	0,24
	2,4	28	32	21	19	79	49	0,63	2,12	0,24
	3,0	27	32	18	23	82	50	0,40	2,14	0,25
	4,0	27	35	21	23	78	48	0,42	2,06	0,32
	4,8	35	36	16	13	80	52	0,48	2,24	0,20
	5,5	28	36	21	15	65	40	0,49	2,15	0,22
Moyenne	28,0	34,7	20,0	17,3	71,8	44,3	0,445	2,14	0,245	
14	1,40	26	30	27	17	50	33	0,38	2,13	0,27
	2,10	27	28	23	22	58	34	0,35	1,99	0,35
	2,70	32	27	17	24	68	41	0,57	2,18	0,24
	3,50	19	35	30	16	63	41	0,51	2,15	0,24
	4,50	49	24	16	10	57	33	0,38	2,27	0,23
	5,50	31	34	19	16	68	34	0,42	2,14	0,24
Moyenne	30,7	29,8	22,0	17,5	60,6	36	0,43	2,145	0,26	
127	0,90	24	32	24	20	61	36	-	2,19	-
	1,55	20	35	27	18	71	41	0,27	2,50	0,22
	2,15	19	27	36	18	65	36	-	2,14	-
	2,60	30	29	23	18	73	45	0,46	2,17	0,24
	3,05	33	31	26	16	71	43	-	2,15	-
	3,65	50	25	12	13	59	32	-	2,21	-
	4,40	36	28	19	17	77	47	-	2,32	-
	5,25	61	20	11	8	75	43	0,43	2,20	0,22
Moyenne	34,1	28,3	22,2	16,0	69	40,3	0,386	2,235	0,226	

Tableau n° 6

PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

N° du puits	Profondeur d'échantil- lonnage (m)	Granulométrie				Liquidité	Indice de plasticité	Degré de saturation	Poids volumique sec (g/cm <sup>3</sup> )	Indice des vides
		Cailloux > 10 mm	Gravier 2-10 mm	Sable 0,05-2 mm	Silt et argile < 0,05 mm					
224	0,0-1,70	10	25	26	39	60	31	0,54	1,84	0,42
	1,7-3,7	37	18	18	27	48	23	0,50	2,02	0,32
	3,7-5,6	31	30	23	17	63	32	0,62	2,11	0,29
	Moyenne	26,0	24,3	22,3	27,6	57	28,7	0,553	1,99	0,343
19	1,0-2,0	20	39	25	16	54	31	-	2,10	-
	2,0-2,9	25	32	19	24	62	34	-	2,14	-
	2,9-4,0	27	26	19	28	68	42	0,36	2,12	0,25
	4,0-5,0	35	30	22	13	68	40	-	2,23	-
	5,0-5,5	41	33	15	11	69	41	-	2,21	-
Moyenne	30,8	32,2	19,8	17,2	66,8	39,5	-	2,15	-	
26	1,1	32	31	23	14	50	30	0,35	2,09	0,29
	2,1	25	22	23	30	67	39	0,50	2,10	0,28
	2,8	37	29	20	14	60	34	0,20	2,19	0,26
	3,4	20	30	28	22	65	38	0,36	2,22	0,20
	4,3	28	30	28	14	55	33	0,36	2,07	0,29
	5,1	30	32	22	16	57	29	0,38	2,19	0,23
6,0	35	29	19	17	64	39	0,32	2,20	0,23	
Moyenne	29,6	29,0	23,3	18,1	59,7	34,5	0,35	2,16	0,25	
170	1,40	21	42	22	15	57	32	0,40	2,02	0,34
	1,75-3,80	25	31	26	18	54	31	0,64	2,14	0,26
	3,80-5,70	27	31	24	17	58	33	0,73	2,26	0,20
Moyenne	24,3	34,6	24,0	16,7	56,3	32	0,59	2,14	0,266	
20	1,5-2,0	14	40	31	15	60	36	0,32	2,01	0,33
	2,0-3,2	25	33	26	16	71	44	0,38	2,11	0,27
	3,2-4,2	22	33	23	22	75	45	0,42	2,16	0,24
	4,2-5,2	34	32	20	14	63	35	0,43	2,24	0,19
	5,2-5,9	47	26	13	14	67	41	0,45	2,26	0,19
Moyenne	28,4	32,8	22,6	16,2	67,2	40,2	0,40	2,16	0,24	
21	1,10	26	33	28	13	74	48	-	2,14	-
	1,60	28	30	20	22	67	42	0,46	2,08	0,28
	2,0-3,1	26	31	27	16	67	40	-	2,14	-
	3,1-4,25	27	38	22	13	62	37	0,35	2,18	0,25
	4,25-5,20	38	31	21	10	69	38	-	2,21	-
	Moyenne	29,0	32,6	23,6	14,8	67,8	41	0,405	2,15	0,265

Tableau n° 6

PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

N° du puits	Profondeur d'échantillonnage (m)	Granulométrie				Liquidité	Indice de plasticité	Degré de saturation	Poids volumique sec (g/cm <sup>3</sup> )	Indice des vides
		Cailloux > 10 mm	Gravier 2-10 mm	Sable 0,05-2 mm	Silt et argile < 0,05 mm					
133	0,0-1,45	20	41	27	12	48	23	0,46	2,14	0,24
	2,0	13	34	30	23	53	27	0,64	2,14	0,25
	2,7-3,8	23	35	28	14	63	23	0,69	2,09	0,28
	3,8-5,4	37	32	20	11	55	29	0,37	2,23	0,32
	Moyenne	2,98	26,6	25,6	18,0	63,4	37	51,5	2,06	0,25
9	3,0-4,0	38	32	19	12	65	37	0,46	2,21	0,21
	4,0-5,0	31	28	29	12	64	36	0,62	2,07	0,29
	5,0-6,0	38	32	17	13	73	47	0,45	2,20	0,21
Moyenne	2,98	26,6	25,6	18,0	63,4	37	51,5	2,06	0,25	
135	0,0-0,9	11	40	34	15	39	19	0,35	2,14	0,25
	0,9-1,85	23	31	28	18	49	26	0,42	2,03	0,31
	1,85-2,90	30	30	21	19	53	26	0,36	2,06	0,29
	2,90-4,90	25	29	23	23	52	27	0,60	2,18	0,28
	4,90-5,95	43	30	19	8	40	20	0,84	2,17	0,24
Moyenne	26,4	32,0	25,0	16,6	46,6	23,6	0,514	2,116	0,274	
14	1,0-1,85	21	26	23	30	65	36	0,88	2,03	0,32
	2,30	43	20	18	19	68	34	0,64	2,04	0,31
	2,6-3,15	30	36	20	14	79	48	0,37	2,16	0,24
	3,15-3,90	40	32	18	16	78	45	0,42	2,16	0,24
	3,90-4,75	37	28	20	15	66	39	0,49	2,13	0,25
	4,75-5,0	44	26	21	9	47	21	0,22	2,20	0,22
Moyenne	35,0	28,0	20,0	17,2	67,1	37,1	0,50	2,12	0,26	
15	1,70	24	33	27	16	69	41	0,29	2,12	0,26
	2,40	20	38	27	15	98	72	0,45	2,13	0,25
	2,9-3,3	27	36	24	13	79	53	0,40	2,18	0,22
	3,3-3,7	36	30	22	12	78	46	0,43	2,11	0,27
	3,7-5,0	33	32	23	12	64	35	0,39	2,13	0,26
	5,0-5,6	39	28	20	14	67	37	0,50	2,24	0,19
Moyenne	29,8	32,8	23,9	13,5	75,8	47,3	0,41	2,15	0,24	
16	2,3-3,3	26	34	29	11	68	41	0,28	2,12	0,27
	3,3-4,2	50	26	16	8	79	42	0,34	2,10	0,29
	180	12	41	31	16	70	38	0,20	1,97	0,33
	4,2-5,0	30	35	26	9	73	47	0,32	2,19	0,23
	1,20	22	34	26	18	67	40	0,37	2,12	0,27
	5,0-6,1	35	35	17	13	62	36	0,34	2,22	0,22
Moyenne	29,2	34,2	24,1	12,5	69,8	40,6	30,8	2,15	0,268	

Tableau n° 6

PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

N° du puits	Profondeur d'échantillonnage (m)	Granulométrie				Liquidité	Indice de plasticité	Degré de saturation	Poids volumique sec (g/cm <sup>3</sup> )	Indice des vides
		Cailloux > 10 mm	Gravier 2-10 mm	Sable 0,05-2 mm	Silt et argile < 0,05 mm					
230	0,0-0,75	11	41	32	16	46	24	0,30	2,05	0,31
	0,75-2,75	21	29	27	23	62	34	0,46	2,03	0,32
	2,75-4,30	28	31	22	19	62	33	1,00	2,14	0,25
	4,3-5,65	30	33	25	12	49	27	0,62	2,04	0,32
	Moyenne	22,5	33,5	26,5	17,5	54,7	29,5	0,59	2,065	0,30
144	0,0-1,30	11	29	38	24	47	24	0,52	2,05	0,30
	2,10	26	29	20	25	66	36	0,46	2,04	0,31
	2,8-4,3	26	33	25	16	54	29	0,65	2,16	0,20
	4,3-5,8	47	26	16	11	62	35	0,61	2,16	0,22
	Moyenne	27,5	29,2	24,8	19,0	57,2	31	0,56	2,10	0,257
140	0,0-1,0	20	39	28	13	47	24	0,25	2,13	0,32
	1,0-2,0	21	37	27	15	53	22	0,35	2,05	0,30
	3,3-4,5	26	34	32	18	66	37	0,72	2,18	0,22
	4,5-5,4	27	34	25	14	51	27	0,57	2,20	0,21
	Moyenne	23,0	36,0	26,0	15,0	54,2	29	0,47	2,14	0,26
142	0,0-1,2	20	37	29	14	42	18	0,14	2,13	0,26
	1,2-1,8	20	25	29	26	58	31	0,39	1,86	0,44
	2,3-2,9	20	33	24	23	68	39	0,64	2,18	0,23
	3,2	19	27	27	27	70	40	0,86	2,01	0,34
	3,4-5,5	33	35	21	11	59	35	0,65	2,23	0,20
	Moyenne	22,4	31,4	26,0	20,2	59,4	32,6	0,536	2,08	0,29
153	0,0-0,60	16	30	35	18	30	15	0,40	1,91	0,42
	0,60-1,25	17	18	15	50	58	30	0,65	1,83	0,44
	1,25-2,9	17	36	32	15	52	28	0,53	2,14	0,26
	2,9-3,7	42	26	16	16	63	34	0,66	2,12	0,27
	3,7-5,7	27	33	22	18	60	32	0,73	2,15	0,26
Moyenne	23,8	28,6	24,0	23,6	52,6	27,8	0,59	2,03	0,33	
286	1,0	23	29	33	15	46	22	0,18	1,97	0,55
	1,6-2,2	12	21	30	37	50	27	0,58	1,71	0,56
	2,2-4,2	36	25	20	19	68	40	0,72	2,10	-
	4,15-4,8	43	28	18	11	63	40	0,42	2,18	0,24
	Moyenne	28,5	25,7	25,3	20,5	56,7	32,2	0,475	1,99	0,45

Tableau n° 6

Propriétés physiques des sols

N° du puits	Profondeur m.	Limites d'Atterberg			Teneur en eau %	Degré de saturation	Poids volumiques		Poids spécifique des grains g/cm <sup>3</sup>	Porosité n <sub>v</sub>	Indice des vides e
		Liquidité	Plasticité	Indice de Plasticité			Humide g/cm <sup>3</sup>	Sec g/cm <sup>3</sup>			
4	1,0-2,0	81	32	49	6,9	0,64	2,15	2,01	2,69	21,7	0,28
	2,0-3,0	83	27	56	3,0	0,18	2,02	1,97	2,69	27,5	0,37
	3,0-4,0	68	28	40	3,0	0,33	2,20	2,13	2,70	21,0	0,27
	4,0-5,0	64	23	41	3,0	0,38	2,18	2,05	2,70	23,6	0,29
	5,0-6,0	66	27	39	3,4	0,30	2,14	2,07	2,70	23,0	0,30
	6,0-7,0	62	26	36	3,3	0,44	2,30	2,22	2,70	18,0	0,22
	7,0-8,0	57	22	35	2,1	0,41	2,32	2,25	2,70	1,70	0,20
	8,0-9,0	59	23	36	3,1	0,44	2,33	2,26	2,70	16,0	0,19
	9,0-10,0	55	23	32	5,2	0,58	2,30	2,19	2,70	19,0	0,23
11	1,0-1,5	68	27	41	3,2	0,51	2,03	1,88	2,67	29,6	0,42
	2,0-3,0	67	30	37	3,1	0,39	2,26	2,19	2,67	18,0	0,22
	3,0-4,2	70	33	37	2,9	0,39	2,15	2,09	2,67	21,7	0,28
	4,2-5,2	55	19	36	4,0	0,49	2,27	2,18	2,67	18,4	0,22
	5,2-6,6	64	27	37	5,3	0,64	2,29	2,17	2,67	18,7	0,23
	6,6-7,6	81	23	52	3,4	0,40	2,28	2,21	2,68	17,5	0,21
	7,6-8,2	69	29	40	2,7	0,43	2,36	2,30	2,67	13,9	0,16
	8,8-9,9	68	26	42	3,2	0,41	2,28	2,21	2,67	17,2	0,21
	9,9-11,0	79	31	48	7,3	1,0	2,43	2,26	2,68	15,7	0,19
	11,0-12,0	90	37	53	7,9	0,89	2,34	2,17	2,68	19,0	0,24
	12,0-13,0	63	34	29	7,6	0,89	2,34	2,17	2,68	19,0	0,24
	13,0-14,4	74	26	48	9,4	0,88	2,27	2,07	2,68	22,8	0,29

Tableau n° 7

Propriétés physiques des sols

N° du puits	Profondeur m.	Limites d'Atterberg			Teneur en eau %	Degré de saturation	Poids volumiques		Poids spécifique des grains g/cm <sup>3</sup>	Porosité n <sub>v</sub>	Indice des vides e
		Liquidité	Plasticité	Indice de Plasticité			Humide g/cm <sup>3</sup>	Sec g/cm <sup>3</sup>			
12	1,0-2,0	70	26	44	3,6	0,39	2,24	2,16	2,71	20,3	0,25
	2,0-2,3	71	31	40	3,2	-	2,19	2,12	-	-	-
	2,3-3,3	59	25	34	3,6	0,43	2,28	2,20	2,67	17,6	0,21
	3,3-3,7	68	25	43	4,2	-	2,21	2,12	-	-	-
	3,7-4,6	63	26	37	4,3	0,41	2,20	2,11	2,71	22,1	0,28
	4,6-5,6	61	28	33	3,6	-	2,34	2,26	-	-	-
	5,6-6,7	63	26	37	2,5	0,38	2,32	2,26	2,69	16,0	0,19
	6,7-7,3	58	25	33	3,1	-	2,30	2,23	-	-	-
	7,3-7,8	60	22	38	5,4	0,58	2,25	2,13	2,68	20,5	0,26
	7,8-8,8	66	24	42	5,1	-	2,34	2,23	-	-	-
	8,8-9,5	62	26	36	3,8	0,58	2,36	2,27	2,69	15,6	0,18
	9,5-10,5	63	22	41	3,7	-	2,23	2,15	-	-	-
	10,5-11,6	61	28	33	5,6	0,60	2,26	2,14	2,67	19,9	0,25
	11,6-11,9	64	27	37	4,8	-	2,34	2,23	-	-	-
	11,9-12,9	68	29	39	12,9	0,81	2,37	2,10	2,66	21,0	0,27
	12,9-13,8	76	38	38	9,4	-	2,27	2,07	-	-	-
	13,8-14,8	88	30	58	8,4	1,0	2,40	2,21	2,70	18,2	0,22
	14,8-15,8	81	31	50	6,7	-	2,20	2,06	-	-	-
	15,8-16,8	66	29	37	5,3	-	2,24	2,28	-	-	-
	16,8-18,0	64	28	36	6,3	-	2,33	2,19	-	-	-
	18,0-19,0	80	30	50	5,1	0,7	2,37	2,26	2,68	15,7	0,19
	19,0-20,1	63	26	37	4,7	-	2,36	2,25	-	-	-

Tableau n° 7

Propriétés physiques des sols

N° du puits	Profondeur m.	Limites d'Atterberg			Teneur en eau %	Degré de saturation	Poids volumiques		Poids spécifique des grains g/cm <sup>3</sup>	Porosité n <sub>v</sub>	Indice des vides e
		Liquidité	Plasticité	Indice de Plasticité			Humide g/cm <sup>3</sup>	Sec g/cm <sup>3</sup>			
20	1,5-2,0	60	24	36	3,8	0,32	2,09	2,01	2,67	24,7	0,33
	2,0-3,2	71	27	44	3,8	0,38	2,19	2,11	2,67	21,0	0,27
	3,2-4,2	75	30	45	3,6	0,42	2,24	2,16	2,67	19,1	0,24
	4,2-5,2	63	28	35	3,3	0,43	2,31	2,24	2,67	16,1	0,19
	5,2-5,9	67	26	41	3,1	0,45	2,33	2,26	2,68	15,7	0,19
	5,9-6,7	80	30	50	5,0	0,63	2,32	2,21	2,68	17,5	0,21
	6,7-7,7	66	25	41	3,1	0,42	2,29	2,22	2,67	16,8	0,20
	7,7-8,7	65	27	38	3,8	0,43	2,25	2,17	2,67	18,7	0,23
	8,7-9,7	79	27	52	6,1	0,67	2,28	2,15	2,67	19,5	0,24
	9,7-10,7	78	33	45	5,5	0,76	2,38	2,26	2,68	15,7	0,19
	10,7-11,9	83	31	52	7,8	0,78	2,28	2,12	2,67	20,6	0,26
	11,9-12,9	89	40	49	8,4	0,84	2,28	2,10	2,67	21,4	0,27
	12,9-13,9	72	29	43	6,2	0,60	2,22	2,09	2,67	21,7	0,28
	13,9-15,2	70	24	46	7,6	0,60	2,15	2,00	2,67	25,1	0,33
	15,2-16,2	71	29	42	7,0	0,84	2,35	2,20	2,68	17,9	0,22
	17,0-18,2	84	36	48	11,5	0,90	2,22	1,99	2,67	25,5	0,34
	18,2-19,2	68	31	37	6,2	0,57	2,2	2,07	2,68	22,8	0,29
	19,2-20,0	58	28	30	5,4	0,49	2,18	2,07	2,67	22,5	0,29
	2,00-21,0	69	28	41	4,7	0,53	2,32	2,23	2,68	16,8	0,20
	21,0-22,0	92	32	60	6,1	0,78	2,34	2,21	2,67	17,2	0,21
	22,0-22,7	46	18	28	6,9	0,93	2,38	2,23	2,67	16,5	0,20

Tableau n° 7

Propriétés physiques des sols

N° du puits	Profondeur m.	Limites d'Atterberg			Teneur en eau %	Degré de saturation	Poids volumiques		Poids spécifique des grains g/cm <sup>3</sup>	Porosité n <sub>v</sub>	Indice des vides e
		Liquidité	Plasticité	Indice de Plasticité			Humide g/cm <sup>3</sup>	Sec g/cm <sup>3</sup>			
109	0,7-1,3	40	20	20	6,45	0,31	1,86	1,75	2,73	35,9	0,56
	1,6-2,4	66	28	38	9,30	0,41	1,81	1,66	2,66	37,6	0,60
	2,4-3,4	60	28	32	14,5	0,64	1,95	1,70	2,77	38,6	0,63
	3,4-4,8	52	23	29	14,9	0,77	2,05	1,78	2,63	34,8	0,53
	4,8-5,8	49	23	26	14,6	0,74	2,05	1,79	2,75	34,9	0,54

Tableau n° 7

en eau assez faible, due à la compacité élevée. On a fait 1260 essais pour le poids spécifique et le même nombre pour le poids volumique in situ. Les résultats sont présentés dans les tableaux n° 6 et 7.

5 - Essais Los Angelès

On a fait cet essai pour mesurer la résistance à l'abrasion de ces matériaux grossiers. Ils ont été faits avec des balles de 400 g et sans balles. Le cylindre tourne à une vitesse de 30-33 tours/minute.

D'après le changement de dimensions des échantillons après les essais, on a calculé la résistance de ces matériaux. Les résultats obtenus montrent que ces matériaux grossiers sont assez résistants.

6 - Détermination de la résistance du conglomérat à la compression simple

Dans certains endroits de la plaine, on a remarqué des lentilles de conglomérat épaisses de 1,5-2,5 m. Pour étudier sa résistance, on a fait des essais à la compression simple. Ces essais ont été faits avec des échantillons à l'état sec et à l'état saturé. Dans le premier cas on a laissé sécher l'échantillon jusqu'au moment où il atteint un poids constant et dans le second cas on l'a mis dans de l'eau distillée pendant 24 h.

Les échantillons sont mis sous pression et on augmente la pression avec une vitesse de 15-20 kg/s. Le maximum de pression est marqué sur le manomètre. Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau n° 7a qui montre que la résistance des échantillons à l'état sec est assez importante et elle ne change pas beaucoup à l'état saturé.

7 - Détermination de l'angle de talus naturel des graviers

On a fait ces essais sur les échantillons pris dans le lit majeur du Zayendeh-Roud formé de graviers. On met des échantillons dans l'appareil jusqu'à un niveau indiqué et on tourne l'appareil de 45° autour de son axe ; les graviers perdent leur équilibre et prennent une pente. C'est la pente de talus naturel de cet échantillon que l'on peut mesurer directement. Ces essais sont d'abord faits sur des échantillons secs, puis ensuite dans l'eau. Les résultats sont inscrits dans le tableau n° 8. On peut conclure que les graviers de rivières ont un angle de talus naturel assez élevé, de l'ordre de 30-34,5° à l'état sec, et 26-33° dans l'eau.

.../...

Tableau 7a- PROPRIETES MECANIKES DES SOLS

Résultats d'essais de résistance à la compression des conglomérats

N° du puits	Profondeur (m)	Résistance (kg/cm <sup>2</sup> )	
		Saturé	Sec
3	26,70-26-70	-	334
12	25,50-25,62	-	301
99	31,50-31,65	-	314
106	29,50-29,70	-	203
289	20,00-20,20	-	340
289	24,80-25,10	-	676
20	10,0-11,0	481	547
20	14,0-15,0	843	1023
20	15,5-16,5	411	1515
20	17,5-18,5	141	147
153	11,5-12,5	692	913

Tableau 8 - PROPRIETES MECANQUES DES SOLS

Angle de talus naturel des sols

N° du puits	Profondeur (m)	Angle de talus naturel $\beta$ (°)	
		sec	saturé
331	3,0-10,0	33,5	28,5
332	3,0-11,0	31,5	28,5
333	0,5-9,0	33,0	27,0
335	1,8-14,3	33,0	32,5
365	1,8-13,5	34,0	33,0
310	5,5-10,4	34,5	32,0
311	0,75-7,45	34,0	26,0
312	3,0-8,45	33,5	28,5
313	0,50-5,45	34,0	29,0
314	3,32-6,45	34,5	31,5
315	5,0-9,15	34,5	32,5
317	3,4-3,6	33,5	33,0
318	4,0-5,45	31,0	32,0
336	1,35-11,65	32,0	30,0
358	1,5-16,1	32,5	32,0
362	1,0-5,0	30,0	31,5
361	0,5-7,5	33,5	32,0
360	2,0-11,8	32,0	31,0
355	2,0-14,0	32,0	31,0
334	6,0-8,45	33,0	31,5

PROPRIETES MECANQUES DES SOLS

Tableau 9 - Résultats d'essais de cisaillement en laboratoire

N° du puits	Profondeur (m)	Contrainte normale (kg/cm <sup>2</sup> )	W (%)	$\gamma_h$ (g/cm <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\varphi$ (°)
11	2,0	1,09	-	-	-	1,05	16,0
		2,19	2,36	1,942	1,897		
		3,28	5,09	1,980	1,880		
11	4,0	1,09	-	-	-	0,75	16,0
		2,19	2,67	1,870	1,820		
		3,28	7,39	1,950	1,820		
11	6,0	1,09	1,80	1,820	1,790	0,40	24,5
		2,19	5,65	1,860	1,760		
		3,28	5,01	1,910	1,820		
12	1,5	1,09	4,06	2,030	1,940	0,75	20,0
		2,19	3,87	1,960	1,890		
		3,28	3,32	1,910	1,790		
12	4,0	1,09	2,34	1,940	1,840	1,05	18,5
		2,19	3,56	1,992	1,924		
		3,28	4,36	2,000	1,920		
12	6,0	1,09	3,06	1,930	1,870	0,32	29,0
		2,19	1,85	1,960	1,930		
		3,28	6,93	2,030	1,900		
20	2,0	1,09	2,55	1,900	1,850	0,80	19,5
20	4,0	2,19	1,04	1,930	1,860	0,35	20,0
20	6,0	1,09	1,62	1,960	1,930	1,05	11,0
		2,19	5,70	1,910	1,810		
		3,28	1,76	1,920	1,890		
11	2,0 6,0	Etat saturé					
						0,15 0,15	15,5 16,5

8 - Essais de cisaillement

On a fait 11 essais de cisaillement dont 9 à la teneur en eau naturelle et 2 en conditions saturées. On a fait des cisaillements directs avec les appareils américains sur des grands échantillons. On a utilisé la technique classique. Les échantillons ont une dimension de 30,4 x 30,4 x 30,4 cm. On a fait ces essais avec des charges verticales de 1,1 - 2,2 - 3,3 kg/cm<sup>2</sup>. Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau n° 9.

CHAPITRE IV

VI - ESSAIS IN SITU

- 1 - Liste des essais faits in situ
- 2 - Essais de granulométrie, pétrographie, poids volumique in situ
- 3 - Détermination de la corrosion des sols sur les métaux par la méthode électrique
- 4 - Essais de plaque
- 5 - Essais de cisaillement
- 6 - Mesure de perméabilité in situ

## VI - ESSAIS IN SITU

Malgré le coût et le temps qu'exigent ces essais, et à cause de la lithologie particulière des alluvions de la plaine de Tabasse, nous avons dû effectuer un certain nombre d'essais in situ. Premièrement, nous avons fait ces essais pour comparer les résultats avec ceux du laboratoire ; deuxièmement, quand le sol comporte un fort pourcentage de matériaux grossiers pour remplacer les essais mécaniques faits au laboratoire qui ne donnent pas normalement des résultats satisfaisants.

### 1 - Liste des essais faits in situ

- . Essais de granulométrie : 39 essais
- . Pétrographie visuelle des matériaux grossiers : 20 essais
- . Détermination du poids volumique : 41 essais
- . Détermination de la corrosion des sols sur les métaux avec la méthode électrique : 960 points
- . Essais de plaque : 25 essais
- . Essais de cisaillement : 21 essais
- . Mesure de perméabilité : 98 essais.

Les tableaux n° 10, 11, 12, 13 et 14 donnent les résultats de tous ces essais et nous allons brièvement expliquer les méthodes appliquées et étudier les résultats obtenus.

### 2 - Essais de granulométrie, pétrographie, poids volumique in situ

Pour les essais de granulométrie, de pétrographie et de poids volumique, on a creusé 6 puits circulaires de profondeur 9,5 à 18 m, de 75 cm environ de diamètre, qu'on a essayé de garder toujours constant. A chaque mètre de profondeur, on a retiré tous les matériaux. On a utilisé ces matériaux pour l'analyse granulométrique, pétrographique et la détermination du poids volumique. Les échantillons ont tous un volume de 0,5 m<sup>3</sup> environ et leur poids est de 1 tonne.

#### a) Poids volumique

Après avoir retiré les échantillons du puits, nous les avons immédiatement pesés sur une bascule et on a calculé ensuite le volume du puits vide, on en a déduit le poids volumique humide. Il varie de 1,93 à 2,47 t/m<sup>3</sup> environ.

Tableau 10 - Détermination du poids volumique in situ

N° du puits	Profondeur (m)	Diamètre du puits (m)	Volume du sol (m <sup>3</sup> )	Poids du sol W naturelle (kg)	γ in situ (T/m <sup>3</sup> )	W (%)	γ <sub>d</sub> (T/m <sup>3</sup> )
133	1,0-2,0	0,7452	0,4356	998	2,28	5,40	2,17
	3,0-4,0	0,7730	0,4691	1 030	2,19	4,60	2,09
	5,0-6,0	0,7700	0,4715	1 012	2,15	4,72	2,06
	7,0-8,0	0,7710	0,4778	1 102	2,31	5,71	2,18
	0,0-10,0	0,7656	0,4637	975	2,11	7,93	1,96
	11,0-12,0	0,7460	0,4369	957	2,19	7,18	2,04
	13,0-14,0	0,7480	0,4392	950	2,16	8,16	1,99
142	2,0-3,0	0,7590	0,4510	939	2,08	6,13	1,96
	4,0-5,0	0,7580	0,4508	1 043	2,31	2,17	2,26
	6,0-7,2	0,7440	0,4344	989	2,27	4,35	2,17
	8,0-9,0	0,7550	0,4474	975	2,18	7,40	2,03
	10,0-11,0	0,7490	0,4404	973	2,21	6,75	2,07
	12,0-13,0	0,7440	0,4345	991	2,28	6,50	2,14
	14,0-15,0	0,7460	0,4369	971	2,22	8,41	2,03
	153	1,5-2,5	0,7650	0,4593	919	2,01	5,33
3,5-4,5		0,7510	0,4427	1 051	2,37	4,69	2,26
5,5-6,5		0,7440	0,4345	966	2,23	4,55	2,14
7,5-8,5		0,7400	0,4299	950	2,21	5,00	2,11
9,5-10,5		0,7520	0,4439	856	1,93	8,95	1,77
11,5-12,5		0,7560	0,4468	976	2,18	6,98	2,03
13,5-14,5		0,7480	0,4392	963	2,19	6,64	2,06
13	1,0-2,0	0,7800	0,4776	1 117	2,33	5,17	2,22
	3,0-4,0	0,7850	0,4825	1 187	2,47	4,44	2,26
	5,0-6,0	0,8250	0,5343	1 179	2,21	6,87	2,07
	7,0-8,0	0,7490	0,4404	946	2,14	5,96	2,02
	8,5-9,5	0,7350	0,4241	946	2,23	6,58	2,09
20	1,0-2,0	0,7490	0,4404	998	2,27	3,83	2,19
	3,0-4,0	0,7510	0,4427	991	2,24	3,85	2,16
	5,0-6,0	0,7530	0,4450	996	2,23	4,20	2,14
	7,0-8,0	0,7490	0,4404	997	2,26	4,18	2,16
	8,5-9,5	0,7500	0,4416	1 019	2,31	6,30	2,17
	10,0-11,0	0,7540	0,4463	997	2,23	6,80	2,09
	12,0-13,0	0,7470	0,4369	955	2,29	8,83	2,02
	14,0-15,0	0,7440	0,4345	1 028	2,37	7,30	2,21
	15,5-16,5	0,7470	0,4369	1 035	2,37	6,18	2,23
	17,5-18,5	0,7420	0,4322	984	2,28	6,68	2,14
89	1,0-2,0	0,7550	0,4474	1 011	2,26	6,30	2,12
	3,0-4,0	0,7500	0,4416	1 033	2,33	6,25	2,19
	5,0-6,0	0,7510	0,4427	1 050	2,37	5,97	2,24
	7,0-8,0	0,7470	0,4369	1 015	2,32	6,38	2,18
	8,5-9,5	0,7420	0,4322	969	2,24	8,44	2,07

Tableau 11- RESULTATS d'ESSAIS d'IDENTIFICATION IN SITU

N° du puits	Profondeur (m)	Poids et pourcentage (kg, %) de différentes particules						Poids total échantillon (kg)	
		> 76	63-76	51-63	38-51	25-38	19-25		< 19mm
13	1,0-2,0	-	-	-	2,05 0,2	17,0 1,6	30,6 2,9	1021,35 95,3	1071,0 100,0
13	3,0-4,0	-	-	-	6,2 0,5	42,0 3,7	57,0 5,0	1038,8 90,8	1144,0 100,0
13	5,0-6,0	-	-	-	11,57 1,1	52,0 4,6	65,0 5,7	999,43 88,6	1128,0 100,0
13	7,0-8,0	-	-	1,9 0,2	16,8 1,8	53,62 5,9	56,97 6,2	784,71 85,9	914,0 100,0
13	8,5-9,5	-	-	1,84 0,2	7,84 0,8	61,65 6,8	65,54 7,2	775,13 85,0	912,0 100,0
20	1,0-2,0	-	-	-	3,56 0,4	18,33 1,9	37,0 3,8	908,11 93,9	967,0 100,0
20	3,0-4,0	-	-	-	4,79 0,5	26,0 2,8	46,0 4,9	865,21 91,8	942,0 100,0
20	5,0-6,0	0,98 0,1	-	2,55 0,3	10,12 1,1	52,0 5,6	75,5 8,2	781,85 84,7	942,0 100,0
20	7,0-8,0	-	0,82 0,1	2,8 0,3	9,0 0,9	50,0 5,2	64,0 6,7	832,38 86,7	959,0 100,0
20	8,5-9,5	-	-	5,93 0,6	24,3 2,5	93,0 9,5	83,0 8,5	770,77 78,9	977,0 100,0
20	10,0-11,0	2,71 0,3	5,09 0,5	14,1 1,5	33,0 3,5	114,0 12,1	77,0 8,2	696,1 73,9	942,0 100,0
20	12,0-13,0	0,65 0,1	1,14 0,1	3,81 0,4	22,3 2,4	93,0 10,2	77,0 8,4	715,1 78,4	913,0 100,0
20	14,0-15,0	2,38 0,2	3,11 0,3	6,85 0,7	33,0 3,4	113,0 11,5	73,0 8,4	744,66 75,5	986,0 100,0
20	15,5-16,5	9,5 1,0	9,0 0,9	22,0 2,3	37,0 3,8	104,0 10,8	78,0 8,1	702,5 73,1	962,0 100,0
20	17,5-18,5	25,0 2,6	9,0 1,0	15,0 1,6	36,0 3,8	77,0 8,1	102,0 10,8	682,0 72,1	946,0 100,0
89	1,0-2,0	-	-	0,44 0,04	3,8 0,39	24,0 2,46	34,0 3,52	012,76 93,59	975,0 100,0
89	3,0-4,0	-	-	1,17 0,1	1,15 0,1	23,7 2,4	37,2 3,8	926,51 93,6	990,0 100,0
89	5,0-6,0	0,84 0,08	2,97 0,30	4,86 0,48	18,0 1,8	67,0 6,82	65,0 6,52	840,33 84,0	999,0 100,0
89	7,0-8,0	-	1,57 0,16	3,04 0,32	9,3 0,97	52,0 5,43	65,0 6,78	827,09 86,34	958,0 100,0
89	8,5-9,5	0,78 0,06	5,72 0,62	7,6 0,83	26,9 2,93	92,5 10,5	68,5 7,45	718,0 78,06	920,0 100,0

133	1,0-2,0	-	-	$\frac{0,41}{0,04}$	$\frac{2,5}{0,26}$	$\frac{16,67}{1,72}$	$\frac{31,46}{3,25}$	$\frac{916,96}{94,37}$	$\frac{968,0}{100,0}$
133	3,0-4,0	-	$\frac{0,84}{0,1}$	-	$\frac{6,58}{0,7}$	$\frac{32,38}{3,3}$	$\frac{51,58}{5,2}$	$\frac{903,61}{90,7}$	$\frac{995,0}{100,0}$
133	5,0-6,0	-	$\frac{1,02}{0,1}$	$\frac{2,02}{0,2}$	$\frac{8,76}{0,9}$	$\frac{42,37}{4,4}$	$\frac{72,05}{7,5}$	$\frac{835,33}{87,9}$	$\frac{962,0}{100,0}$
133	9,0-10,0	$\frac{2,18}{0,2}$	$\frac{1,35}{0,1}$	$\frac{5,55}{0,6}$	$\frac{16,65}{1,8}$	$\frac{69,36}{7,6}$	$\frac{89,49}{9,9}$	$\frac{721,42}{79,8}$	$\frac{906,0}{100,0}$
133	7,0-8,0	-	$\frac{1,24}{0,1}$	$\frac{1,42}{0,1}$	$\frac{9,46}{0,9}$	$\frac{60,54}{5,7}$	$\frac{88,53}{8,4}$	$\frac{897,81}{84,8}$	$\frac{1059,0}{100,0}$
133	11,0-12,0	$\frac{1,03}{0,1}$	$\frac{2,7}{0,3}$	$\frac{5,84}{0,7}$	$\frac{20,3}{2,3}$	$\frac{78,0}{8,7}$	$\frac{85,0}{9,5}$	$\frac{704,13}{78,4}$	$\frac{897,0}{100,0}$
133	13,0-14,0	$\frac{7,29}{0,8}$	$\frac{3,0}{0,3}$	$\frac{11,14}{1,2}$	$\frac{31,0}{3,5}$	$\frac{87,0}{9,7}$	$\frac{85,0}{9,5}$	$\frac{673,57}{75,0}$	$\frac{898,0}{100,0}$
142	2,0-3,0	-	-	-	$\frac{3,31}{0,4}$	$\frac{18,26}{2,1}$	$\frac{37,4}{4,2}$	$\frac{819,03}{93,3}$	$\frac{878,0}{100,0}$
142	4,0-5,0	-	$\frac{0,95}{0,1}$	$\frac{0,97}{0,1}$	$\frac{7,49}{0,7}$	$\frac{40,0}{4,0}$	$\frac{67,0}{6,6}$	$\frac{897,62}{88,5}$	$\frac{1009,0}{100,0}$
142	6,2-7,2	-	-	$\frac{2,18}{0,2}$	$\frac{9,73}{1,1}$	$\frac{40,0}{4,7}$	$\frac{58,0}{6,8}$	$\frac{742,09}{87,2}$	$\frac{852,0}{100,0}$
142	8,0-9,0	-	$\frac{0,95}{0,1}$	$\frac{1,39}{0,1}$	$\frac{11,57}{1,3}$	$\frac{40,0}{4,1}$	$\frac{50,0}{5,4}$	$\frac{822,09}{88,8}$	$\frac{926,0}{100,0}$
142	10,0-11,0	-	$\frac{1,3}{0,1}$	$\frac{3,0}{0,3}$	$\frac{21,3}{2,3}$	$\frac{91,0}{9,8}$	$\frac{92,0}{9,9}$	$\frac{723,4}{77,6}$	$\frac{932,0}{100,0}$
142	12,0-13,0	-	$\frac{3,7}{0,4}$	$\frac{7,3}{0,8}$	$\frac{30,0}{3,2}$	$\frac{103,0}{10,9}$	$\frac{96,0}{10,9}$	$\frac{705,0}{74,5}$	$\frac{945,0}{100,0}$
142	14,0-15,0	$\frac{0,97}{0,1}$	$\frac{6,77}{0,7}$	$\frac{15,0}{1,6}$	$\frac{40,0}{4,3}$	$\frac{126,0}{13,6}$	$\frac{78,0}{8,5}$	$\frac{657,26}{71,2}$	$\frac{924,0}{100,0}$
153	1,5-2,5	-	-	$\frac{0,92}{0,1}$	$\frac{3,29}{0,4}$	$\frac{17,9}{2,0}$	$\frac{32,0}{3,6}$	$\frac{823,89}{93,9}$	$\frac{878,0}{100,0}$
153	3,5-4,5	$\frac{1,61}{0,1}$	$\frac{4,1}{0,4}$	$\frac{5,5}{0,5}$	$\frac{15,5}{1,5}$	$\frac{57,0}{5,7}$	$\frac{66,0}{6,6}$	$\frac{854,29}{85,2}$	$\frac{1004,0}{100,0}$
153	5,5-6,5	$\frac{1,47}{0,1}$	$\frac{1,66}{0,1}$	$\frac{4,15}{0,4}$	$\frac{16,9}{1,8}$	$\frac{56,0}{6,1}$	$\frac{70,0}{7,6}$	$\frac{777,82}{83,9}$	$\frac{928,0}{100,0}$
153	7,5-8,5	-	$\frac{2,24}{0,2}$	$\frac{7,23}{0,8}$	$\frac{23,3}{2,5}$	$\frac{66,4}{7,3}$	$\frac{79,0}{8,7}$	$\frac{733,83}{80,5}$	$\frac{912,0}{100,0}$
153	9,5-10,5	-	$\frac{3,1}{0,4}$	$\frac{3,30}{0,4}$	$\frac{22,3}{2,8}$	$\frac{72,0}{9,0}$	$\frac{60,0}{7,5}$	$\frac{640,3}{79,9}$	$\frac{800,0}{100,0}$

Après, on a mis les échantillons à sécher au soleil et on a pu calculer la teneur en eau. Elle varie de l'ordre de 2,17 à 8,95 %. Enfin, on en a déduit le poids volumique sec qui varie de l'ordre de 1,77 à 2,36 t/m<sup>3</sup>. Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau n° 10 et ils nous montrent que normalement le poids volumique est assez élevé et que la teneur en eau augmente en profondeur.

#### b) Granulométrie

Pour l'analyse granulométrique, on a utilisé les tamis Standard anglais de dimensions 19, 25, 38, 51, 63, 76 mm et nous avons tamisé les matériaux précédemment séchés au soleil. Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas de matériaux grossiers de dimensions supérieures à 63 mm dans les couches supérieures du puits. On peut trouver des matériaux grossiers dont les dimensions dépassent 76 mm dans les couches les plus profondes du puits. Nous avons remarqué que le maximum de pourcentage de ces matériaux était de l'ordre de 2,6 % au fond du puits n° 20. Ce puits est le plus profond des six.

En général, on conclut que le pourcentage des cailloux augmente avec la profondeur (son maximum est de 28,8 %), ce qui veut dire que l'intensité du courant des torrents était plus importante auparavant et qu'elle diminue progressivement de nos jours.

Le pourcentage de matériaux dont les dimensions sont inférieures à 19 mm varie de l'ordre de 95,3 % pour les parties supérieures et 71,2 % pour les parties inférieures. Les résultats sont inscrits dans le tableau n° 11.

#### c) Pétrographie visuelle des matériaux grossiers

On a étudié visuellement la nature pétrographique des matériaux grossiers. Ils avaient été déjà auparavant séparés par le tamisage. Après les avoir pesés, on a calculé le pourcentage de chaque roche. Les résultats sont interprétés dans le paragraphe de la pétrographie générale (Chapitre VII - Synthèse des résultats).

#### 3 - Détermination de la corrosion des sols sur les métaux par la méthode électrique

Cette étude a été faite pour déterminer le risque de corrosion des conduits métalliques souterrains à une profondeur de 3 à 5 m. Cela revient à délimiter les zones où le pourcentage de sel est élevé, et où par con-

séquent la corrosion est forte.

Avec la méthode électrique et en mesurant la résistivité apparente, on peut déterminer les zones salées par leurs résistivités plus faibles. On a travaillé avec l'appareil Terametre. La distance entre 2 points AB d'injection de courant est de 15 m ; et la distance de 2 points CD des mesures de potentiel est de 5 m, ce qui peut donner la résistivité jusqu'à une profondeur de 3-4 m. On a mesuré ainsi les résistivités sur 960 points.

On trouve une forte corrosion dans quelques endroits situés au Sud-Ouest de la plaine de Tabasse. Au centre de la plaine, la corrosion est faible et il n'y a qu'au Nord que la corrosion est inexistante.

#### 4 - Essais de plaque

Pour la détermination du module de déformation et du tassement des sols, on a réalisé des essais de plaque. Ils ont été faits avec un semi-remorque chargé de blocs de ciment, lui-même muni d'un cric hydraulique. Le tout pèse environ 25 tonnes.

La surface des plaques rectangulaires utilisées est de 5000 cm<sup>2</sup> et on s'est servi seulement deux fois des plaques circulaires dont la surface est de 4550 cm<sup>2</sup>. Pour calculer le module de déformation et le tassement, on a creusé des puits rectangulaires de dimensions 1,2 x 2,5 m et dont la profondeur est comprise entre 1,5 et 6 m. Le tassement a été mesuré par 4 comparateurs fixés aux 4 angles de la plaque.

Ces essais ont été faits pour trois états du sol :

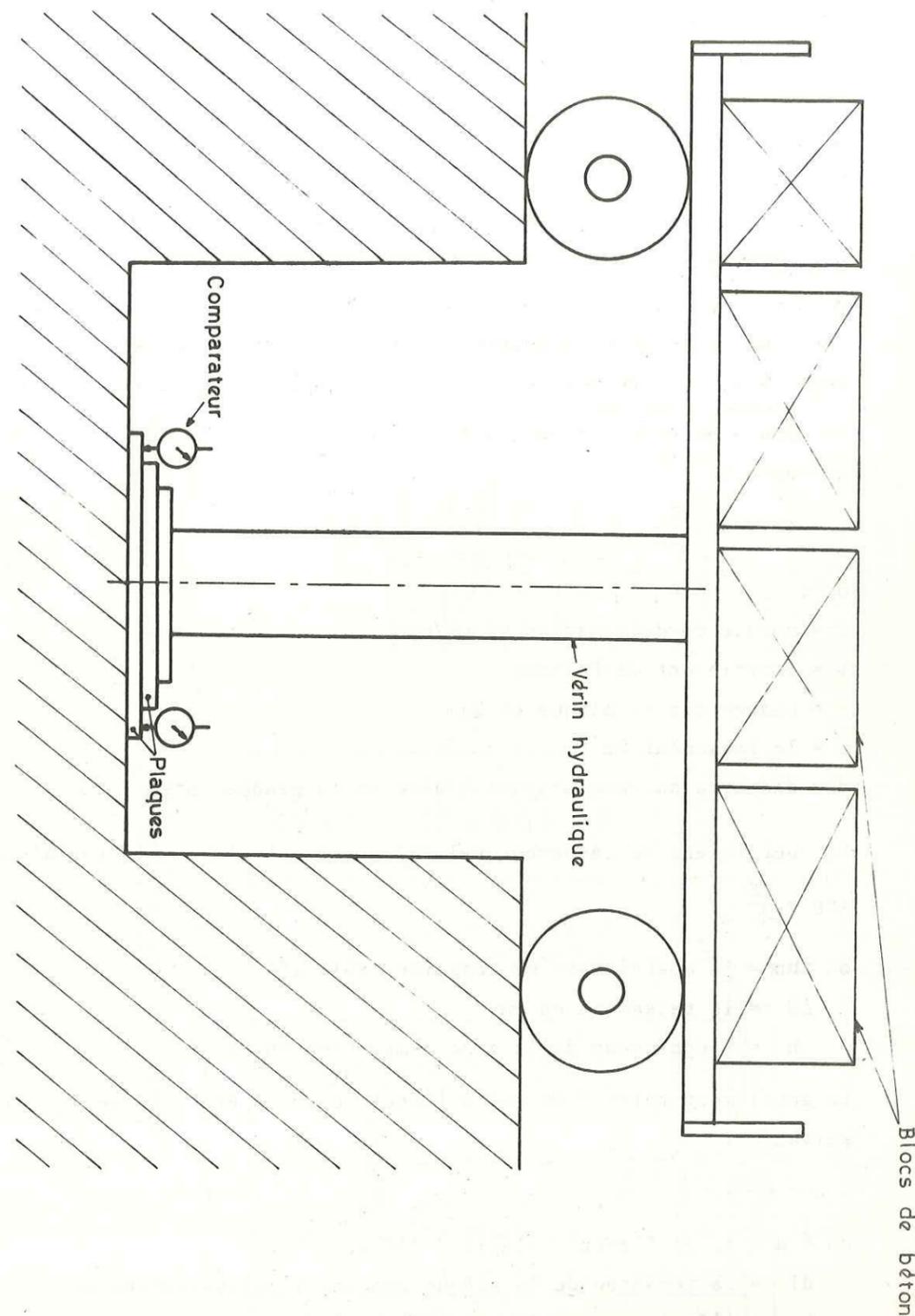
- . le sol à la teneur en eau naturelle,
- . le sol saturé d'eau pendant 1,5 à 15 jours avant l'essai et pendant celui-ci,
- . on a fait des essais sur le sol naturel, chargés progressivement jusqu'à 3 kg/cm<sup>2</sup>, qu'on a ensuite imbibé pendant 12 à 21 jours en conservant constante cette charge de 3 kg/cm<sup>2</sup>.

On a fait cette imbibition comme pour les essais de perméabilité. La pression sur le sol naturel a commencé avec une charge de 0,5 kg/cm<sup>2</sup>, puis s'est poursuivie en augmentant chaque fois de 0,5 kg/cm<sup>2</sup> et chaque étape de pression a duré environ 8 heures.

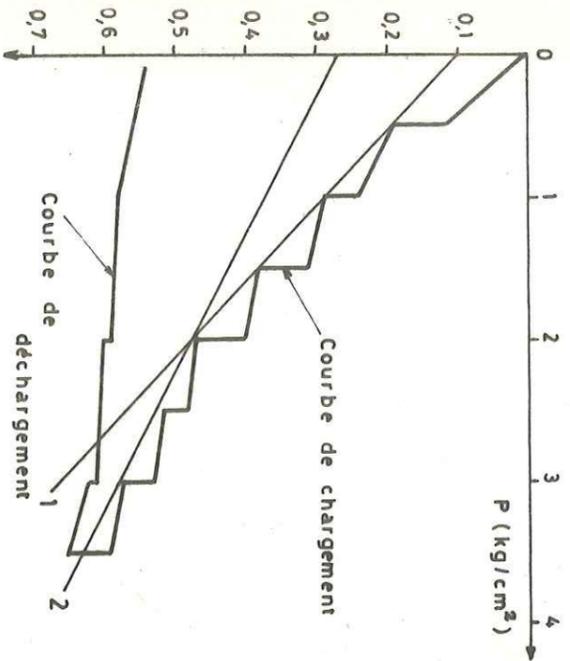
Pour le sol imbibé d'eau, nous avons commencé avec une charge de 0,25 kg/cm<sup>2</sup> et chaque fois on a augmenté de 0,25 kg/cm<sup>2</sup>. Nous avons arrêté à une pression comprise entre 3 et 4 kg/cm<sup>2</sup> au maximum. Lorsque le tassement

.../...

Schéma n° 4 - Principe d'un essai de plaques in situ



Tassement en fonction de la pression



Variation des tassements en fonction du temps de chargement par palier de pression

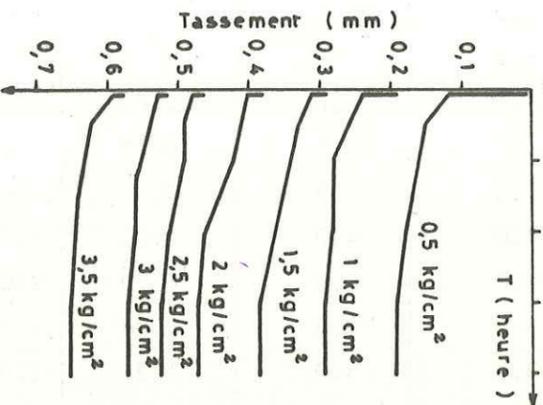


Tableau des résultats d'essais

P Pression (kg/cm²)	S Tassements (mm)		Total par palier de pression	Total cumulé	Durée d'essai (h)
	au moment du chargement	Pendant le chargement			
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,50	0,12	0,07	0,19	0,19	8,00
1,00	0,05	0,05	0,10	0,29	8,00
1,50	0,02	0,07	0,09	0,38	8,00
2,00	0,02	0,07	0,09	0,47	8,00
2,50	0,01	0,04	0,05	0,52	8,00
3,00	0,01	0,04	0,05	0,57	8,00
3,50	0,02	0,06	0,08	0,65	8,00
3,00	- 0,03	- 0,01	- 0,04	0,61	2,00
2,00	- 0,01	- 0,01	- 0,02	0,59	2,00
1,00	- 0,01	- 0,00	- 0,01	0,58	2,00
0,00	- 0,04	- 0,01	- 0,05	0,53	4,00

Calcul du module de déformation

$$P_1 = 10000 ; P_2 = 15000 \text{ kg} \quad S_1 = 0,047-0,01=0,037 \text{ cm}$$

$$S_2 = 0,057-0,027=0,03 \text{ cm}$$

$$E_1 = (1-\mu^2) \frac{P_1}{S_1 \cdot d} = (1-0,42^2) \frac{10000}{0,037 \cdot 79,8} = 2780 \text{ kg/cm}^2 \quad E_2 = (1-\mu^2) \frac{P_2}{S_2 \cdot d} = (1,0,42^2) \frac{15000}{0,03 \cdot 79,8} = 5150 \text{ kg/cm}^2$$

Déformation élastique : 0,65 - 0,53 = 0,12 mm

$\mu$  - Coefficient de Poisson

Puits n° 11

Les modules de déformation sont calculés pour deux couches

Profondeur : 4,0 m

était de l'ordre de 0,02 mm en 2 heures, on rajoutait des charges.

On a fait 12 essais à l'état naturel, 8 essais à l'état saturé, 5 essais saturés sous charges. Les emplacements des puits sont indiqués sur le schéma n°3 et dans plusieurs cas, les 3 types d'essais ont été faits au même endroit.

Pendant la durée de l'imbibition, on a mesuré le gonflement et aussi le coefficient de perméabilité du sol. Pour distinguer les profondeurs d'imbibition, on a creusé 2 puits, l'un à l'endroit où ont été faits précédemment les essais de plaque, et l'autre à une distance de 6 à 8 mètres du premier. On a retiré de nombreux échantillons aux mêmes profondeurs dans les deux puits et on a mesuré la teneur en eau. Après avoir comparé les résultats, on a pu mettre en évidence la profondeur d'imbibition.

Le module de déformation a été calculé par un graphique et par la formule suivante :

$$E = (1 - \nu) \frac{P}{s \cdot d}$$

où :

E = module de déformation en kg/cm<sup>2</sup>

$\nu$  = coefficient de Poisson

P = charge sur la plaque en kg

S = le tassement en cm

d = diamètre du cercle ayant l'aire de la plaque en cm.

Le coefficient du tassement relatif a été calculé par la formule suivante :

$$i_{np} = \frac{\Delta S}{h}$$

où  $i_{np}$  = le coefficient de tassement relatif

$\Delta S$  = le tassement en mm

h = l'épaisseur de la zone compressée en mm

Le gonflement relatif du sol à l'état normal a été calculé par la formule suivante :

$$\delta \mu = \frac{dl}{h}$$

où  $\delta \mu$  = le gonflement relatif à l'état naturel

dl = la remontée de la plaque pendant l'imbibition, en mm

h = l'épaisseur de la zone imbibée, en mm.

PROPRIETES MECANIQUES DES SOLS  
RESULTATS D'ESSAIS DE PLAQUE IN SITU

Tableau 12 - Etat naturel

N° du puits	Profondeur (m)	P. max (kg/cm <sup>2</sup> )	Tassement (mm)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	Gonflement (mm)	% particules <0,05mm	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
4	4,0	4,0	1,28	2040 (-3)	0,22	8	2,05
11	1,5	3,0	0,98	1630 (-3)	0,46	29	2,03
11	4,0	3,5	0,65	2780(0,5-2)	0,12	16	2,14
11	6,0	4,0	0,66	3600(0,5-2,5)	0,28	13	2,19
12	1,5	3,0	0,97	2130(0,5-3)	-	13	2,12
12	4,0	3,0	0,83	2900(0,5-3)	-	15	2,18
12	6,0	3,0	0,29	7700(0,5-3)	-	10	2,25
20	4,0	3,5	0,82	2900(0,5-2)	0,17	18	2,16
20	6,0	4,0	1,03	3220 (1-4)	0,31	14	2,21
84	2,0	3,0	0,79	2100 (0-3)	0,40	-	2,10
87	3,0	3,0	0,38	4050 (-3)	-	-	2,18
109	3,0	3,0	1,34	1150 (-3)	-	64	1,74

PROPRIETES MECANIQUES DES SOLS  
RESULTATS D'ESSAIS DE PLAQUE IN SITU

Tableau 12 bis - Submersion sous une charge de 3 kg/cm<sup>2</sup>

N° du puits	Profondeur (m)	P. max. (kg/cm <sup>2</sup> )	Tassement (mm)	E (kg/cm <sup>2</sup> )	Gonflement (mm)	Durée submersion (h)	Profondeur d'imbibition (m)	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficient de perméabilité (m/j)	% particules <0,05mm
11	2,0	3,0	0,96 0,32+	2850	0,35	288	2,1	2,13	0,022	21
11	7,0	3,0	0,23 0,40+	6770	0,11	336	2,3	2,21	0,021	12
20	4,5	3,0	0,60 0,18+	3930	0,12	352	3,1	2,20	0,029	14
87	3,0	3,0	0,38 0,26+	4050	0,11	522	2,1	2,18	-	-
109	3,0	3,0	1,34 0,50+	1150	0,04	288	1,80	1,74	0,009	64
Après submersion pendant plusieurs jours										
12	1,5	3,0	3,45	725	-	36	-	2,12	-	13
12	4,0	3,0	1,24	2790	-	36	-	2,18	-	15
12	6,0	3,0	3,39	2110	-	36	-	2,25	-	10
11	4,0	3,0	0,15	1700	0,21	336	1,4	2,14	0,037	16
20	6,0	3,0	0,87	2400	0,13	312	3,0	2,21	0,042	14
84	2,0	3,0	2,17	1120	0,61	312	2,30	2,10	0,062	-
87	3,1	4,5	0,34	6500	0,21	360	2,4	2,18	0,050	-
109	3,0	3,0	1,76	880	0,37	336	1,0	1,74	0,008	64
+ Tassements après submersion										

PROPRIETES MECANIQUES DES SOLS  
RESULTATS D'ESSAIS DE CISAILLEMENT IN SITU

Tableau 13 - Durée d'imbibition : 5 jours

N° du puits	Profondeur (m)	$\varphi$ (°)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficient de perméabilité (m/j)	% particules < 0,05 mm
11	4,0	25	0,97	2,14	0,09	16
12	1,5	28	0,47	2,12	0,11	13
12	4,0	28	1,10	2,18	0,01	15
12	6,0	20	1,28	2,25	0,02	10
20	6,0	18	1,51	2,21	0,04	14
84	2,0	30	0,60	2,10	0,075	-
87	3,1	31	0,61	2,18	0,046	-

PROPRIETES MECANIQUES DES SOLS  
RESULTATS D'ESSAIS DE CISAILLEMENT IN SITU

Tableau 13 bis - Etat naturel

N° du puits	Profondeur (m)	$\varphi$ (°)	C (kg/cm <sup>2</sup> )	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	% particules < 0,05 mm
4	4,0	27	1,25	2,05	8
11	1,5	29	1,26	2,03	29
11	2,0	27	1,38	2,13	21
11	4,0	17	1,53	2,14	16
11	6,0	16	1,50	2,19	13
12	1,5	26	0,92	2,12	13
12	4,0	23	1,23	2,18	15
12	6,0	17	1,68	2,25	10
20	2,0	24	1,49	2,11	16
20	4,0	18	1,84	2,16	18
20	6,0	18	1,90	2,21	14
84	2,0	26	1,60	2,10	-
87	3,0	17	2,75	2,18	-
87	2,0	22	2,92	2,20	-

Les résultats sont inscrits dans le tableau n° 12 et ils sont interprétés dans le paragraphe des caractéristiques mécaniques des alluvions de la plaine de Tabasse.

#### 5 - Essais de cisaillement

Ces essais ont été faits pour déterminer la cohésion et l'angle de frottement interne. On a fait tous ces essais aux mêmes endroits que les essais de plaques. Ils consistent en cisaillement d'un prisme dans le sol, et les pressions horizontales ont été réalisées par un cric de 25 tonnes. Les pressions ont été mesurées au manomètre, les coordonnées de la surface de cisaillement ont été calculées au moyen de toutes les mesures. La cohésion et l'angle de frottement sont calculés selon la formule classique. Ces essais ont été faits sur le sol à l'état naturel ; pour les sols imbibés d'eau, on a saturé le sol avant les essais pendant 5 jours, jusqu'au moment où on a obtenu une saturation complète. Au moment de l'imbibition, on a profité de cette expérience pour mesurer le coefficient de perméabilité. Les résultats obtenus sont inscrits dans le tableau n° 13.

On peut conclure que les alluvions de pente ont une cohésion assez élevée. On a interprété ces résultats dans le paragraphe des caractéristiques mécaniques des alluvions de la plaine de Tabasse.

#### 6 - Mesure de perméabilité in situ

Pour ce facteur, on a utilisé la méthode du Professeur BOULDRON. On a fait ces essais pour calculer le coefficient de perméabilité des couches supérieures au niveau des nappes phréatiques.

Nous avons fait ces essais dans différentes profondeurs de puits variant de 0,3 à 11 m au maximum. C'est ainsi qu'on a pu calculer les coefficients de perméabilité dans différentes couches de terrains et dans différentes zones où se sont déposées les alluvions. Pour ces essais, on a eu besoin de deux bacs gradués dont le volume est de 50 l environ l'un. Ils sont accompagnés d'un robinet et d'un tube. Le fond du puits se situe au niveau de la couche que nous voulons étudier.

Nous avons placé au fond de ce puits un cylindre métallique dont la hauteur et le diamètre sont de 20 cm et nous l'avons fixé de telle sorte qu'il pénètre de 5 cm environ dans la terre. Nous avons installé un tube de plastique fixé au bac dans ce cylindre et nous avons commencé l'expérience.

.../...

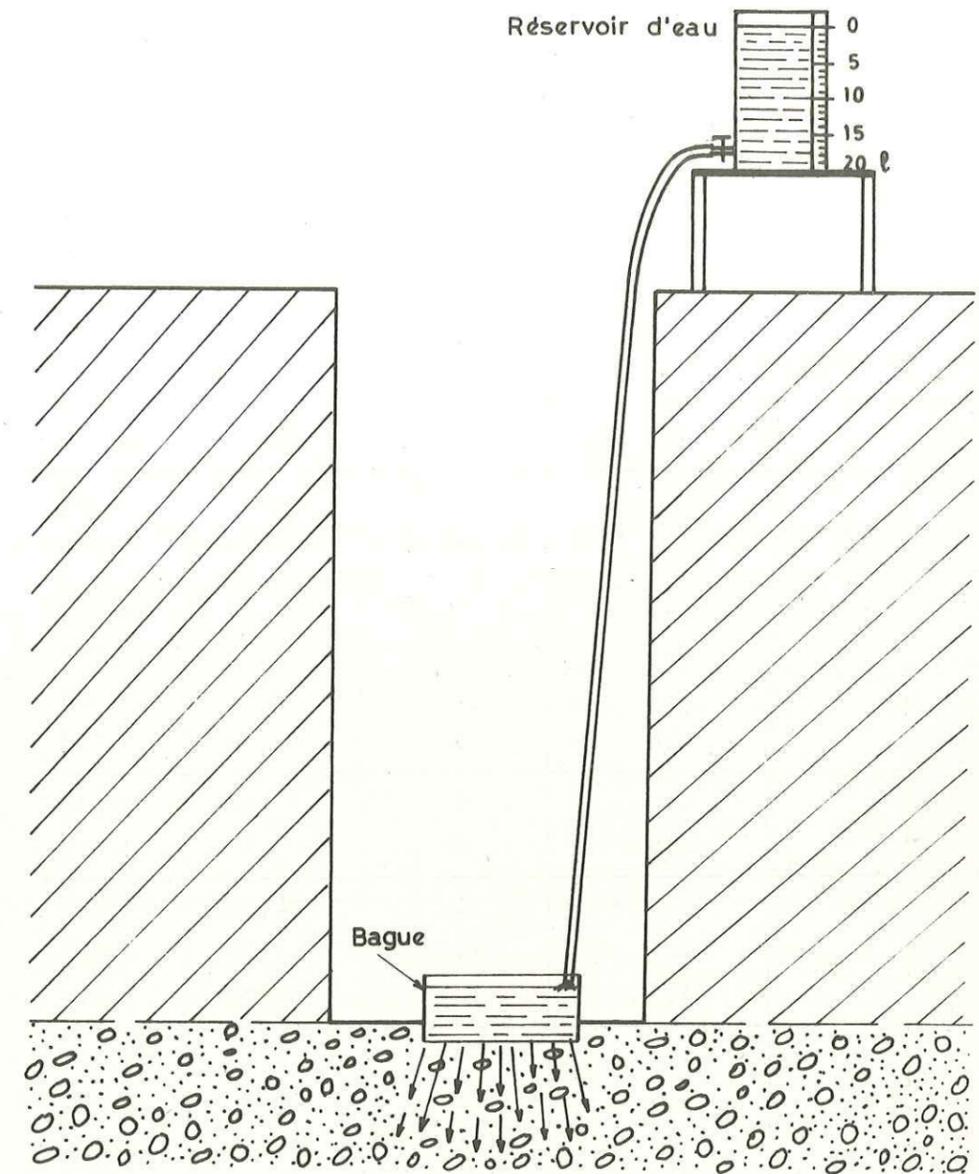


Schéma n°5 - Essai de perméabilité in situ



Tableau 14 - Résultats d'essais de perméabilité in situ

N° du puits	Profondeur (m)	Durée d'essais (h)	Débit (l/h)	K (m/j)
3	0,3	10	18,65	2,240
	2,0	12	3,33	0,400
	4,2	9	0,31	0,035
4	0,3	30	0,86	0,102
	2,5	12	5,60	0,570
8	2,0	9	3,12	0,375
	4,0	11	20,44	2,450
12	1,0	8	9,75	0,491
	2,0	4	3,58	0,070
	4,0	2	0,85	0,026
	6,0	4	3,20	0,150
35	1,0	6	12,00	0,530
	2,95	6	0,50	0,025
44	1,0	11	24,50	7,940
	2,4	11	7,07	0,850
	4,3	10	8,70	1,040
45	1,5	10	13,1	1,57
	3,3	32	0,18	0,018
	4,4	34	0,44	0,051
46	2,5	27	1,42	0,17
	5,0	11	0,62	0,07
47	2,0	41	0,44	0,048
48	2,2	25	0,93	0,11
49	1,0	10	2,20	0,265
	4,0	8	1,53	0,184
50	1,0	6	12,50	1,49
	2,1	19	2,45	0,29
	4,3	23	1,25	0,14
	10,0	10	3,00	0,36

70	1,1	5	2,0	0,064
	2,15	5	4,0	0,11
	3,0	5	1,0	0,032
	5,25	5	0,5	0,029
105	1,0	3	5,0	0,26
	2,1	6	15,0	0,69
	3,8	6	2,0	0,10
107	1,0	8	36,5	1,46
	2,0	4	12,5	0,42
	3,0	6	9,16	0,35
	5,5	5	9,16	0,35
109	1,0	5	11,2	0,52
	1,44	5	6,8	0,35
	3,05	5	1,9	0,01
85	1,1	4	5,0	0,22
86	2,5	4	0,3	0,01
95	3,9	72	0,043	0,005
96	0,4	30	5,07	0,59
	1,6	34	1,76	0,20
	2,5	34	4,58	0,55
	4,6	46	0,34	0,04
99	0,7	5	4,1	0,18
	2,0	5	20,0	0,86
	6,0	5	19,0	0,92
111	1,0	34	7,55	0,90
	1,33	32	1,71	0,20
	1,40	27	1,72	0,20
	4,40	19	1,22	0,15
	7,40	10	5,5	0,66
112	1,0	4	60,6	8,10
	3,0	12	1,34	0,16
	4,5	9	6,3	0,77
	7,4	20	4,0	0,50
113	1,95	4	0,25	0,26
	3,0	6	1,5	0,08
	4,0	5	3,4	1,80

121	0,7	4	5,6	0,28
	1,5	4	2,4	0,10
	3,0	4	2,1	0,09
114	1,2	5	59,0	2,76
	2,1	4	3,3	0,15
	3,1	4	25,6	1,21
	5,7	4	1,0	0,07
115	1,0	8	12,7	1,53
	2,4	12	6,4	0,77
	4,4	12	2,56	0,31
	11,0	17	2,8	0,34
116	1,0	11	5,7	0,68
	1,7	10	0,53	0,05
	3,9	10	2,2	0,26
	7,0	12	2,0	0,24
117	1,5	20	3,23	0,375
	2,5	26	0,65	0,073
	4,4	12	6,3	0,76
	10,0	13	2,1	0,24
118	0,8	5	18,0	1,19
	1,45	5	123,0	4,80
	2,5	5	23,0	1,13
	4,0	3	1,0	15,0
128	0,8	5	5,3	0,26
	3,0	5	0,5	0,025
286	2,4	57	0,2	0,024
123	0,8	5	5,3	0,26
	3,0	5	0,5	0,025
287	1,1	2	1254,0	150,0
289	1,5	34	6,5	0,78
294	1,1	33	7,0	0,84
300	1,9	31	1,74	0,203

On a toujours essayé de garder le niveau d'eau à 10 cm dans le bac. On a noté le volume d'eau que la terre absorbait par 1/2 heure, puis on a continué l'expérience jusqu'à ce que la terre absorbe un débit d'eau constant pendant 2 heures de suite. Nous avons utilisé 6 à 8 heures pour chaque essai, sauf dans certains cas où il faut plus de temps. Pendant toute l'expérience, on a mesuré le volume d'eau évaporée et à la fin de celle-ci on a retranché ce volume à celui de l'eau filtrée. La fonction  $K = \frac{Q}{F}$  donne la perméabilité où :

Q = volume d'eau filtrée dans le sol en m<sup>3</sup>/jour pendant les deux dernières heures de l'expérience,

F = l'aire du bas du cylindre, en m<sup>2</sup>

K = perméabilité, en m/jour.

La figure n° 5 nous décrit le schéma de l'essai.

Les résultats nous montrent que la perméabilité de ces alluvions est assez faible et, d'après les essais de granulométrie, on a remarqué que ces alluvions contenaient néanmoins 60 à 65 % de graviers et de cailloux. On peut dire que ce phénomène est dû au remplissage des espaces vides entre les cailloux par des silts argileux, ce qu'on peut voir d'après les résultats de granulométrie des différents puits.

Pour déterminer les caractéristiques hydrogéologiques des nappes phréatiques situées dans le lit majeur du Zayendeh-Roud et les régions avoisinantes et dans le Sud des plaines de Tabasse et de Rise, on a fait 53 essais de pompage et d'injection par la méthode classique.

On a interprété ces résultats dans le paragraphe "Hydrogéologie de la région étudiée".

CHAPITRE VII

VII - SYNTHESE DES RESULTATS  
PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES ALLUVIONS  
DE LA PLAINE DE TABASSE

I - PROPRIETES PHYSIQUES DES ALLUVIONS DE LA PLAINE  
DE TABASSE

- 1 - Granulométrie
- 2 - Poids spécifique
- 3 - Poids volumique
- 4 - Plasticité
- 5 - Teneur en eau et degré de saturation
- 6 - Pétrographie
- 7 - Porosité et indice des vides
- 8 - Salinité et influence de la corrosion

II - CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES ALLUVIONS DE LA  
PLAINE DE TABASSE

- 1 - Module de déformation
- 2 - Cohésion et angle de frottement interne

CONCLUSIONS

VII - SYNTHESE DES RESULTATS

PROPRIETES PHYSIQUES ET MECANIQUES DES ALLUVIONS DE  
LA PLAINE DE TABASSE

Dans le présent chapitre, nous précisons les caractéristiques de géologie de l'ingénieur des alluvions de la plaine de Tabasse.

I - PROPRIETES PHYSIQUES DES ALLUVIONS DE LA PLAINE DE TABASSE

Cette plaine est semblable aux autres plaines et piémonts qui sont bien développés en Iran. Les sédiments sont formés de matériaux grossiers angulaires et semi-arrondis avec un faible pourcentage de matériaux fins apportés par les torrents saisonniers.

Du fait de l'existence de la rivière Zayendeh-Roud qui est située dans le Sud de la zone et qui est le lieu de confluence de tous les torrents, on ne peut trouver de région à nette prédominance de matériaux fins. Nous avons seulement rencontré quelques lentilles argilo-silteuses dans le Sud de la plaine de Tabasse et beaucoup plus dans la plaine de Rise, intercalées avec les couches de matériaux grossiers.

Les cartes n° 5, 6, 7 et 8 et les graphiques n° 2, 3, 4, 8 et 16 donnent les variations des caractéristiques physiques moyennes dans la tranche des 5-6 premiers mètres de terrains. Ces caractéristiques sont la granulométrie, le poids volumique et l'indice des vides.

En utilisant les résultats des puits les plus profonds situés au centre de la plaine de Tabasse (20 à 22,5 m), on a établi des graphiques montrant les changements de caractéristiques des alluvions avec la profondeur (graphiques n° 5, 6, 7, 9 et 15). L'altitude la plus haute des puits est de 1800,76 m, elle correspond au puits n° 60 situé au Nord de la plaine, et l'altitude la plus basse est de 1717,39 m, elle correspond au puits n° 236 situé au Sud-Est de la plaine.

Nous avons reporté ces caractéristiques en fonction de l'altitude à laquelle ces échantillons ont été prélevés. A première vue, le choix de l'altitude peut paraître illogique ; cependant, si on considère que le mode de dépôt des alluvions dans les zones de piémonts dépend de l'élévation par rapport au niveau de base représenté par la plaine, on constate que l'altitude est un critère représentatif du mode de dépôt. Bien entendu, pour comparer entre elles diverses zones de piémonts, il faudra tenir compte des altitudes absolues des niveaux de base correspondants.

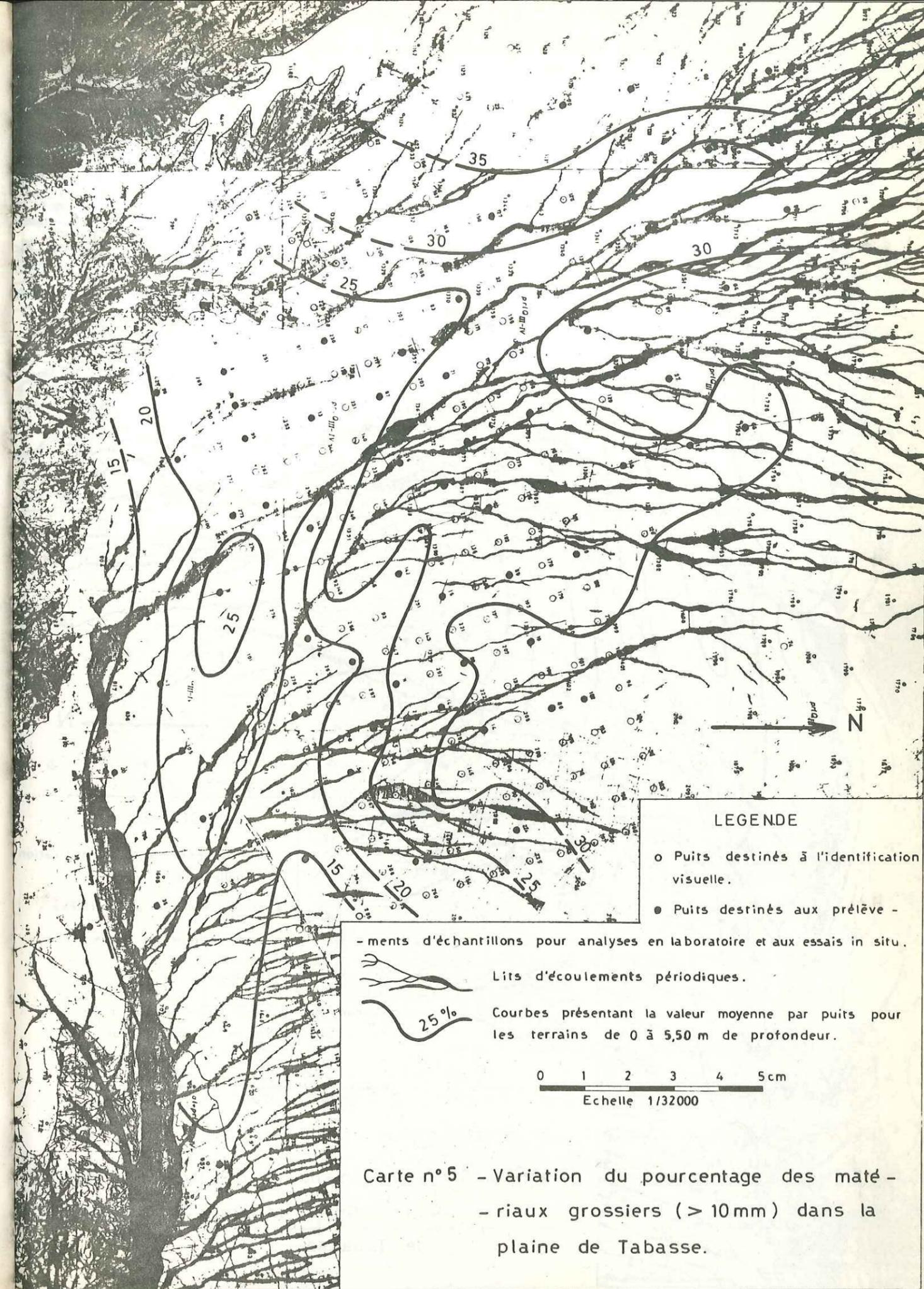
### 1 - Granulométrie

La variation de granulométrie dans la plaine de Tabasse est la suivante pour les 5-6 premiers mètres : le pourcentage des matériaux dont les dimensions sont supérieures à 10 mm (cailloux) est de 30 % environ dans la partie Nord (44 % dans le puits n° 32, ce qui est le maximum). Ce pourcentage diminue quand on va du piémont vers la plaine, et au centre il est de 20 à 25 %. Dans la partie inférieure, il diminue jusqu'à 15 % et son minimum est de 7,5 % dans le puits n° 43. Les cartes n° 5 et 6 montrent ces variations de granulométries.

Le pourcentage des matériaux dont le diamètre est supérieur à 2 mm, c'est-à-dire plus grand que le sable, varie de la même façon que le pourcentage des cailloux. Le pourcentage des matériaux fins dont les diamètres sont inférieurs à 2 mm (sable, silt, argile) est maximum dans la partie Sud et Sud-Est, où il forme le principal sédiment. Ce pourcentage est supérieur à 50 % et dans le puits n° 43 il est de l'ordre de 77 %. Le minimum est dans la partie Nord de la plaine (inférieur à 35 %) et dans le puits n° 60 (plus au Nord) il est de l'ordre de 32,2 %. Ces matériaux remplissent les espaces vides des matériaux grossiers et ils jouent un rôle de ciment de telle façon que les matériaux sont assez durs et que dans les puits faits à la main, on ne voit jamais d'effondrements de parois ; ce ciment n'est pas résistant aux suintements d'eau.

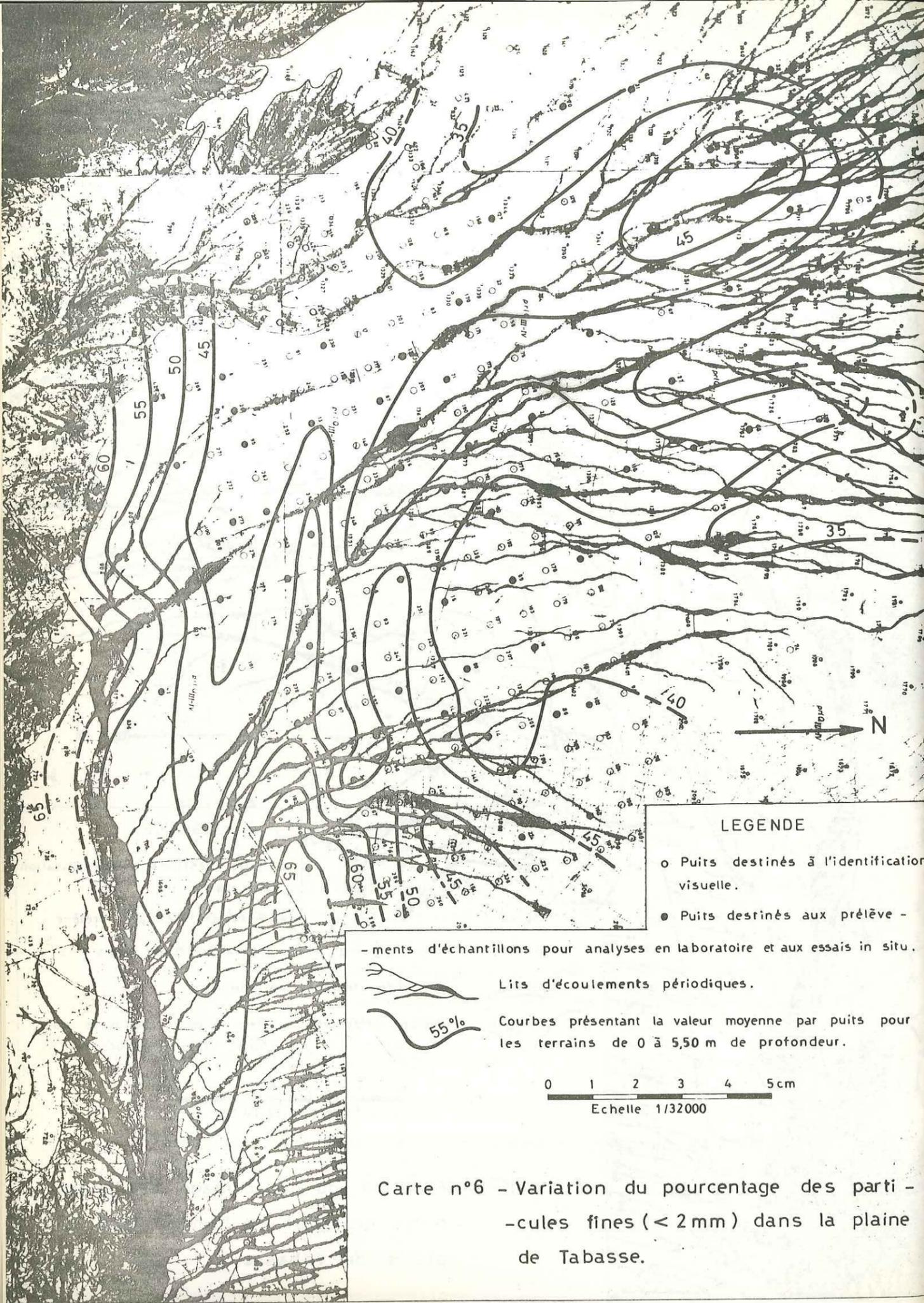
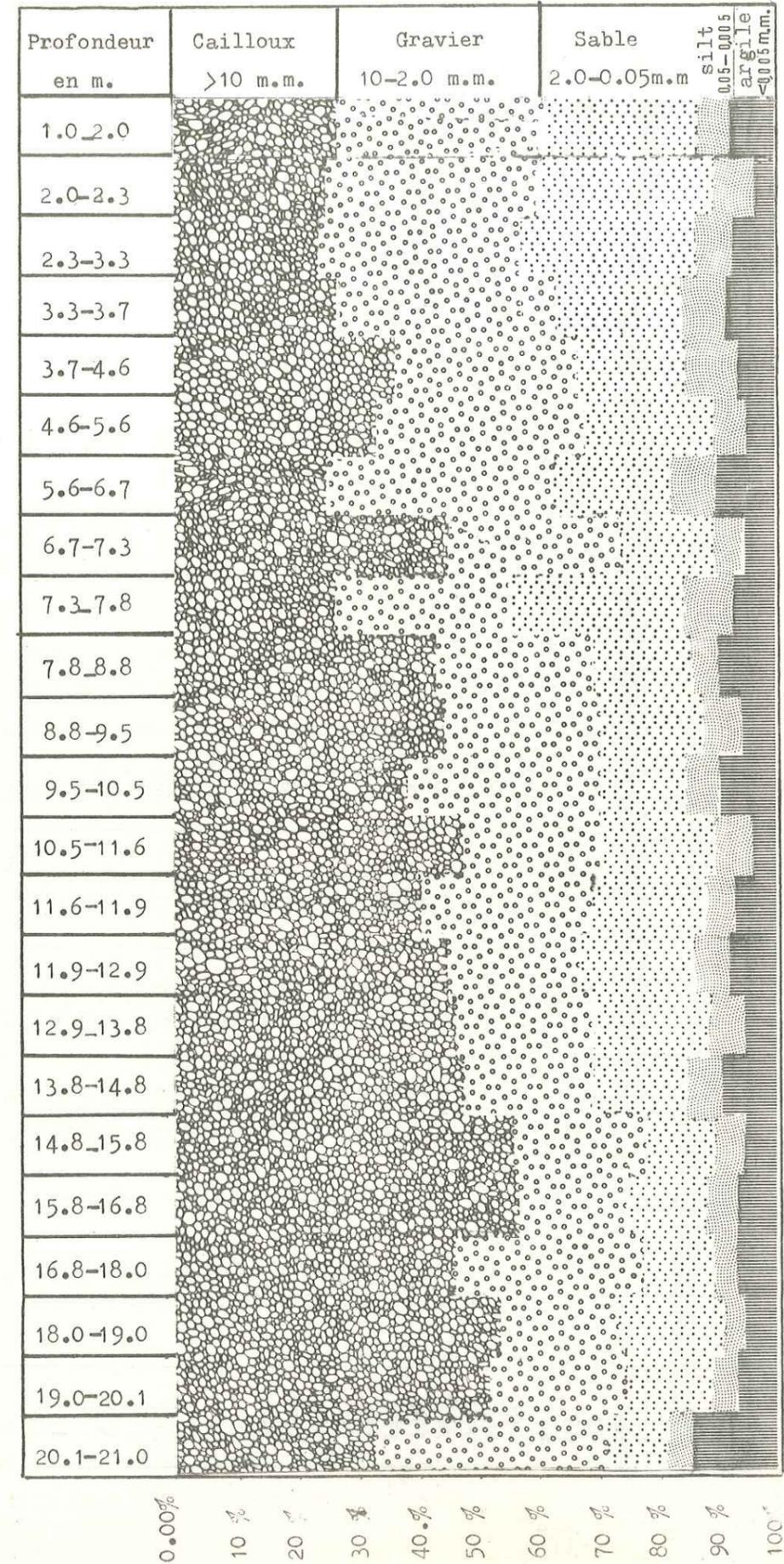
Dans la plaine de Tabasse, en faisant les puits, on a rencontré un conglomérat en forme de lentilles. Le creusement des puits en a été rendu plus difficile.

.../...



Coupe schématique n° 6

Variation des pourcentages des divers matériaux rencontrés dans le puits n° 12.



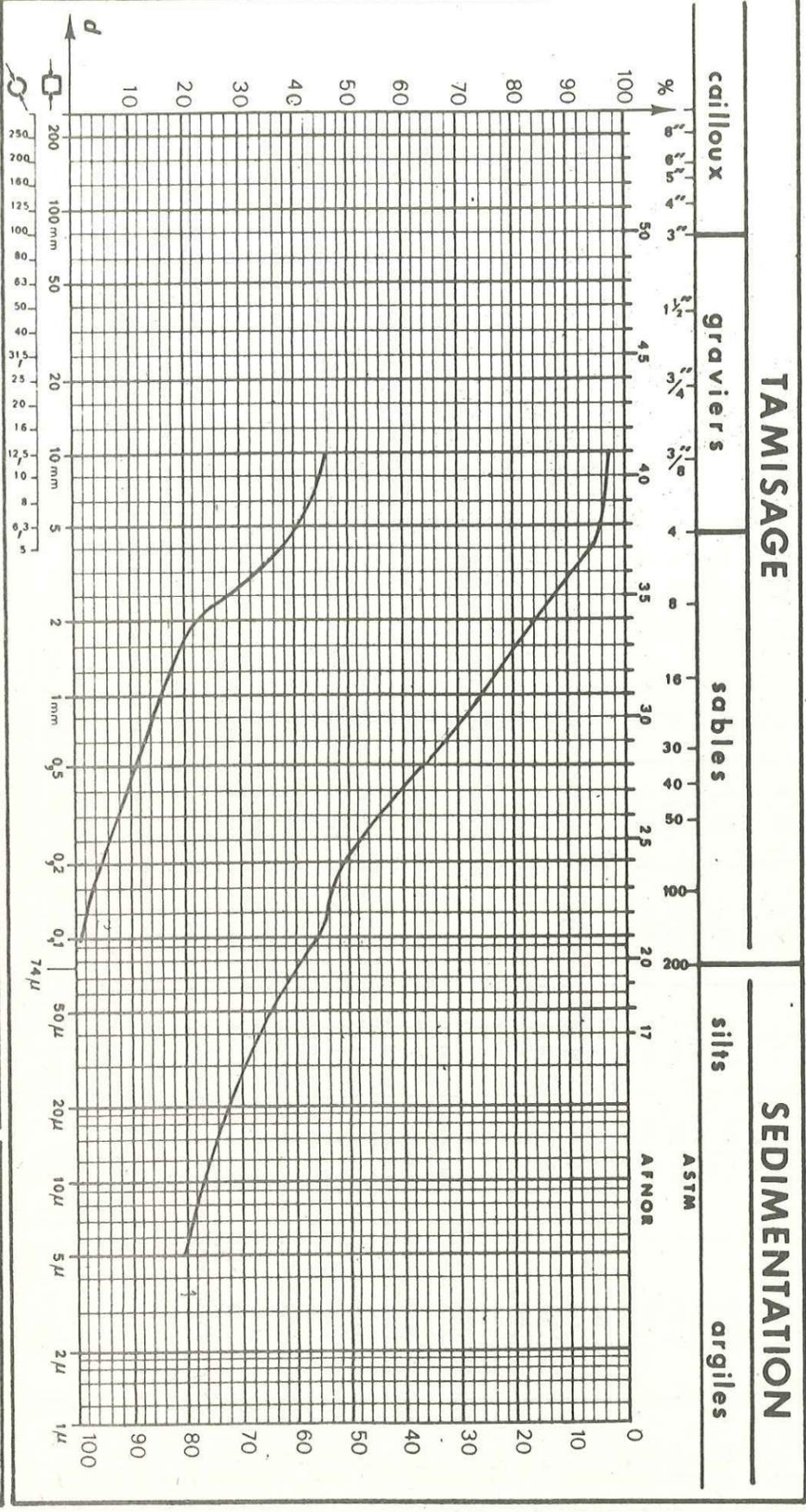
PROPRIETES PHYSIQUES DES SOLS

Tableau 15 - Moyennes des résultats par puits

N° du puits	Profondeur (m)	Altitude (m)	Granulométrie					$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	e	IP	S
			>10 mm	10-2 mm	<2 mm	2-0,05 mm	<0,05 mm				
60	8,25	1800,76	34,5	32,3	33,2	18,5	14,7	2,32	0,16	43	0,54
32	23,50	1797,58	44,4	21,4	34,2	15,0	19,2	2,13	0,25	39	0,46
58	10,0	92,75	27,3	28,5	44,2	19,8	24,4	2,15	0,26	45	0,46
65	18,10	88,57	27,6	31,1	43,2	24,4	18,8	2,28	0,18	36	0,57
124	19,40	86,64	29,0	23,8	47,2	17,2	30,0	2,13	0,28	45	0,50
64	10,10	83,72	32,4	28,2	39,4	22,2	17,2	2,14	0,26	41	0,40
27	20,00	78,56	32,6	31,8	35,6	18,4	17,2	2,19	0,22	39	0,53
24	23,70	78,23	27,7	27,0	45,3	22,6	22,7	2,13	0,25	40	0,51
196	25,0	77,48	33,2	25,0	41,8	22,0	19,8	2,13	0,26	22	0,67
119	9,30	74,98	28,5	28,1	43,3	21,7	21,6	2,27	0,18	40	0,69
182	19,0	72,52	30,4	27,8	41,8	19,6	22,2	2,11	0,30	33	0,61
29	10,90	71,11	28,0	34,7	37,3	20,0	17,3	2,14	0,24	44	0,44
71	14,90	70,82	30,7	29,8	39,5	22,0	17,5	2,14	0,26	36	0,43
127	8,40	68,73	34,1	28,3	38,2	22,2	16,0	2,23	0,23	40	0,39
224	22,90	65,93	26,0	24,3	49,9	22,3	27,6	1,99	0,34	29	0,55
19	6,10	65,35	30,8	32,2	37,0	19,8	17,2	2,15	0,25	39	0,36
26	9,90	64,89	29,6	29,0	41,4	23,3	18,1	2,16	0,25	34	0,35
170	9,90	63,25	24,3	34,6	40,7	24,0	16,7	2,14	0,27	32	0,59
20	5,80	61,23	28,4	32,8	38,8	22,6	16,2	2,16	0,24	40	0,40
21	5,90	60,57	29,0	32,6	38,4	23,6	14,8	2,15	0,26	41	0,40
133	6,00	58,48	23,2	35,5	41,3	26,3	15,0	2,15	0,27	25	0,54
9	5,80	58,29	29,8	26,6	43,6	25,6	18,0	2,06	0,25	31	0,51
31	9,80	75,71	38,0	27,0	35,0	18,6	16,4	2,16	0,24	42	0,42
135	37,00	57,78	26,4	32,0	41,6	25,0	16,6	2,16	0,27	24	0,51
14	6,00	57,05	35,0	28,0	37,2	20,0	17,2	2,12	0,26	37	0,50
15	5,80	56,28	29,8	32,8	37,4	23,9	13,5	2,15	0,24	47	0,41
16	6,00	54,66	29,2	34,2	36,6	24,1	12,5	2,12	0,27	41	0,31
230	5,95	54,63	22,5	33,5	44,0	26,5	17,5	2,06	0,30	29	0,59
144	6,00	53,44	27,5	29,2	43,8	24,8	19,0	2,10	0,26	31	0,56

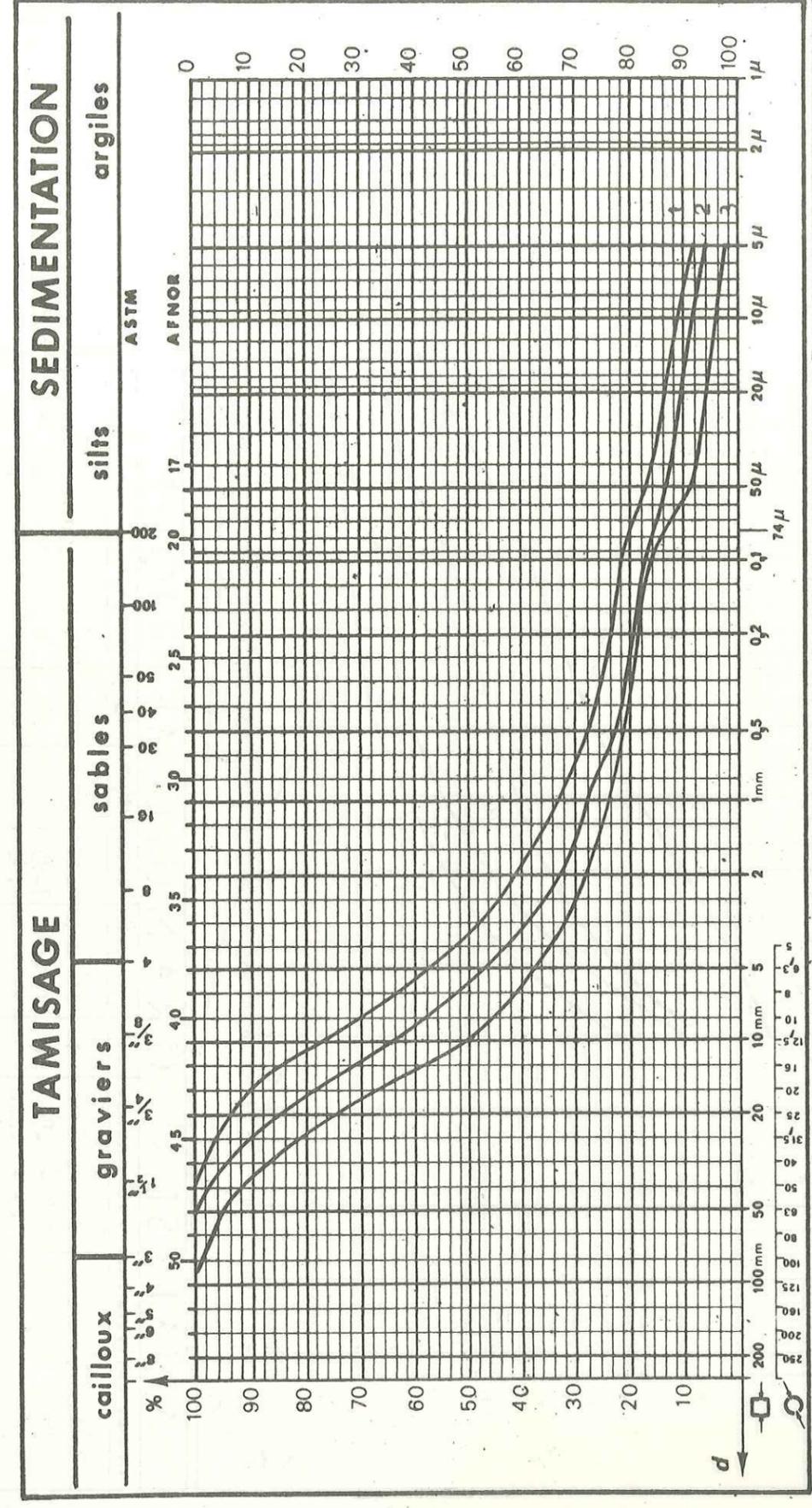
140	44,00	53,28	23,6	36,0	41,0	26,0	15,0	2,14	0,26	29	0,47
142	26,00	52,47	22,4	31,4	46,2	26,0	20,2	2,08	0,29	33	0,54
153	45,80	51,75	23,8	28,6	47,6	24,0	23,6	2,03	0,33	28	0,59
12	5,80	48,77	29,6	33,7	36,7	23,6	13,1	2,16	0,25	38	0,41
11	5,95	48,72	26,2	26,6	47,2	28,0	19,2	2,10	0,27	38	0,48
261	5,70	48,40	21,7	35,0	43,3	26,3	17,0	2,14	0,27	24	0,55
148	15,00	47,84	17,7	30,7	51,6	28,6	23,0	2,11	0,26	29	0,62
7	14,80	46,50	23,8	32,8	43,4	27,3	16,1	2,18	0,23	31	0,37
150	15,00	46,22	19,5	35,7	44,8	24,0	20,8	2,09	0,27	30	0,55
151	15,00	46,08	21,6	34,6	43,8	25,8	18,0	2,07	0,30	31	0,62
286	15,00	49,33	28,5	25,7	45,8	25,3	20,5	1,99	0,45	32	0,47
241	15,00	45,47	-	-	-	-	-	2,15	0,25	-	-
4	15,00	44,19	21,6	31,4	47,0	37,0	10,0	2,04	0,30	45	0,36
6	14,80	43,57	19,2	27,8	53,0	28,0	25,0	2,01	0,33	34	0,58
5	14,60	42,85	24,0	32,0	44,0	28,7	15,3	2,04	0,31	39	0,44
287	14,70	42,39	11,5	25,7	62,8	38,8	24,0	1,82	0,48	22	0,56
3	11,90	41,25	27,3	30,7	42,0	25,4	16,6	2,10	0,27	36	0,30
279	5,50	39,68	19,2	27,6	53,0	25,6	27,4	2,04	0,31	26	0,61
288	12,00	39,64	14,0	33,5	52,5	37,5	15,0	1,95	0,32	29	-
43	11,00	38,09	7,5	15,5	77,0	34,0	43,0	1,82	0,48	24	0,45
1	20,00	37,15	14,6	17,4	68,0	25,5	42,5	1,88	0,42	36	0,44
38	15,00	32,40	21,4	29,8	48,8	38,2	10,6	2,08	0,27	32	0,34
40	19,70	30,80	18,1	28,7	53,2	41,9	11,3	1,98	0,37	29	0,41
234	5,50	26,56	12,0	16,0	73,0	40,0	33,0	1,87	0,44	23	0,56
352	51,00	20,58	9,0	34,6	56,4	44,0	12,4	1,86	0,43	28	0,40
236	6,00	17,39	14,4	24,2	61,4	37,2	24,2	1,86	0,44	25	0,58

ANALYSE GRANULOMETRIQUE																													
LIEU DE PRELEVEMENT	PROFONDEUR	N°	CLASSE	W%	W <sub>L</sub> %																								
Tabasse n° 333	0.5 - 5.0 m	1	cailloux	-	-																								
"	12.0 - 15.0 m	2	cailloux	-	-																								
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">NATURE</th> <th style="width: 10%;">REMARQUES</th> <th style="width: 10%;">W%</th> <th style="width: 10%;">W<sub>L</sub>%</th> <th style="width: 10%;">I<sub>p</sub>%</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Course moyenne 3 échant.</td> <td></td> <td>3.62</td> <td>67</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>"</td> <td></td> <td>4.21</td> <td>71</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>"</td> <td></td> <td>7.58</td> <td>70</td> <td>-</td> </tr> </tbody> </table>						NATURE	REMARQUES	W%	W <sub>L</sub> %	I <sub>p</sub> %	Course moyenne 3 échant.		3.62	67	-	"		4.21	71	-	"		7.58	70	-				
NATURE	REMARQUES	W%	W <sub>L</sub> %	I <sub>p</sub> %																									
Course moyenne 3 échant.		3.62	67	-																									
"		4.21	71	-																									
"		7.58	70	-																									
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 20%;">LIEU DE PRELEVEMENT</th> <th style="width: 20%;">PROFONDEUR</th> <th style="width: 10%;">N°</th> <th style="width: 10%;">CLASSE</th> <th style="width: 10%;">W%</th> <th style="width: 10%;">REMARQUES</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Puits n° 20</td> <td>1.5 - 5.2m.</td> <td>1</td> <td>cailloux</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>"</td> <td>5.2 - 9.7m.</td> <td>2</td> <td>"</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>"</td> <td>15.1 - 20.0m.</td> <td>3</td> <td>"</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>						LIEU DE PRELEVEMENT	PROFONDEUR	N°	CLASSE	W%	REMARQUES	Puits n° 20	1.5 - 5.2m.	1	cailloux			"	5.2 - 9.7m.	2	"			"	15.1 - 20.0m.	3	"		
LIEU DE PRELEVEMENT	PROFONDEUR	N°	CLASSE	W%	REMARQUES																								
Puits n° 20	1.5 - 5.2m.	1	cailloux																										
"	5.2 - 9.7m.	2	"																										
"	15.1 - 20.0m.	3	"																										
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr> <td colspan="2">AFFAIRE :</td> <td>Date:</td> </tr> </table>						AFFAIRE :		Date:																					
AFFAIRE :		Date:																											



Courbes granulométriques des deux faciès principaux des alluvions du lit majeur de la rivière Zayendeh-Roud.

Variation de la granulométrie avec la profondeur dans la plaine de Tabasse (Puits n° 20)

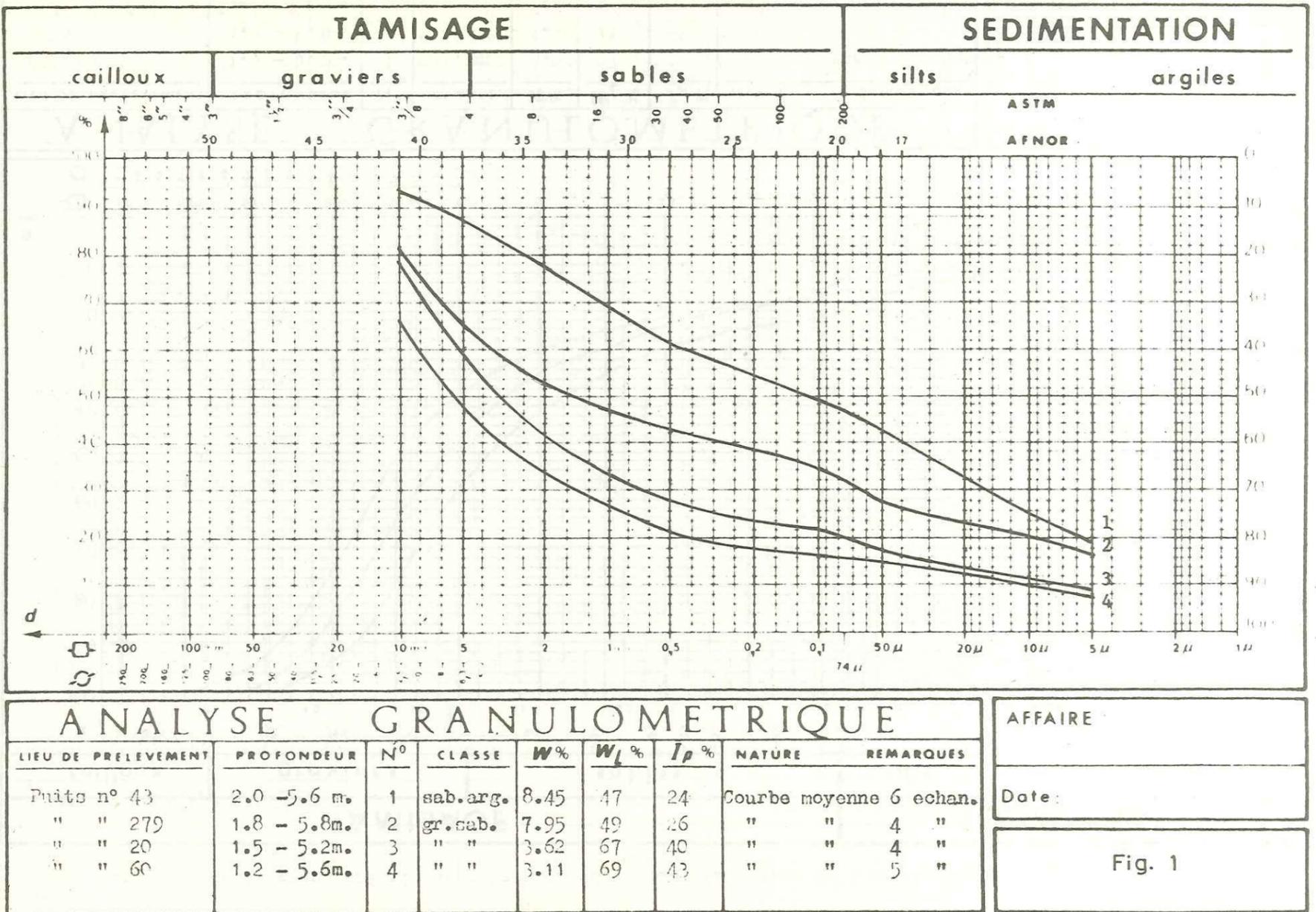


ANALYSE GRANULOMETRIQUE					
LIEU DE PRELEVEMENT	PROFONDEUR	N°	CLASSE	W%	REMARQUES
Puits n° 20	1.5 - 5.2m.	1	cailloux		
"	5.2 - 9.7m.	2	"		
"	15.1 - 20.0m.	3	"		

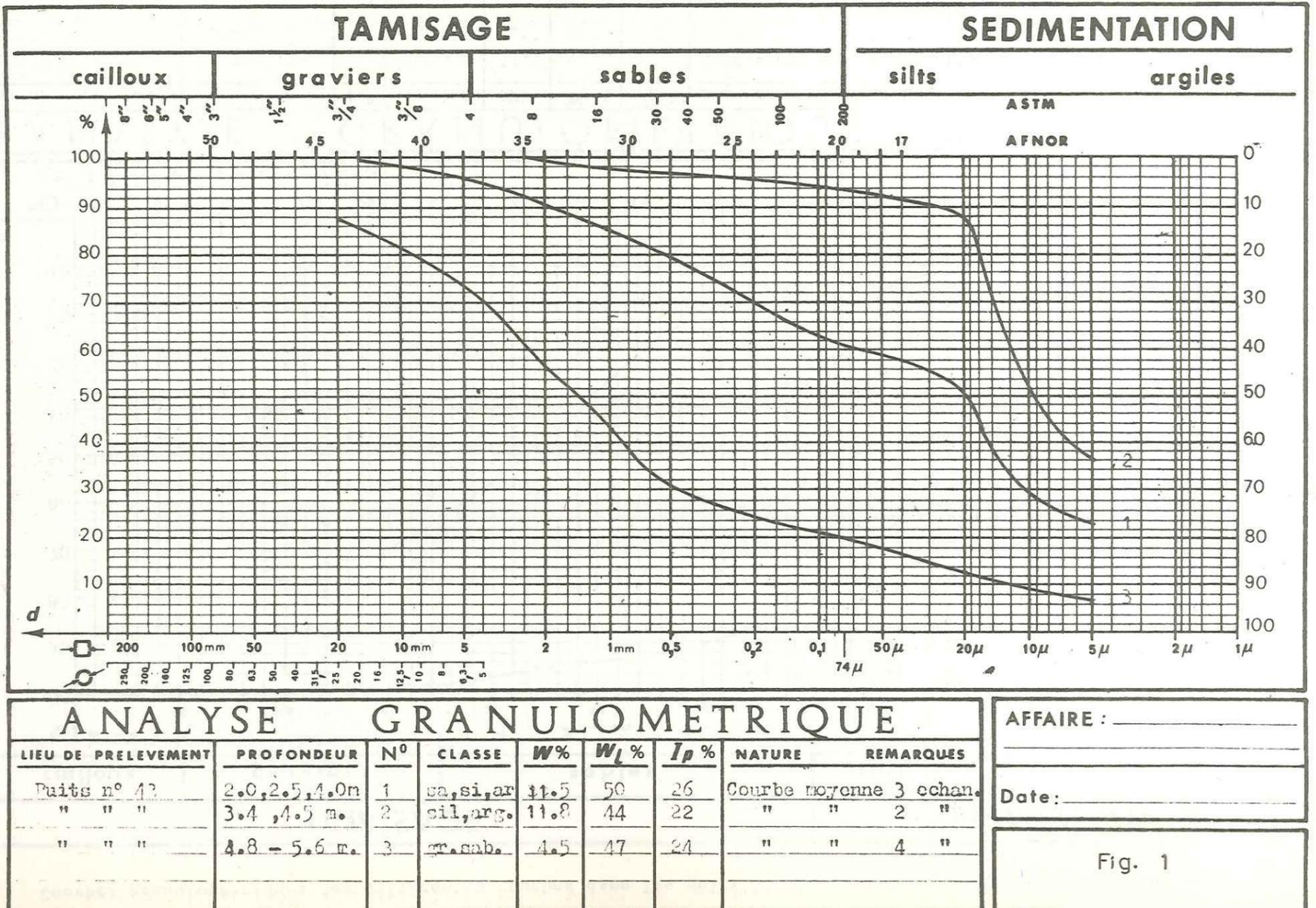
AFFAIRE :	NATURE	I <sub>p</sub> %	W <sub>L</sub> %	REMARQUES
	Course moyenne 4 échant.	40	67	
	"	44	71	
	"	39	70	

Date:	Fig. 1
-------	--------

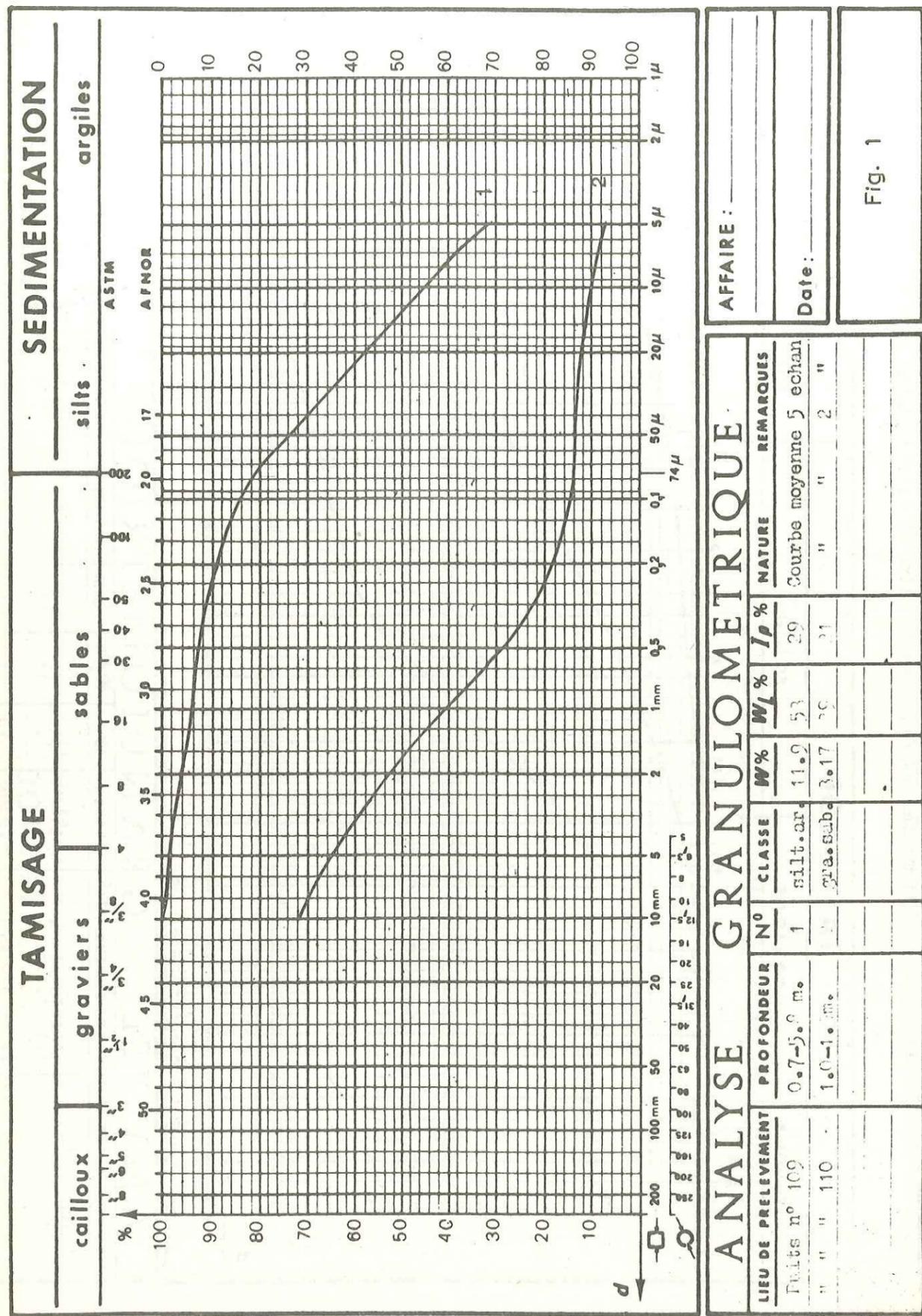
Changement granulométrique des alluvions en allant de la pente vers la plaine (Plaine de Tabasse)



Courbes granulométriques des différentes couches dans le puits n° 43 (sud plaine de Tabasse)



Courbes granulométriques des différentes couches dans les puits n° 109 et 110 situés dans la plaine de Rise.



(Valeur moyenne par puits pour les terrains de 0 à 5,50 m de profondeur)

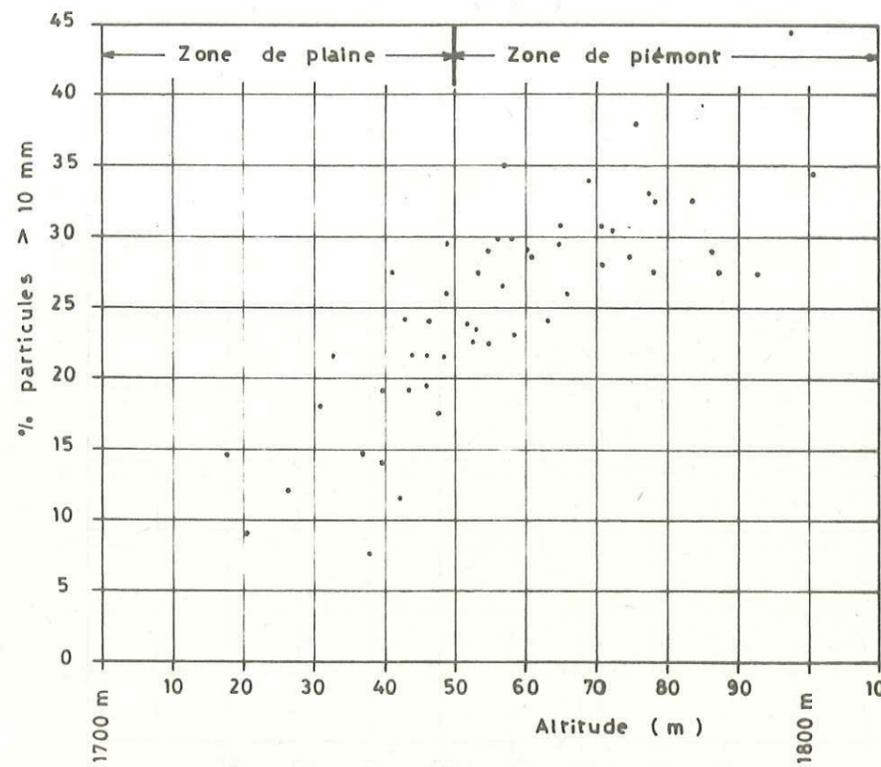


Fig. 2 - Variation du pourcentage de particules > 10 mm en fonction de l'altitude

( Valeur moyenne par puits pour les terrains de 0 à 5,50 m de profondeur )

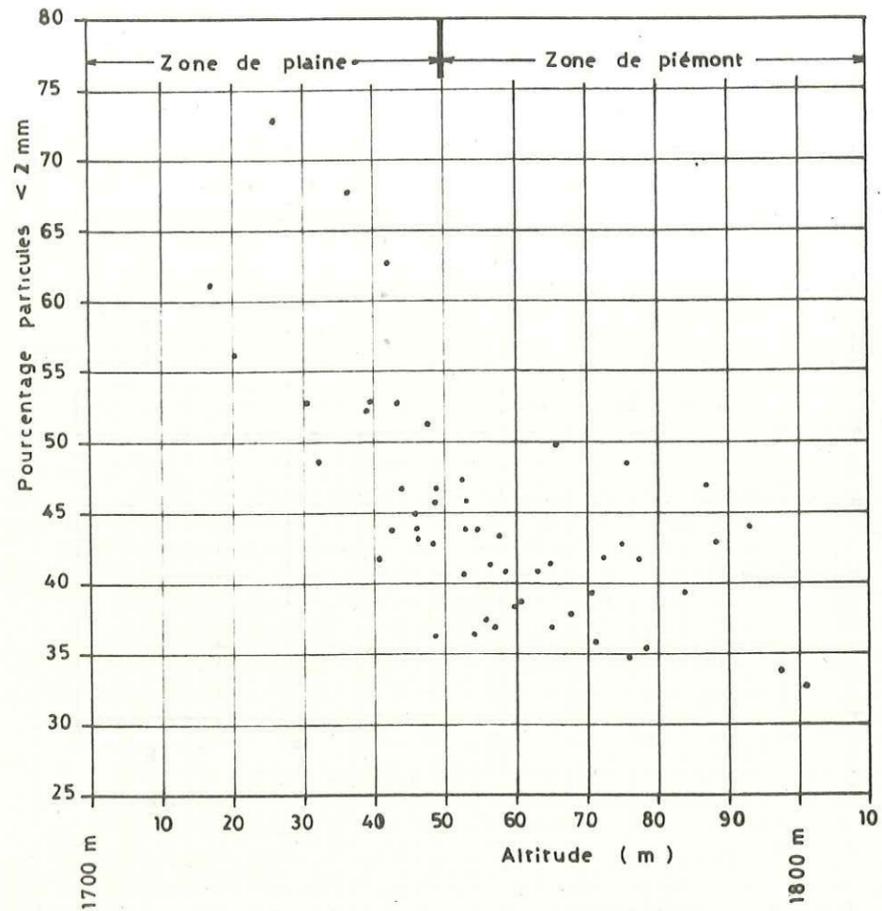


Fig. 3 - Variation du pourcentage de particules fines (< 2 mm) en fonction de l'altitude

( Valeur moyenne par puits pour les terrains de 0 à 5,50 m de profondeur )

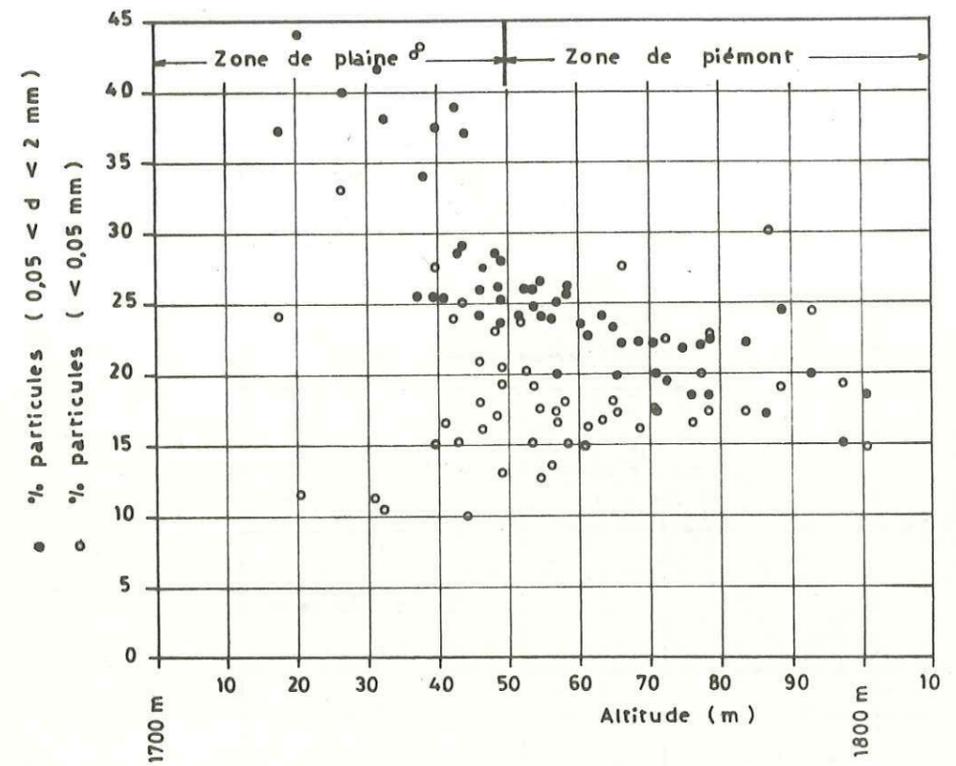


Fig. 4 - Variation du pourcentage de particules fines avec l'altitude

( Chaque point est la moyenne de 4 à 6 mesures faites dans la tranche des 5 m situés immédiatement au dessus )

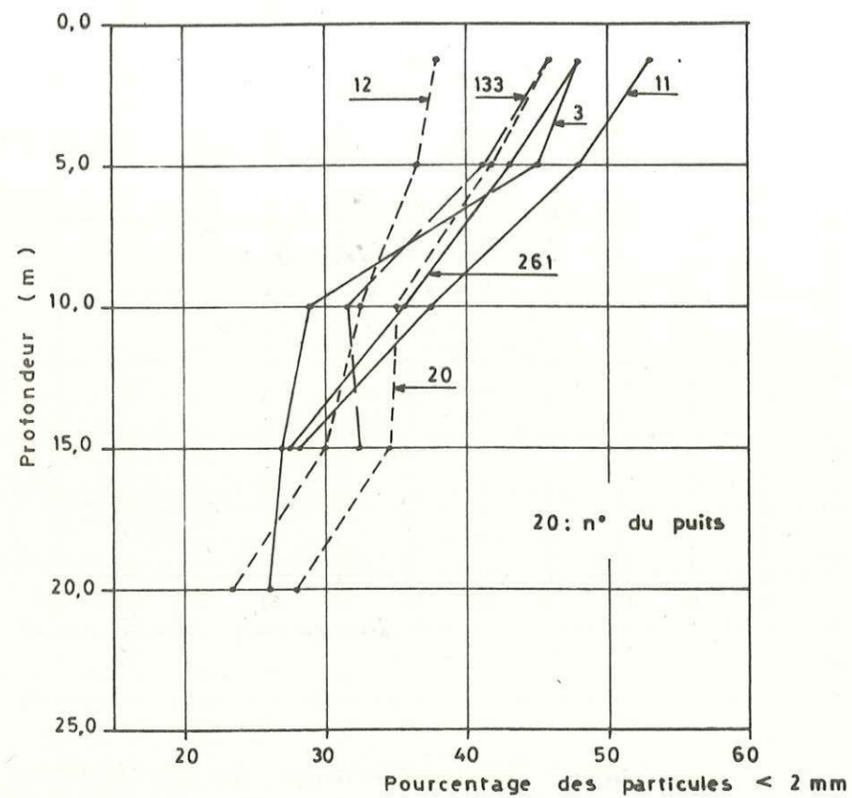


Fig. 5 - Variation du pourcentage de fins (< 2 mm) avec la profondeur

( Chaque point est la moyenne de 4 à 6 mesures faites dans la tranche des 5 m situés immédiatement au dessus )

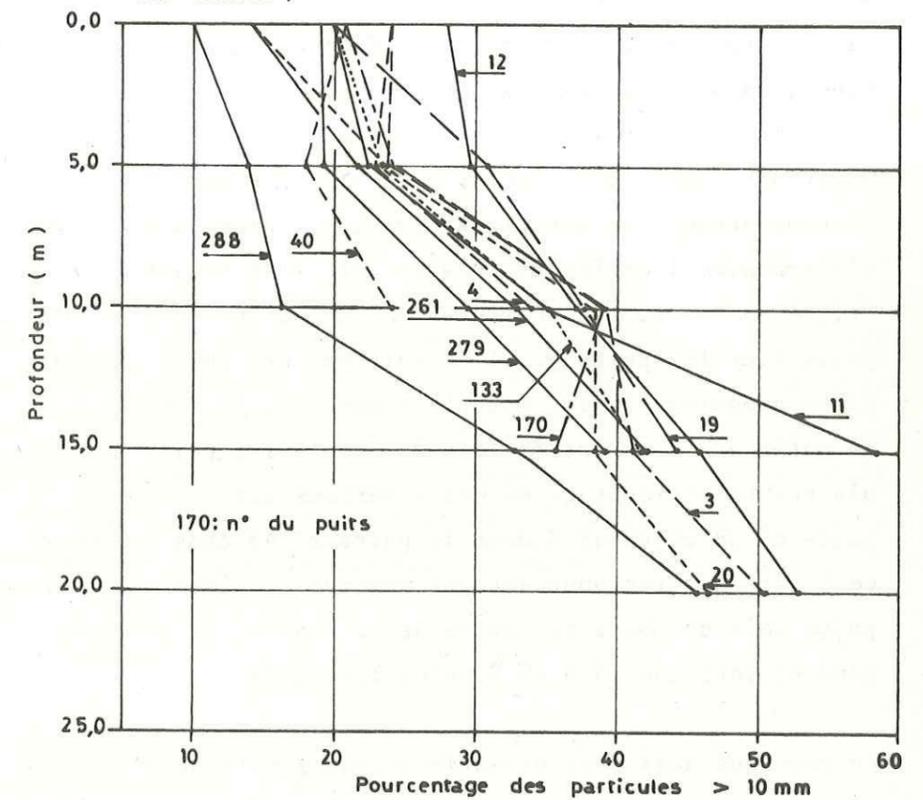


Fig. 6 - Variation du pourcentage de matériaux grossiers avec la profondeur

Les matériaux de ce conglomérat sont les mêmes que ceux des alluvions de plaine et l'épaisseur des lentilles est comprise entre 1 et 2,5 mètres ; dans certains puits profonds, on a rencontré quelques lentilles de conglomérat qui sont plus dures en profondeur. Les résultats de la résistance à la compression simple du conglomérat sont donnés dans le tableau n° 7a. D'après ce tableau, la résistance est de 147-1515 kg/cm<sup>2</sup> à l'état sec, et de 141-843 kg/cm<sup>2</sup> à l'état saturé. La résistance du conglomérat dans deux états, sec et saturé, ne change pas beaucoup. Cette variation n'est forte que dans l'échantillon prélevé dans le puits n° 20 (profondeur 15,5-16,5 m), puisqu'on a 411 kg/cm<sup>2</sup> dans l'état saturé et 1515 kg/cm<sup>2</sup> à l'état sec. Le ciment de ce conglomérat est formé d'argile, de calcaire et de silice. La genèse de ce type de conglomérat n'a jamais fait l'objet d'une étude, mais il semble que dans les cas où les alluvions comportent de l'argile, du calcaire et du sable, cela permette aux matériaux fins de devenir un ciment et de donner lieu à la naissance de ce type de conglomérat. Le pourcentage des matériaux dont les diamètres sont inférieurs à 0,05 mm, c'est-à-dire l'argile et le silt, est très variable dans le secteur étudié. Malgré sa tendance d'augmentation du piémont vers la plaine, ce pourcentage varie dans les puits et il ne suit pas une règle générale tels les matériaux grossiers ou les matériaux sableux. De cette façon, le pourcentage de matériaux fins est de 15 à 25 % dans les puits situés au Nord de la plaine. Le pourcentage de ces matériaux est de l'ordre de 10,6 % dans le puits n° 38 et de 43 % dans le puits n° 43 dans le Sud de la plaine, ce qui veut dire que les pourcentages maximum et minimum se trouvent dans des puits voisins. Dans le centre de la plaine, ce pourcentage est plus homogène et varie de 15 à 20 % selon les puits.

On remarque aussi des variations granulométriques dans les profondeurs. D'après les essais granulométriques au laboratoire et in situ, le pourcentage des matériaux grossiers et ses dimensions augmentent avec la profondeur, c'est le contraire pour les matériaux fins. Les graphiques n° 5 et 6 et le schéma n° 6 montrent ces variations. D'après l'étude faite sur quelques puits, le pourcentage des matériaux dont les diamètres sont supérieurs à 10 mm, varie de l'ordre de 10 à 28 % pour des profondeurs de 1 à 2 m et est de 46 à 55 % à une profondeur de 20 m. Dans la plupart des puits, le pourcentage des matériaux grossiers en profondeur est deux fois plus grand que dans les couches supérieures. L'augmentation des pourcentages des matériaux grossiers va de pair avec la diminution du pourcentage

.../...

des graviers et sable. La quantité des matériaux fins (silt, argile) diminue faiblement en profondeur. La granulométrie in situ pour les matériaux grossiers (volume de l'échantillon 0,5 m<sup>3</sup> pour chaque essai) confirme aussi ces variations. Par conséquent, on peut conclure que l'intensité des torrents était plus forte au commencement et au milieu du Quaternaire.

## 2 - Poids spécifique

Le poids spécifique des grains des alluvions développées dans la plaine de Tabasse ne change pas beaucoup, il varie de l'ordre de 2,66-2,70 g/cm<sup>3</sup> pour l'ensemble du sol. Le poids spécifique des grains des matériaux grossiers est compris entre 2,66-2,70 g/cm<sup>3</sup> et pour les matériaux fins il est de l'ordre de 2,52-2,72 g/cm<sup>3</sup>.

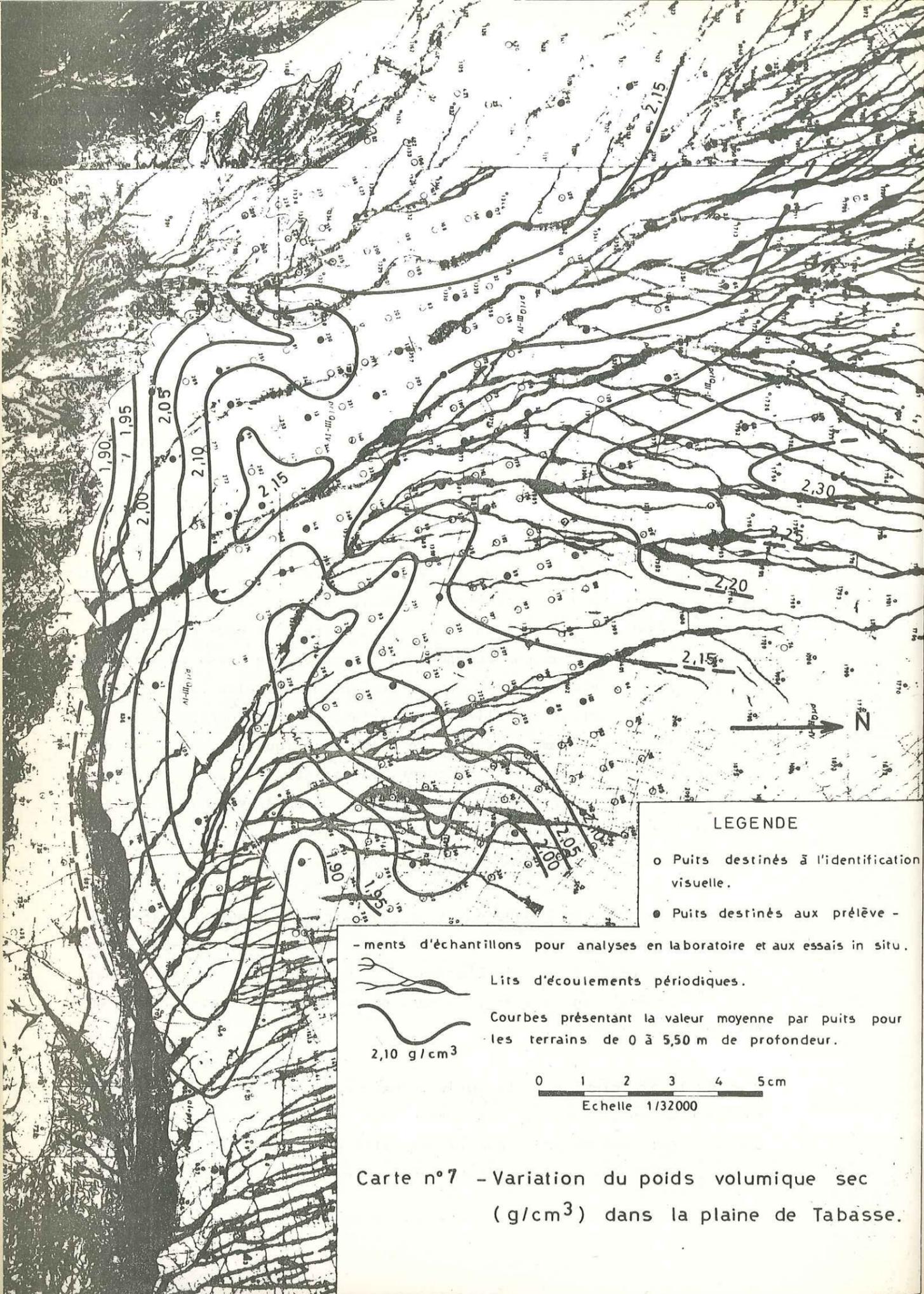
## 3 - Poids volumique

On a mesuré le poids volumique au laboratoire pour les matériaux à l'état naturel et sec. Mais la synthèse des résultats sera faite pour les matériaux à l'état sec. Le tableau n° 15 et la carte n° 7 nous donnent les moyennes du poids volumique sec pour chaque puits. Le poids volumique sec des alluvions de plaine varie avec la profondeur et selon la situation du puits. Ces variations sont liées aux variations granulométriques et à la compacité. Mais comme la variation granulométrique est régulière du piémont vers la plaine, par conséquent, la variation du poids volumique et la porosité varient également régulièrement. Le poids volumique sec est maximum dans la partie en amont de la plaine (entre 2,20 et 2,30 g/cm<sup>3</sup>), avec le maximum absolu au puits 60 (2,32 g/cm<sup>3</sup>).

Dans cette partie, on trouve aussi le pourcentage maximum des matériaux grossiers. Le poids volumique sec diminue du Nord vers le Sud-Est et dans la partie centrale il est de l'ordre de 2,10-2,15 g/cm<sup>3</sup>, et dans la partie aval il diminue jusqu'à 1,9-2,0 g/cm<sup>3</sup>, et son minimum atteint 1,82 g/cm<sup>3</sup> aux puits n° 43 et 287.

D'après le graphique n° 9 le poids volumique est faible pour les couches supérieures et il augmente rapidement dans les premiers mètres de profondeur, ce qui nous montrent que la compacité est faible dans la couche supérieure, et qu'elle augmente rapidement en profondeur.

.../...



Carte n°7 - Variation du poids volumique sec (g/cm<sup>3</sup>) dans la plaine de Tabasse.

( Valeur moyenne par puits pour les terrains de 0 à 5,50 m de profondeur )

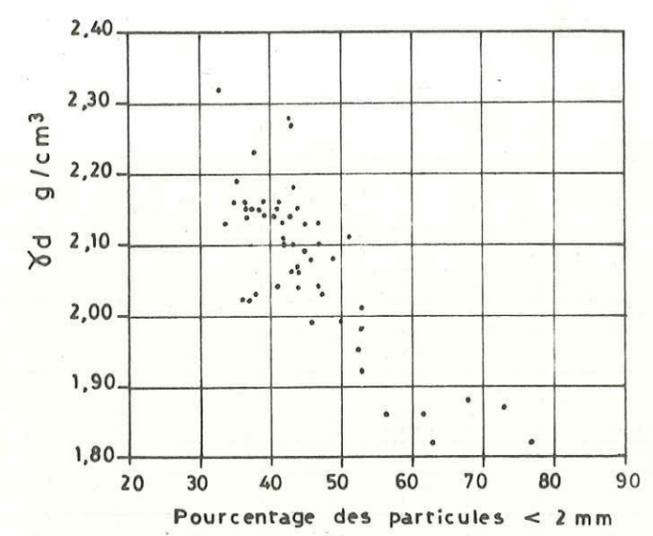


Fig. 7 - Variation du poids volumique sec en fonction du pourcentage de fins (< 2 mm)

( Valeur moyenne par puits pour les terrains de 0 à 5,50 m de profondeur )

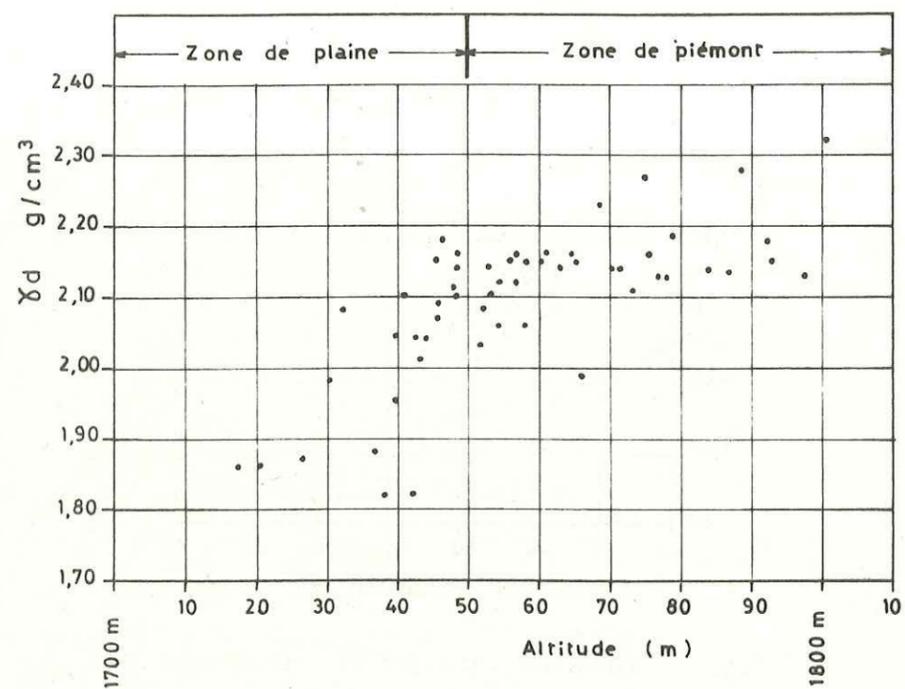


Fig. 8 - Variation du poids volumique sec en fonction de l'altitude

( Chaque point est la moyenne de 4 à 6 mesures faites dans la tranche des 5 m situés immédiatement au dessus )

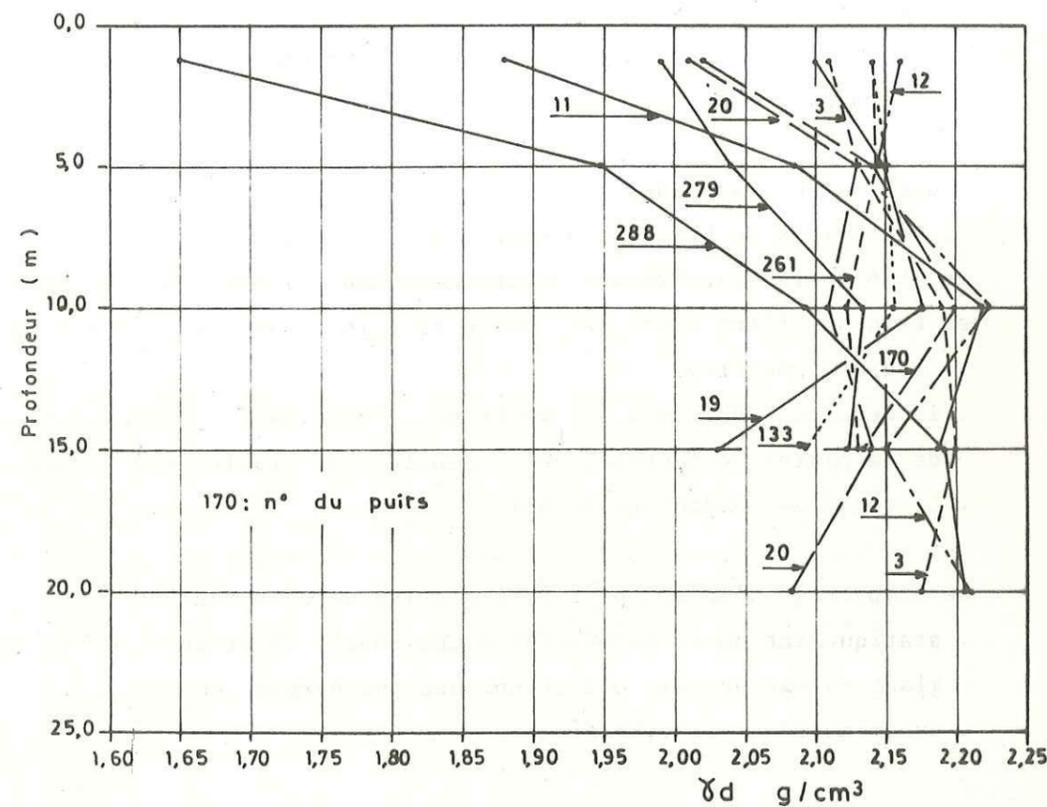


Fig. 9 - Variation du poids volumique sec en fonction de la profondeur

On a remarqué une augmentation du poids volumique en profondeur jusqu'à 10 m. Ces augmentations sont plus intenses pour les 5 premiers mètres, surtout dans les puits situés au Sud de la plaine. Dans les profondeurs situées entre 10 et 15 m, le poids volumique diminue et entre 15 et 20 m, pour certains puits, il augmente et pour d'autres il diminue.

L'examen des cartes n° 5 à 7 montre que le poids volumique et la granulométrie dépendent de l'altitude, mais aussi d'autres facteurs. En particulier on constate que la situation de l'échantillon par rapport à la position des oueds principaux joue un rôle non négligeable. Ceci se traduit par une déformation des courbes d'égal poids volumique au voisinage des oueds principaux.

D'après d'autres études, en particulier celles effectuées en 1957-63 sur les matériaux du barrage du Mont-Cenis et celles que nous avons effectuées en 1976 au laboratoire sur divers matériaux (Tableau n° 16) on peut mettre en évidence l'influence de 3 facteurs principaux sur le poids volumique :

- . la granulométrie,
- . la densité spécifique des matériaux constituant le terrain (dans le cas de la plaine de Tabasse, cette densité est pratiquement la même partout),
- . le degré de compactage du sol.

Le compactage d'un sol peut être réalisé de deux manières :

- . statiquement en le soumettant à une charge importante. C'est le cas des glaciers par exemple qui créent des surcharges temporaires,
- . dynamiquement par vibrations.

Or, les sédiments de la plaine de Tabasse n'ont pas été soumis à une charge statique depuis leur dépôt. D'autre part, le poids volumique varie très localement comme on peut le constater sur la Fig. 14 et le Tableau 17. On a représenté sur la Fig. 14 les variations de poids volumique le long de plusieurs courbes de niveau. Ces variations sont très notables ; par exemple sur la courbe 1735 m, le poids volumique varie de 1,90 à 2,07 g/cm<sup>3</sup>. Les maxima des poids volumiques sont situés aux niveaux des oueds principaux.

L'explication que nous avançons est la suivante : puisque le poids volumique de la tranche des 5-6 premiers mètres présente des maxima au niveau des

.../...

Tableau 16 - Comparaison des poids volumiques in situ avec les densités foisonnée et du Proctor normal dans différentes régions d'Iran et de France.

N° des puits	Profondeur (m)	Granulométrie					Yf	Y in situ	W (%)	Yd	Y <sub>opt</sub>	W <sub>opt</sub> (%)	G	Situation des puits
		> 20 mm	< 20 mm	< 5 mm	< 0,1 mm									
20	1,5-5,2	6	94	58	22	-	2,21	3,62	2,13	-	-	2,67	Centre de la plaine de Tabasse	
20	5,2-9,7	15	85	47	18	-	2,27	4,22	2,21	-	-	2,68		
20	15,2-20,0	25	75	37	16	-	2,24	7,52	2,12	-	-	2,67		
65	1,4	16	84	53,5	24	-	2,44	4,0	2,35	-	-	2,70	Nord de la plaine de Tabasse	
119	1,0	19	81	57	28	-	2,38	4,4	2,28	-	-	2,66		
XIV	22,9-23,5	49,5	50,5	36,5	9,0	1,79	2,25	4,0	2,16	2,31	6,0	2,75	Barrage du Mt-Cenis Divers emprunts	
XV	20,2-20,8	39,0	61,0	50	22	1,59	2,36	7,0	2,20	2,19	7,0			
XIX	9,7-10,3	51	49,0	35	9,5	1,71	2,26	7,5	2,10	2,17	8,5			
VIII	20,0-20,5	45,5	54,5	43	16,5	1,62	2,36	7,0	2,20	2,16	7,0	2,72		
X	9,3-10,1	0	100	100	84,5	1,23	1,74	34,0	1,30	1,61	21,5			
XVII	12,8-13,4	50,0	50,0	37,5	17,5	1,59	2,32	8,0	2,15	2,18	6,0			
2	0,6-0,8	26	74	61	46	1,47	2,10	20,18	-	2,14	17,3	-	Villar-gere	
	0,7	35	65	34	16	1,67	-	9,0	-	2,29	8,5	-	Gresse	

Tableau 17 - Moyennes des résultats sur 4 à 6 échantillons prélevés entre 0 à 5,50 m

N° des puits	Altitude (m)	$\gamma_d$	e	% > 2 (mm)	% < 0,05 (mm)	% > 10 (mm)	IP	G
196	77,48	2,13	0,26	58,2	19,8	33,2	22	2,690
182	72,52	2,11	0,30	58,2	22,2	30,4	33	2,696
224	65,93	1,99	0,34	50,1	27,6	26,0	29	2,667
9	58,29	2,06	0,25	56,4	18,0	29,8	31	2,673
153	51,75	2,03	0,33	52,4	23,6	23,8	28	2,704
65	88,57	2,28	0,18	56,8	18,8	27,6	36	2,690
119	74,98	2,27	0,18	56,7	21,6	28,5	40	2,660
127	68,73	2,23	0,23	61,8	16,0	34,1	40	2,693
7	46,50	2,18	0,23	56,6	16,1	23,8	31	2,720
27	78,56	2,19	0,22	64,4	17,2	32,6	39	2,664
Moyenne	65,19	2,06	0,30	55,1	22,2	28,6	28,6	2,686
Moyenne	71,47	2,23	0,21	59,3	17,9	29,3	37,2	2,685

Remarque - Ce tableau indique les changements de densité sèche pour les terrains de même granulométrie et altitude en fonction de leur situation par rapport aux lits des oueds.

GRAINS d'ACIER

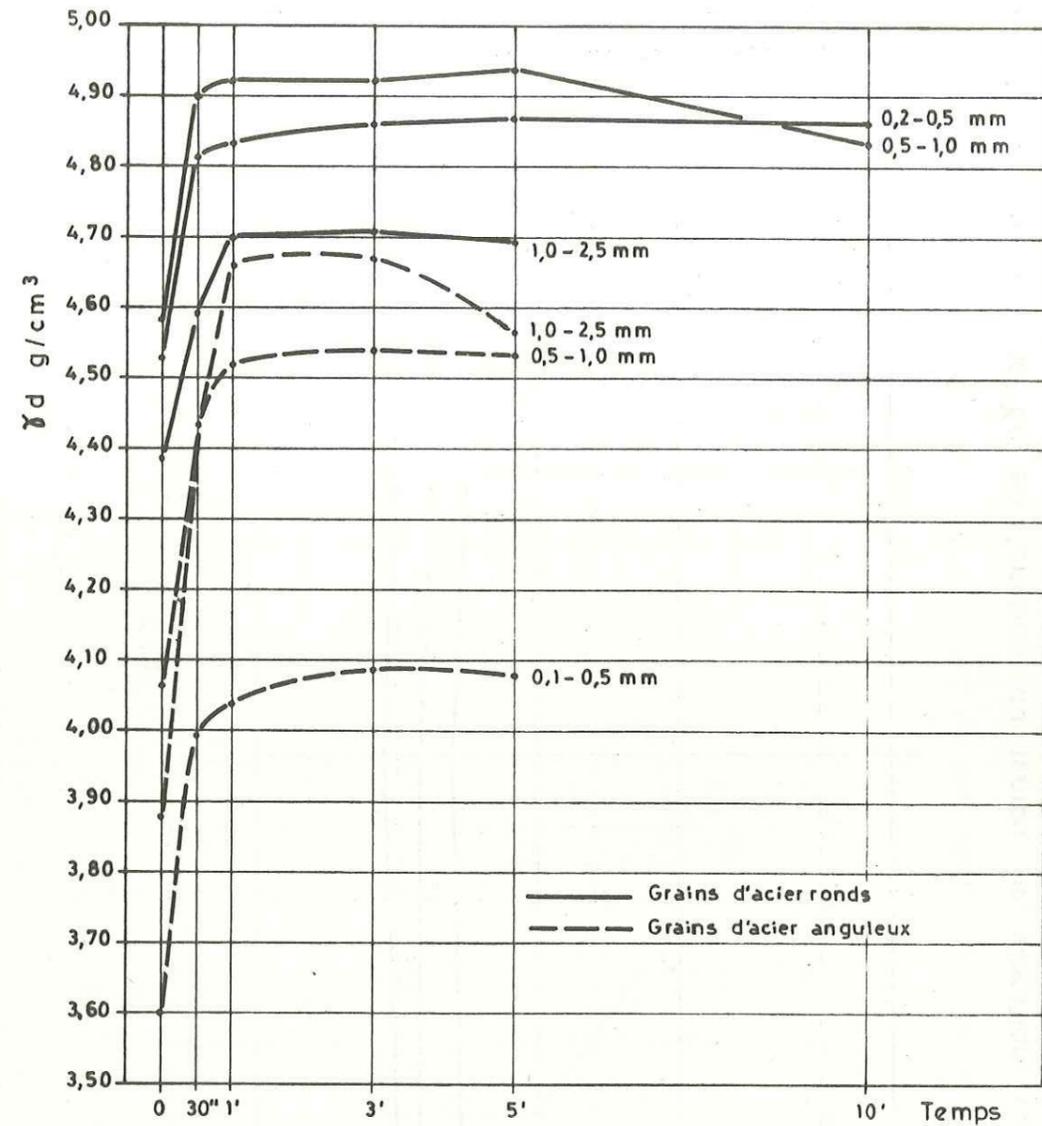
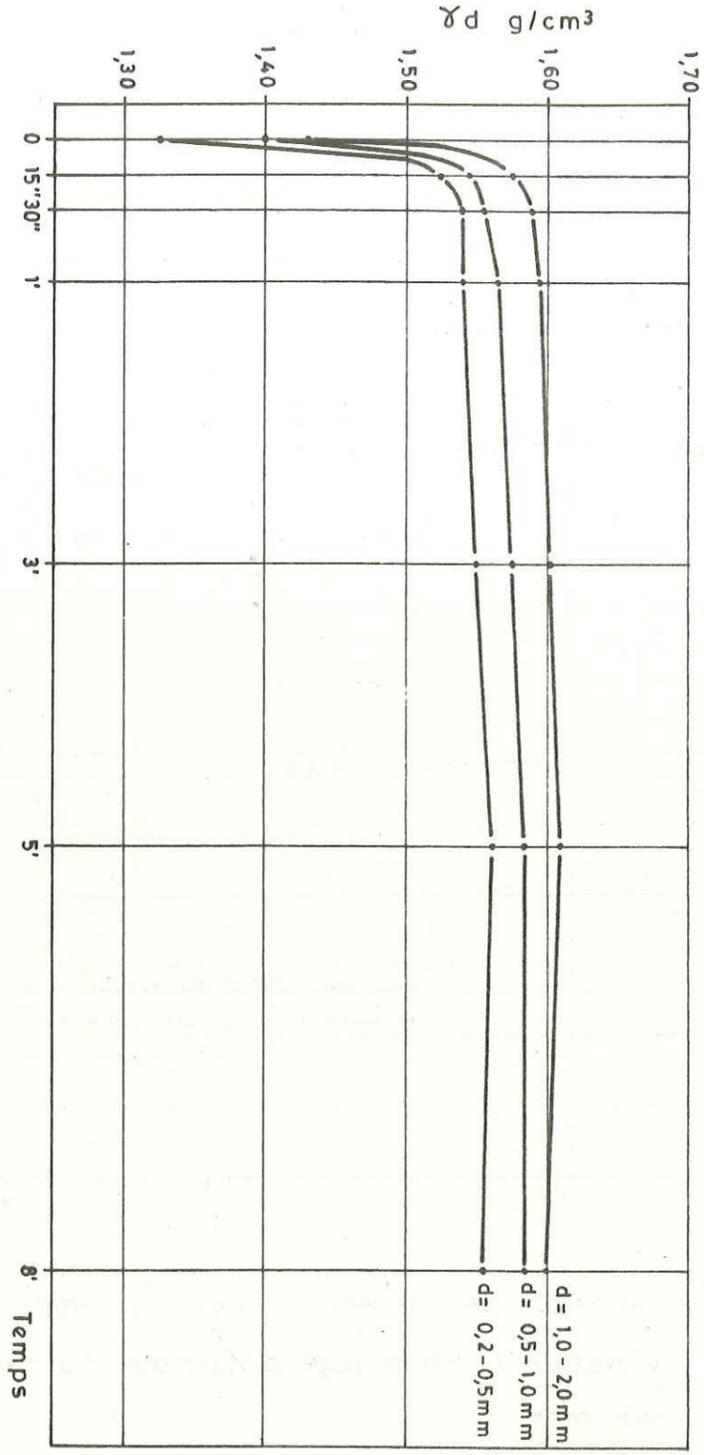


Fig. 10 - Variation de  $\gamma_d$  en fonction du temps de vibration (compactage dynamique sur table vibrante)

Fig. 11 - Variation de  $\gamma_d$  en fonction du temps de vibration ( compactage dynamique sur table vibrante )



SABLE

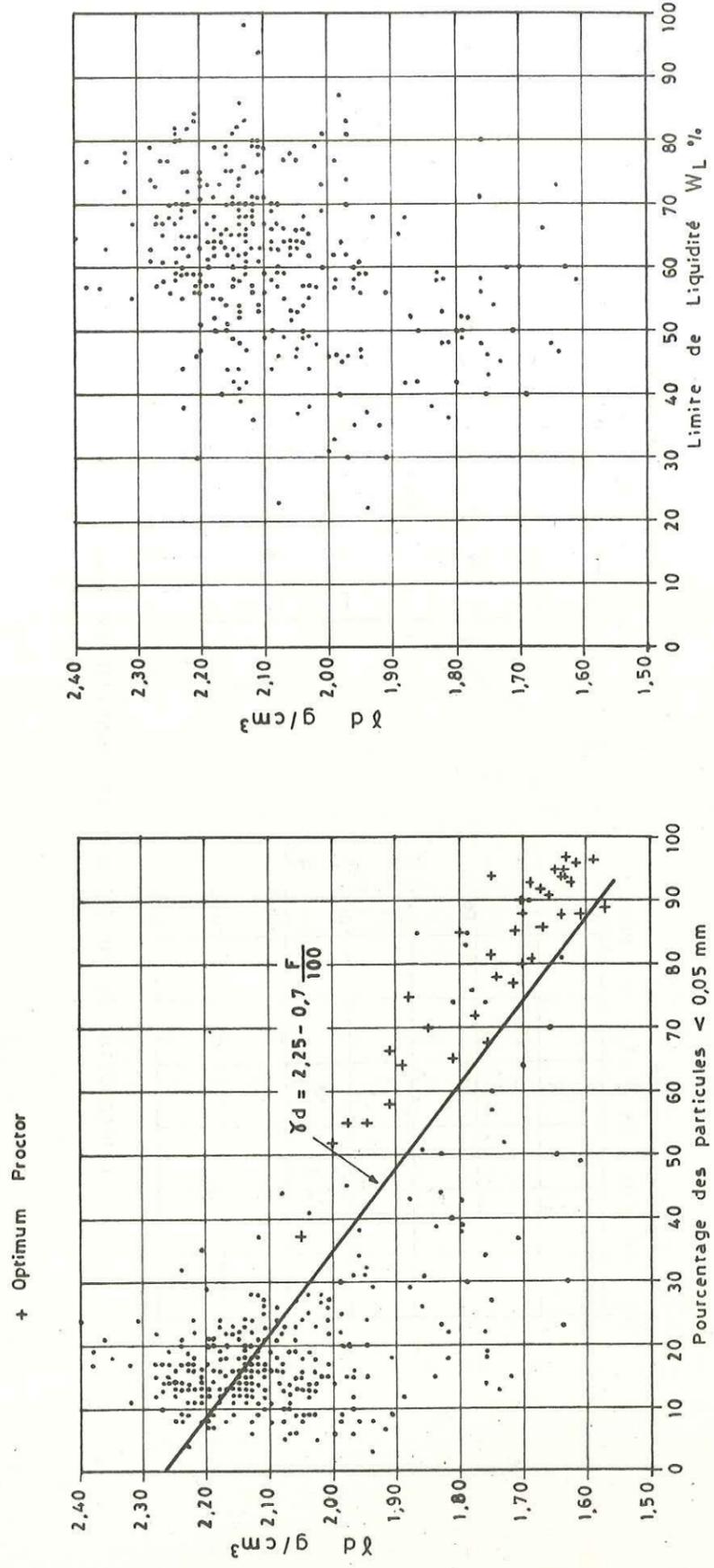


Fig. 12 - Variation du poids volumique sec en fonction du pourcentage de fins (< 0,05mm ) et de la limite de liquidité ( WL % )

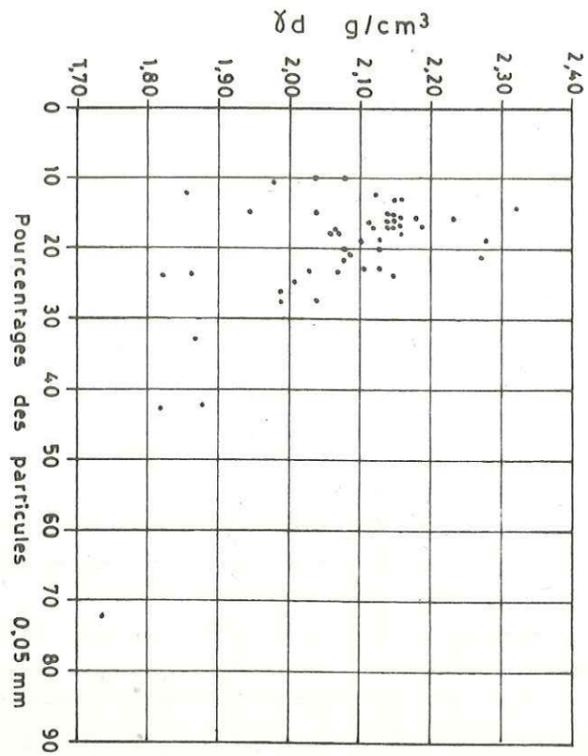
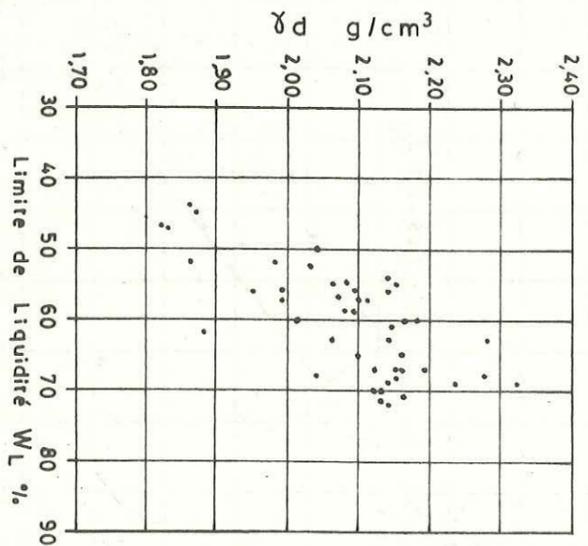


Fig. 13 - Variation du poids volumique sec en fonction du pourcentage de fins (< 0,05mm) et de la limite de liquidité ( $W_L$  %)



( Valeur moyenne par puits pour les terrains de 0 à 5,50m de profondeur )

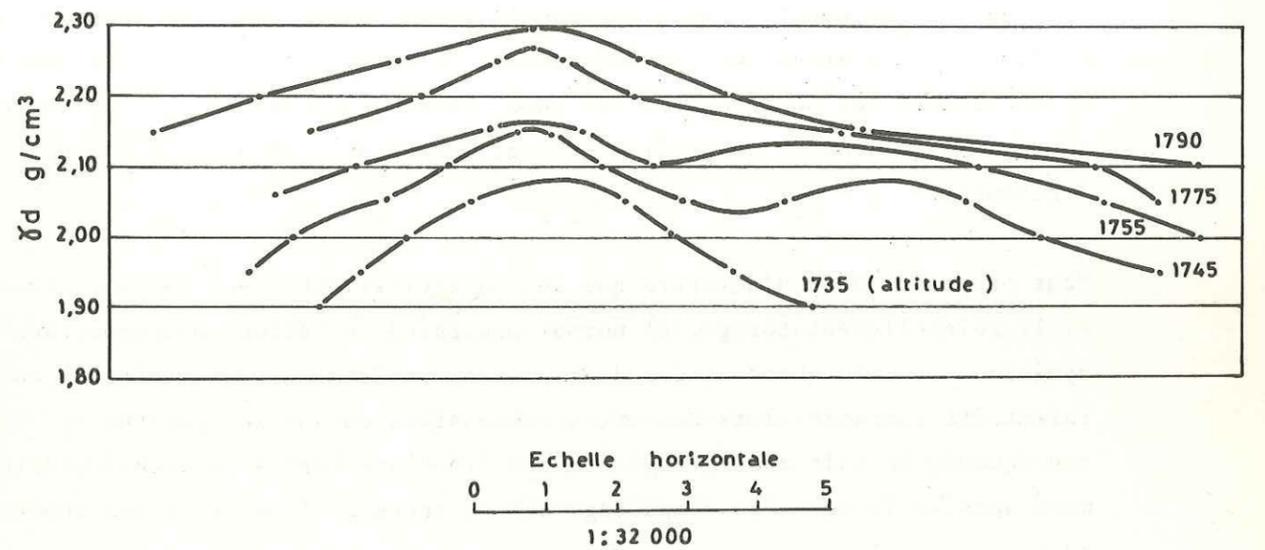


Fig. 14 - Variation de  $\gamma_d$  pour une même altitude par rapport à la situation des oueds principaux dans la plaine de Tabasse

oueds principaux, étant donné que ces fortes valeurs ne peuvent être dues à un compactage statique, c'est qu'elles sont produites par un compactage dynamique lié à la présence de l'oued. Ce compactage dynamique produit sur un matériau déversé de très grandes augmentations de poids volumique par suite du réarrangement des grains.

Pour pouvoir chiffrer l'influence du compactage dynamique sur le poids volumique, nous avons réalisé au laboratoire une petite table vibrante (fréquence  $N = 15$  Hz pour 900 t/mn - Amplitude  $A = 2,5$  mm accélération maximum -  $a = c_u^2 A = (2\pi N)^2 A = 2220$  cm/s<sup>2</sup> = 2,26 g). Les résultats obtenus sur 2 types de matériaux : grains d'acier et sable sont reportés sur les Fig. 10 et 11 où on a représenté la variation de  $\gamma_d$  en fonction du temps de vibration. On constate que le degré de compactage croît rapidement durant les 30 premières secondes. Après 3 à 5 minutes il augmente un peu, au-delà de ce temps il ne change pas ou au contraire il diminue légèrement.

Nous proposons donc d'admettre que les sollicitations créées par les crues et le ruissellement torrentiel normal pourraient effectuer un compactage dynamique in situ. Dans le cas de la plaine de Tabasse, les matériaux auraient été compactés lors des crues successives durant le Quaternaire. Par conséquent, le fait que  $\gamma_d$  augmente est lié d'une part à la granulométrie, mais aussi à la force de compactage des torrents à l'époque où ces dépôts se sont accumulés.

#### 4 - Plasticité

On a mesuré l'indice de plasticité pour les matériaux fins ( $< 0,05$  mm) qui remplissent les espaces vides des matériaux grossiers. Son minimum est de 22 % et son maximum est de 47 %. Ces chiffres sont des moyennes pour les 5 premiers mètres. Dans certaines couches,  $I_p$  est supérieur à 50 % et il atteint même 60 %, mais il se situe entre 30 et 40 % pour la plupart des puits. Nous avons remarqué que l'indice de plasticité diminuait de la pente vers la plaine malgré l'augmentation du pourcentage des matériaux fins. Nous pensons que ce phénomène est dû à l'augmentation de la teneur en sel dans la partie Sud de la plaine de Tabasse. Ce fait a été confirmé par la méthode géophysique et par les analyses chimiques du sol qui ont permis de déterminer le pourcentage de sel. En général, l'indice

.../...

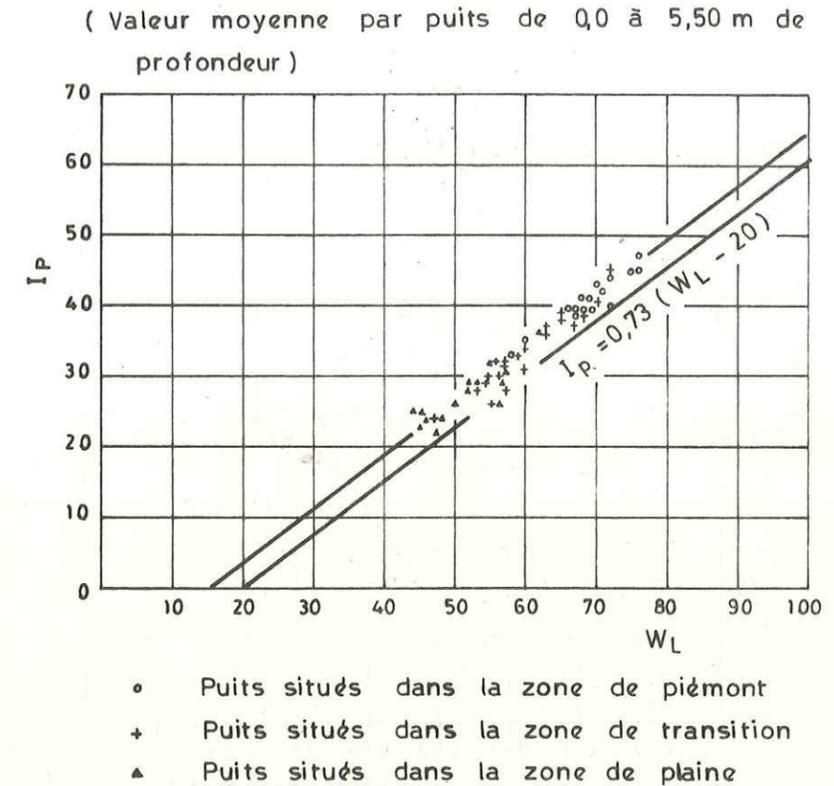
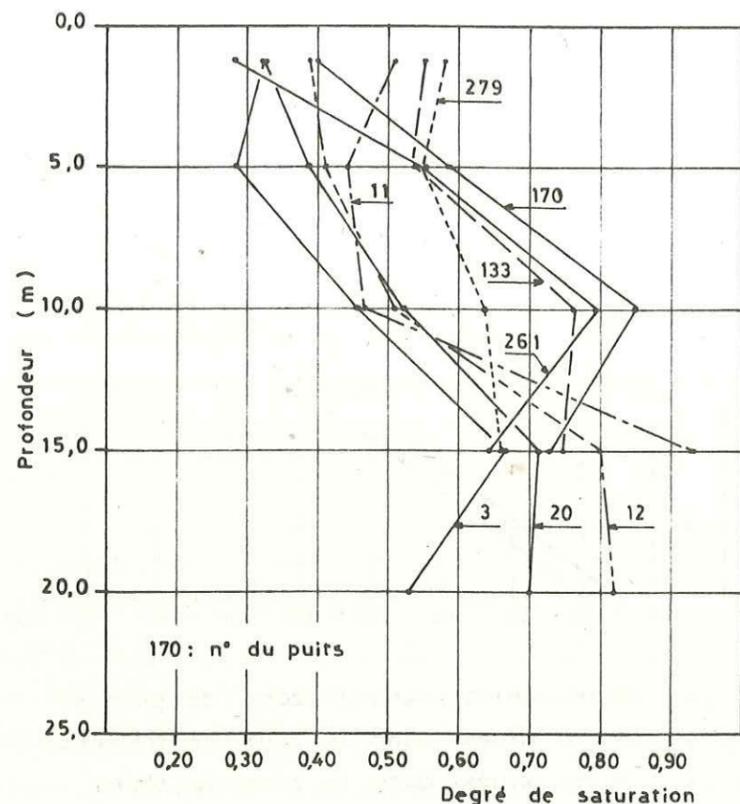


Fig. 15 - Relation entre  $I_p$  et  $W_L$  dans la plaine de Tabasse



( Chaque point est la moyenne de 4 à 6 mesures faites dans la tranche des 5 m situés immédiatement au dessus )

Fig. 16 - Variation du degré de saturation avec la profondeur

de plasticité est élevé, ce qui peut avoir une relation avec la minéralogie des matériaux fins et avec les caractéristiques d'absorption de l'humidité.

5 - Teneur en eau et degré de saturation

La teneur en eau et le degré de saturation des alluvions de la plaine de Tabasse ne subissent pas de grands changements dans les directions horizontales pour les 5-6 premiers mètres, mais ils varient verticalement, généralement à cause de l'évaporation qui est très forte et de la nappe qui est très basse (< 20 m). La teneur en eau est faible, son maximum est de 15 % à une profondeur de 15 à 20 m et dans le cas où le pourcentage de matériaux fins augmente, ce chiffre augmente aussi.

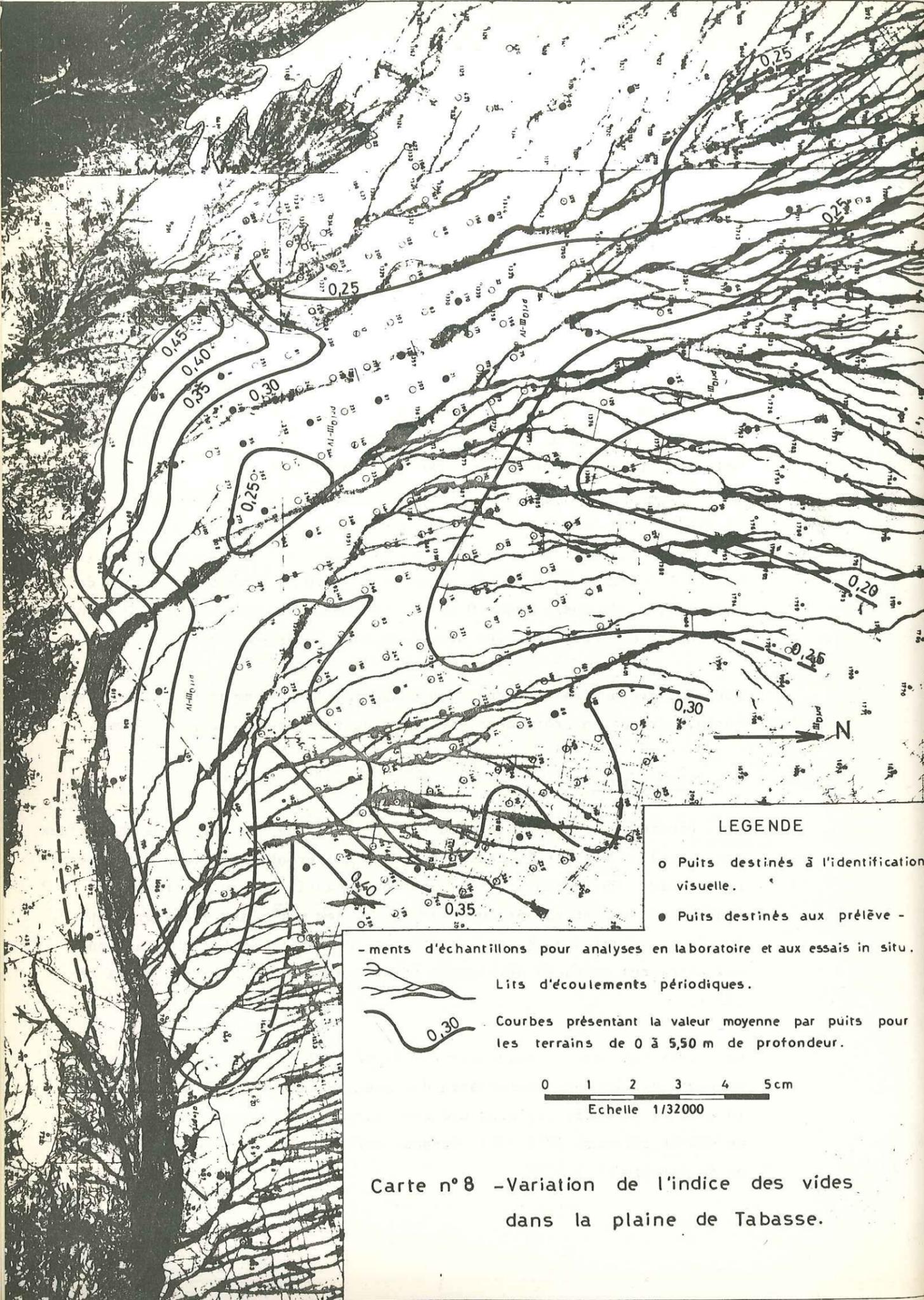
Le minimum est de 2 à 4 % dans les premiers 5 mètres. Le degré de saturation augmente aussi avec la profondeur. Pour les 5 premiers mètres, il est de l'ordre de 0,35 à 0,55 et entre 5 et 10 m, il est de l'ordre de 0,65 à 0,75. Au-dessous de 10 m, il est compris entre 0,75 et 1,0 et dans la plupart des endroits, les alluvions sont saturées à cette profondeur.

Donc, malgré une faible teneur en eau, grâce à la compacité qui est assez forte, surtout en profondeur, le degré de saturation est assez élevé.

6 - Pétrographie

On a étudié visuellement la nature pétrographique des alluvions (matériaux grossiers) in situ et le pourcentage des différents matériaux est déterminé en poids. On a étudié aussi certains échantillons au laboratoire. D'après les résultats obtenus, la plupart des matériaux grossiers sont formés de calcaire gris avec des filons de calcite dont l'origine sont les calcaires crétacés développés dans le Nord et le Nord-Est de la région.

Le pourcentage de ces matériaux est de 82 à 87 % selon les endroits. Puis on peut voir le conglomérat très dur avec un ciment calcaire et siliceux (8 à 12 %) et enfin les grès crétacés marrons, rougeâtres très durs, avec un ciment calcaire (2 à 5 %). On peut enfin trouver des débris de quartz et de calcite (1 à 3 %).



Carte n°8 -Variation de l'indice des vides dans la plaine de Tabasse.

( Valeur moyenne par puits pour les terrains de 0 à 5,50 m de profondeur )

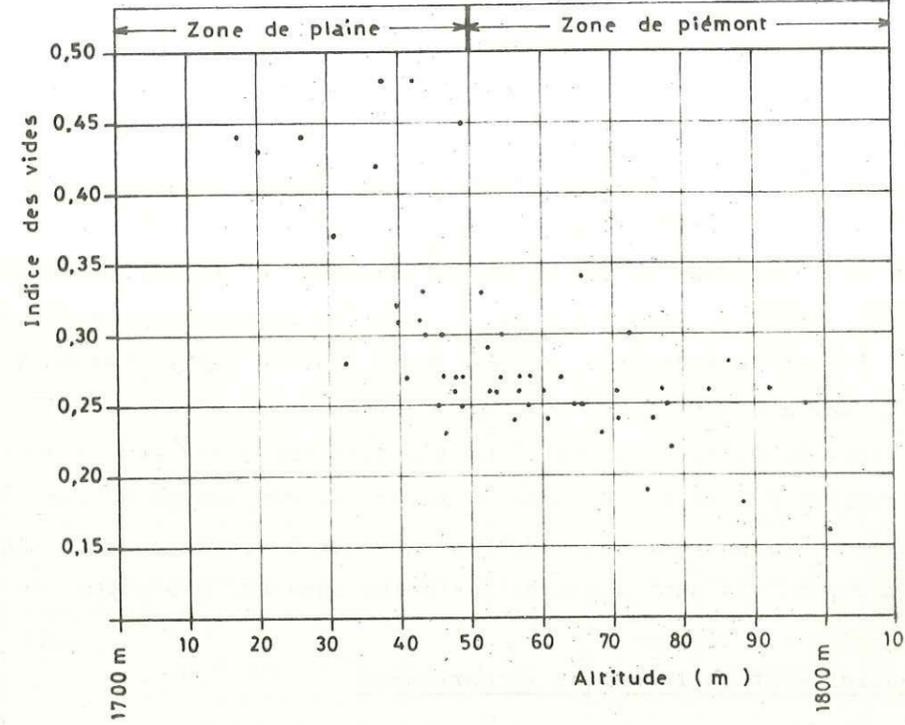


Fig. 17 - Variation de l'indice des vides en fonction de l'altitude

7 - Porosité et indice des vides

La porosité de ces alluvions varie de l'ordre de 12 à 40 %, mais dans la plupart des cas, elle est inférieure à 25 % et le chiffre moyen est 20 %. En général, la porosité est faible à cause du compactage qui est très fort.

L'indice des vides des matériaux fins est en moyenne de 0,56 à 0,64.

Le minimum est de 0,37 et le maximum est de 1,0.

La variation de l'indice des vides est montrée dans la carte n° 8 et le graphique n° 17 pour les 5 premiers mètres de ces alluvions. D'après cette carte, l'indice des vides est inférieur à 0,20 pour la partie Nord de la plaine et le minimum se situe dans le puits n° 60 (0,16). Vers l'aval de la plaine, l'indice des vides et la porosité augmentent. Dans la partie médiane, il est de l'ordre de 0,25-0,30 et dans la partie Sud et Sud-Est, son maximum atteint 0,40 à 0,45 et pour les puits n° 43 et 287, il est de l'ordre de 0,48. La porosité et l'indice des vides sont élevés pour les premiers 2-3 mètres à cause du manque de compactage et ils diminuent en profondeur, surtout dans la partie Sud de la plaine où ces variations sont maximum. Ils sont à peu près stables dans une profondeur de 5 à 6 m.

8 - Salinité et influence de la corrosion

L'ensemble de tous les sels dissous dans l'eau dans le Nord et le centre de la plaine de Tabasse est généralement de 0,2 à 0,3 % (les échantillons ont été prélevés jusqu'à une profondeur de 19 m), donc le sol de cette zone est un sol sans sel. Dans la partie Sud, le pourcentage des sels augmente, il est de l'ordre de 0,5 à 1,4 %. Les sels sont généralement des sulfates. Le maximum de teneur en sel se trouve à une profondeur de 3-5 m et le minimum se situe entre 7 et 10 m. Le pourcentage augmente en profondeur du fait du rapprochement avec les nappes phréatiques. Les sels qui ne sont pas solubles dans l'eau mais dans l'acide chlorhydrique ont un pourcentage (0,2 à 2,5 %). Ce pourcentage augmente dans la direction Nord-Sud. Le maximum se trouve dans le Sud-Ouest (1,5 à 2,5 %) de cette zone.

Les tranches supérieures de certains puits sont gypseuses et elles ont une faible densité. La méthode géophysique électrique nous a permis de mesurer la résistivité du sol, qui dépend de la teneur en sel. La résistivité des alluvions au Nord est supérieure à 100 Ω.m. Dans la partie médiane de la

.../...

Tableau 18 - Teneur en sel des alluvions des plaines de Tabasse et de Rise (mg par gr. de sol)

N° du puits	Profondeur (m)	mg
15	1,55-1,80	0,50
"	1,80-2,95	0,61
"	2,95-3,35	1,38
"	3,35-3,70	1,89
"	5,65-6,30	1,27
"	8,55-9,55	1,44
"	11,35-11,85	1,68
"	14,85-16,35	1,20
"	16,15-16,55	1,92
	Moyenne	1,32
11	1,0-1,95	0,73
"	1,95-2,95	0,37
"	9,9-11,0	0,72
"	11,0-12,0	0,91
"	14,4-15,4	11,02
"	15,4-16,4	1,58
"	16,4-17,35	2,58
	Moyenne	2,56
20	5,9-6,65	1,69
"	7,65-8,65	1,23
"	9,65-10,65	2,25
"	11,90-12,90	2,50
"	12,90-13,90	1,87
"	13,90-15,25	2,19
"	15,25-16,25	2,26
"	18,20-19,25	2,21
	Moyenne	2,02
109	1,6-2,4	5,80
110	1,5-1,9	11,50
113	2,6-3,6	12,40
"	4,7-5,4	14,60
114	1,5-2,7	11,70
117	0,8-1,4	2,10
"	1,4-1,6	11,00
"	2,6-3,6	7,90
118	1,7-2,2	11,10
"	2,2-3,2	8,80
234	1,0-1,9	17,00
"	1,9-2,6	15,50
"	2,6-3,0	14,40
"	3,0-4,5	15,10

N° du puits	Profondeur (m)	mg
1	2,0-2,7	9,44
"	2,7-3,1	5,40
"	3,1-4,1	1,53
"	4,1-4,6	6,44
"	4,6-5,6	6,48
"	5,6-6,6	3,02
	Moyenne	5,38
3	1,2-2,1	7,95
"	1,0-1,2	0,66
	Moyenne	4,31
5	0,15-1,05	0,57
"	1,05-2,15	0,37
"	2,15-3,65	0,44
"	3,65-4,60	0,66
"	7,20-8,45	0,75
"	10,95-11,65	0,99
"	16,10-17,10	2,91
"	17,10-18,10	1,73
	Moyenne	1,05
6	1,80-2,55	8,34
"	6,55-7,55	1,87
"	10,85-11,85	2,19
"	11,85-12,75	2,12
"	14,85-15,70	3,15
	Moyenne	3,53
9	1,0-1,75	13,79
"	1,75-2,45	4,95
"	4,00-5,00	1,76
"	6,05-7,15	1,21
"	7,40-8,90	1,75
	Moyenne	4,69
14	1,0-1,85	1,45
"	1,85-2,60	0,60
"	3,90-4,75	0,51
"	4,25-5,00	0,57
"	7,20-8,20	0,83
"	8,20-9,20	1,34
	Moyenne	0,88

plaine, elle varie de l'ordre de 20 à 100  $\Omega.m$  (corrosion faible) et dans la partie Sud, la résistivité du sol est inférieure à 20  $\Omega.m$  (corrosion moyenne). Dans la partie Sud-Ouest, on a même remarqué des endroits où elle atteint 5 à 10  $\Omega.m$ , ce qui annonce des risques de corrosion forte.

D'après la résistivité du sol, on a déterminé la corrosion du sol pour les installations d'aciéries et on a distingué trois types de sol ayant une corrosion faible, moyenne et forte. Les résultats des analyses chimiques et des essais géophysiques nous montrent que la salinité des alluvions de la plaine de Tabasse augmente du piémont vers la plaine.

## II - CARACTERISTIQUES MECANIQUES DES ALLUVIONS DE LA PLAINE DE TABASSE

A cause de l'existence des matériaux grossiers, le prélèvement d'échantillons non remaniés n'a pas été facile, et par conséquent l'étude des caractéristiques mécaniques de ces alluvions est difficile. Parfois, les essais de cisaillement, de compression simple, oedométriques et surtout triaxial sur ce type de sol sont très difficiles et on ne peut pas avoir confiance dans les résultats obtenus ; donc pour la détermination des caractéristiques mécaniques du sol, il faut utiliser les mesures in situ qui sont longues et coûteuses.

### 1 - Module de déformation

A l'emplacement de l'usine, on a fait 25 essais de plaques dans 7 endroits à différentes profondeurs : 1,5, 2, 3, 4 et 6 mètres. On a fait 12 essais sur le sol avec teneur en eau naturelle, 8 essais avec le sol imbibé pendant une période comprise entre 1,5 et 15 jours, et on a fait enfin 5 essais à l'état naturel et à l'état saturé sous une pression de 3  $kg/cm^2$  (12-22 jours). Les résultats obtenus montrent que le sol avec teneur en eau naturelle a un module de déformation de 1630 à 7700  $kg/cm^2$  selon les endroits et les profondeurs. Près de la surface, le module de déformation est plus faible. Les tassements à l'état naturel sont de 0,29-1,28 mm. Le tassement supplémentaire du sol imbibé d'eau et gardé sous une pression de 3  $kg/cm^2$  est de 0,18 à 0,30 mm. Le module de déformation pour le sol imbibé d'eau est de l'ordre de 725 à 2790  $kg/cm^2$  et le tassement est égal de 0,15 à 3,45 mm.

.../...

N° du puits 12  $\frac{10}{63}$  Pourcentage < 0,05 mm  
6,0 Profondeur  
 $W_L$

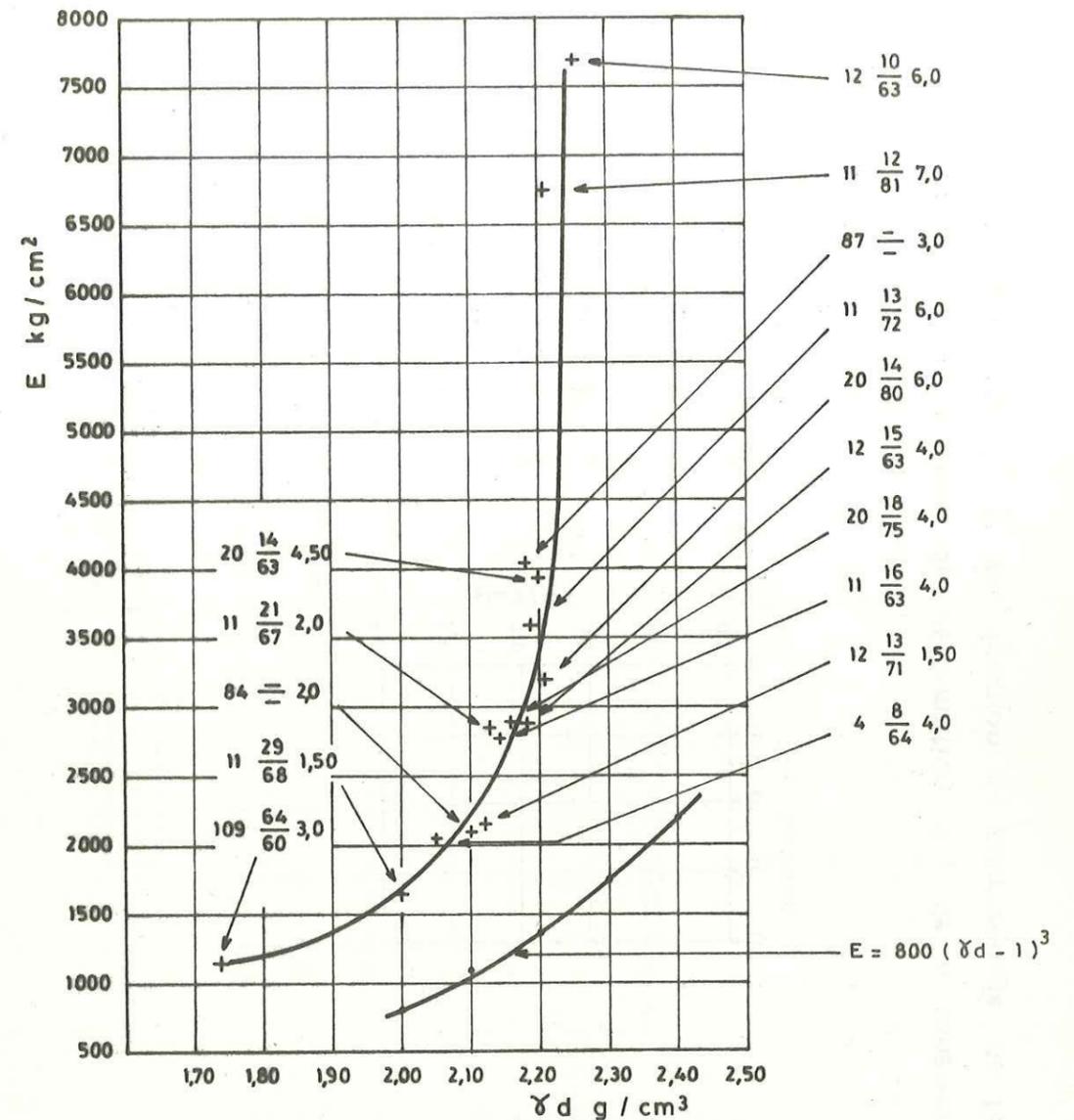


Fig. 18 - Relation entre le module de déformation E et le poids volumique sec  $\gamma_d$ . (résultats obtenus par les essais de plaque in situ)

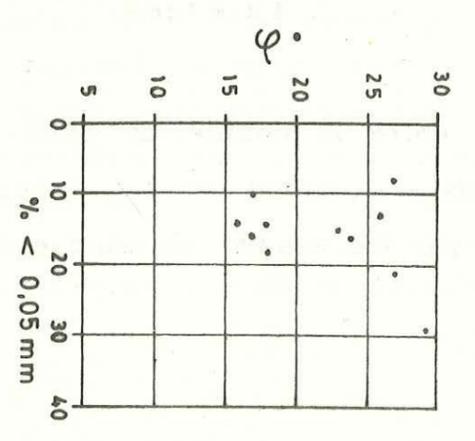
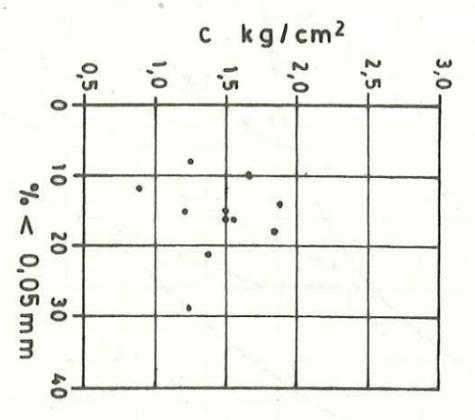
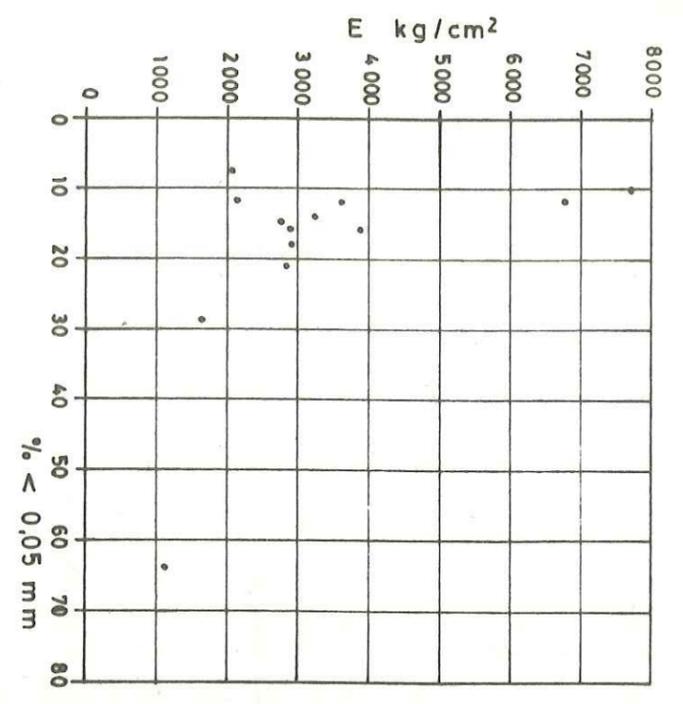
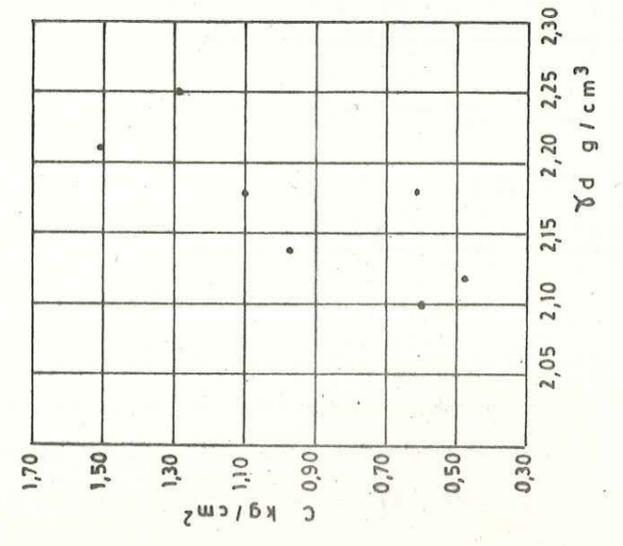
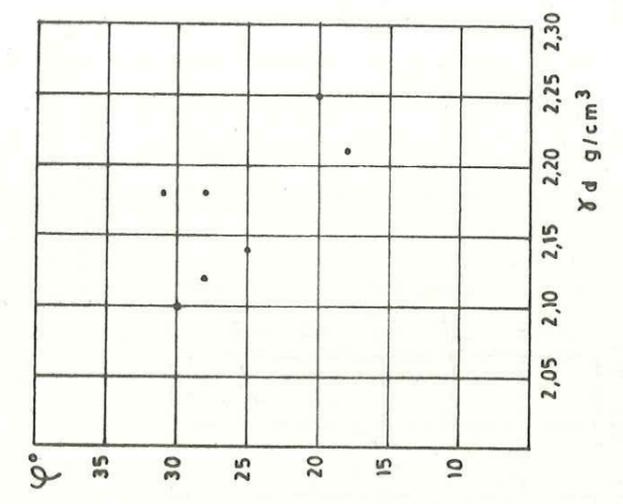
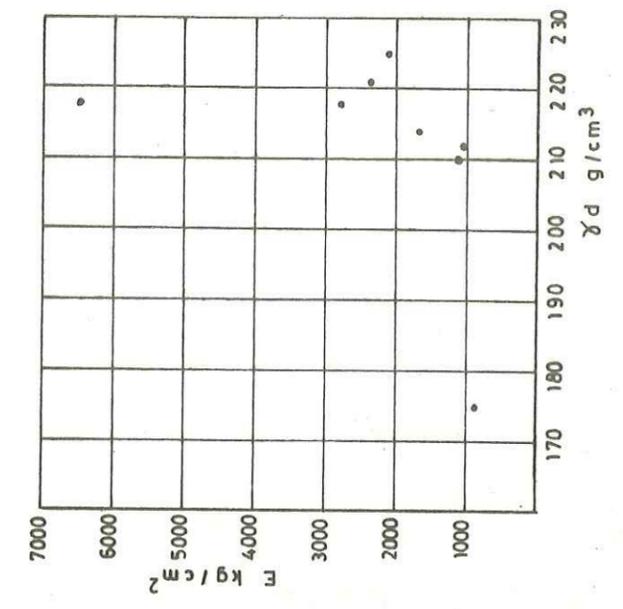
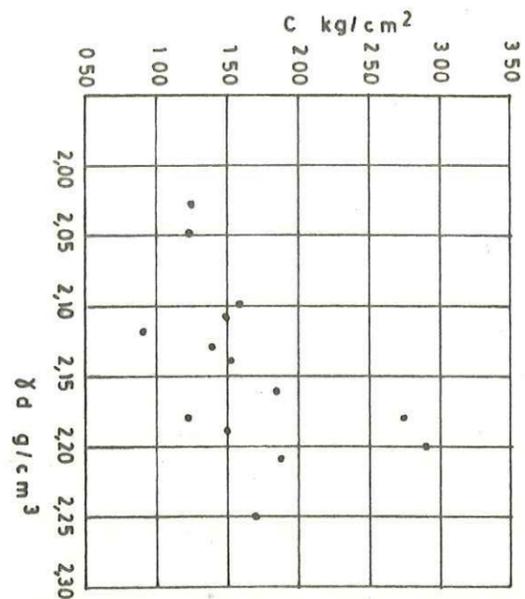


Fig. 19 - Variations du module de déformation  $E$ , de la cohésion  $C$  et de l'angle de frottement interne  $\varphi$  en fonction du pourcentage de fins (< 0,05 mm)



ETAT SATURE

Fig. 20 - Relation entre  $C$ ,  $\varphi$ ,  $E$  et le poids volumique sec  $\gamma_d$



ETAT NATUREL

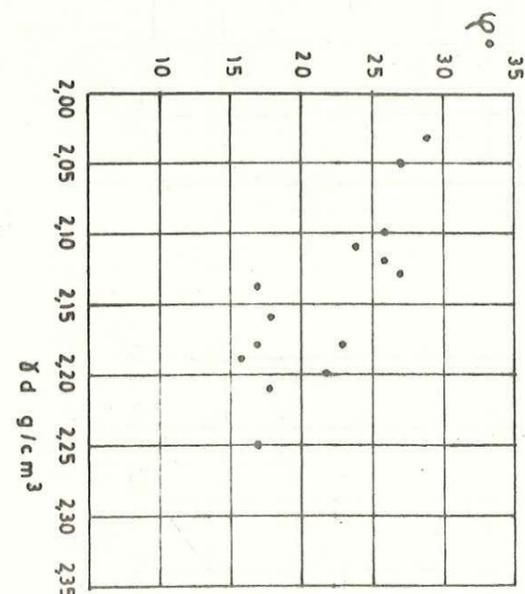


Fig. 21 - Relation entre C, φ et le poids volumique sec γd

Le gonflement est de l'ordre de 0,19-1,01 mm pour les endroits imbibés d'eau. Les résultats montrent que le module de déformation des alluvions est assez élevé et que le tassement et le gonflement sont négligeables, ce qui nous permet de classer ce type de sol dans la catégorie des sols sans tassement et sans gonflement, donnant d'excellents terrains de fondations. Les résultats de ces essais sont inscrits dans le tableau n° 12.

2 - Cohésion et angle de frottement interne

Les résultats des essais de cisaillement in situ et au laboratoire sont inscrits dans les tableaux n° 9 et 13. On a fait 21 essais in situ (14 avec teneur en eau naturelle et 7 après imbibition pendant 5 jours). Les endroits et les profondeurs des essais correspondent à ceux des essais de plaque. D'après les résultats, ces alluvions ont une cohésion de 0,92 à 2,92 kg/cm² à l'état naturel et l'angle de frottement interne varie entre 16 et 29°. La plupart des valeurs de cohésion varient entre 1,3 et 1,8 kg/cm² et on peut admettre une moyenne de 1,66 kg/cm² pour la cohésion et 22° pour l'angle de frottement interne.

La cohésion augmente avec la profondeur et elle est assez élevée dans les endroits situés en amont de la plaine, tandis que l'angle de frottement interne diminue avec la profondeur.

D'après les résultats obtenus sur les sols saturés, on s'est aperçu qu'ils perdent leur cohésion lorsque le degré de saturation croît de 10 à 50 %, dans les puits n° 84 et 87 cette diminution est très forte. Dans le puits n° 87, la cohésion était de 2,92 kg/cm² à l'état naturel, elle diminue jusqu'à 0,61 kg/cm² à l'état saturé. La cohésion des sols imbibés d'eau varie entre 0,47 et 1,51 kg/cm².

L'angle de frottement augmente à l'état saturé (18 à 31 %) sauf pour le puits n° 20. On a distingué les variations maximales dans le puits n° 87.

A cause de la difficulté de prélèvement des échantillons, on a fait seulement 11 essais de cisaillement directs au laboratoire (9 avec la teneur en eau naturelle et 2 essais après immersion). Ces échantillons correspondent aux endroits des essais in situ. On a comparé les résultats et on s'est aperçu qu'il y a une grande différence entre les essais in situ et ceux au

au laboratoire. C'est-à-dire que pour les sols avec leur teneur en eau naturelle, la cohésion est moins importante au laboratoire que celle in situ (20 % à 80 %) et dans certains cas (3 échantillons), cette différence est très forte.

D'ailleurs, d'après les résultats d'essais au laboratoire, la cohésion diminue avec la profondeur, ce qui est en contradiction avec les résultats obtenus in situ, car l'augmentation du compactage a été prouvée dans tous les endroits y compris dans les endroits des essais. La variation de cohésion observée au laboratoire se situe entre 0,35 et 1,05 kg/cm<sup>2</sup>, et l'angle de frottement varie entre 16 et 29°, ce qui le différencie un peu avec celui des essais in situ.

Les deux essais faits au laboratoire après immersion dans l'eau, ont montré que la cohésion avait aussi une grande différence avec celle in situ, c'est-à-dire qu'elle est de 3 à 10 fois plus faible qu'in situ. Sa valeur est de 0,15 kg/cm<sup>2</sup>.

De la même manière, l'angle de frottement interne mesuré au laboratoire en conditions saturées est de 1,5 fois à 2 fois plus faible qu'in situ. On peut dire que les chiffres, pour la cohésion et l'angle de frottement interne in situ, sont plus acceptables, ce qui montre une cohésion assez élevée et un angle de frottement interne moyen pour ce type d'alluvions.

## CONCLUSIONS

La deuxième partie est donc consacrée aux résultats d'études géologiques et géotechniques sur les alluvions de la plaine de Tabasse.

Dans le Chapitre IV on donne les conditions climatiques de la région étudiée ainsi que les généralités sur la géologie ou l'hydrogéologie. La plaine de Tabasse présente des conditions analogues à celles des autres glacis d'accumulation. Elle est constituée d'alluvions pouvant atteindre 250 à 300 m d'épaisseur en son centre. Ces alluvions comportent des matériaux grossiers et fins, la proportion de ces derniers variant de 15-25 % dans les parties hautes du glacis jusqu'à 45 % dans le Sud de la plaine. On peut distinguer par l'âge 3 séries d'alluvions :

- les plus anciennes ont été déposées à la fin du Pliocène et au début du Quaternaire. Ce sont des conglomérats assez bien cimentés qu'on rencontre à proximité des lits des anciens oueds les plus importants. On les rencontre également au fond des puits les plus profonds forés au centre de la plaine.
- On rencontre ensuite des alluvions plus récentes (Q<sub>2</sub> - Q<sub>3</sub>) constituées de matériaux grossiers avec un faible pourcentage de matériaux fins. On trouve parfois des lentilles de conglomérats épaisses de 1,50 à 3 m.
- Les alluvions les plus récentes (Q<sub>4</sub>) se trouvent en surface et sont constituées également de matériaux grossiers et fins.

En général, le pourcentage de matériaux grossiers augmente avec la profondeur, de même que la taille de ces matériaux. On en conclut donc que les écoulements torrentiels ont été beaucoup plus puissants au début du Quaternaire. Ils ont été la conséquence d'un climat plus humide que maintenant (période glaciaire pour l'Europe et le Nord de l'Asie). La forme des matériaux grossiers (angulaires et semi-arrondis) indique que ces écoulements ont toujours eu néanmoins un caractère temporaire.

Au point de vue hydrogéologique, la plaine de Tabasse présente une particularité : l'eau est salée (3 à 8 g/l) dans le Sud de la plaine et le coefficient de perméabilité est faible. Ceci est dû au fort pourcentage de particules fines et à la compacité élevée, ainsi qu'à la transformation en conglomérats d'une partie des matériaux.

Enfin, les précipitations sont très faibles (100 mm/an).

Les Chapitres V et VI sont consacrés à la description des essais effectués au Laboratoire ou in situ. On peut noter qu'on a utilisé la technique des puits de reconnaissance creusés à la main car elle est très économique en Iran. C'est un mode de reconnaissance intéressant pour ces alluvions.

En ce qui concerne les essais géotechniques, nous avons noté que les essais physiques (sur échantillons remaniés) sont faciles à exécuter et sont économiques. Au contraire, pour ce genre de matériau, les essais mécaniques au laboratoire posent beaucoup de problèmes (nécessité d'avoir de grandes cellules triaxiales ou de grandes boîtes de cisaillement, difficulté de prendre des échantillons non remaniés et de les acheminer tels au laboratoire). Les essais mécaniques in situ (essai de plaque ou cisaillement in situ) donnent des résultats plus sûrs mais ils sont d'exécution longue et coûteuse. Pour ces raisons, nous n'avons pu disposer que d'un nombre limité d'essais mécaniques, ce qui nous a gênés dans notre travail.

C'est pourquoi nous avons cherché des moyens simples de corrélérer certaines propriétés mécaniques avec des propriétés physiques. Cette recherche fait l'objet de la 3ème partie.

Dans le Chapitre VII, on donne la synthèse des résultats des essais géotechniques. Les particularités de la granulométrie ont été exposées plus haut et nous ne reviendrons pas sur ce point. Le poids spécifique des grains est assez constant dans toute la plaine et varie de 2,66 à 2,70 g/cm<sup>3</sup>. La majorité des éléments est en effet calcaire.

La densité sèche in situ est élevée : 2,20 à 2,35 g/cm<sup>3</sup>, ce qui traduit un compactage important, réalisé vraisemblablement par l'effet dynamique des écoulements des torrents. Les valeurs de  $\gamma$  diminuent vers le centre de la plaine. Comme conséquence, l'indice des vides est faible (0,20 en moyenne), de même que la porosité (25 %) et ces valeurs varient en sens inverse de  $\gamma$ .

La teneur en eau est faible (2-10 %) à cause de la forte évaporation et de la grande profondeur de la nappe. Au-dessus de la nappe, la teneur en eau augmente dans la plaine et ceci est dû à l'augmentation de la proportion de particules fines. Le degré de saturation au contraire est souvent élevé, à cause de la grande compacité.

La salinité augmente vers le centre de la plaine et dans quelques zones on observe 2 à 3 % du poids du sol constitué de sels.

Les caractéristiques mécaniques sont en général excellentes, ce qui fait de ces sols de bons terrains de fondation. Le module de déformation varie de 1630 jusqu'à 7700 kg/cm<sup>2</sup> (850 à 2750 si le sol est saturé). Le tassement, pour des charges de 4 bars, varie entre 0,29 et 1,28 mm (0,15 à 3,45 mm si le sol est saturé).

Les valeurs de cohésion mesurées in situ sont élevées : 0,92 à 2,92 bars. Au laboratoire, les valeurs trouvées sont plus faibles, mais nous leur accordons moins de confiance. L'angle de frottement mesuré in situ varie de 15 à 30° pour le sol à l'état naturel et de 18 à 31° pour les sols saturés.

TROISIEME PARTIE

ETUDE DES CORRELATIONS ENTRE L'ANGLE DE FROTTEMENT  
INTERNE ET D'AUTRES PARAMETRES POUR DES SOLS PULVE-  
RULENTS SANS FINS

CHAPITRE VIII - ETUDE DU PROBLEME DES CORRELATIONS  
EN MECANIQUE DES SOLS

CHAPITRE IX - ETUDE DE L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE

CHAPITRE X - RESULTAT DES ESSAIS SUR LES GRAINS  
D'ACIER ET LES SABLES

CONCLUSIONS

### INTRODUCTION

Dans les études de géologie de l'ingénieur effectuées sur la plaine de Tabasse et présentées ci-dessus, on n'a pas rencontré de difficultés pour définir les caractéristiques physiques des matériaux ; au contraire les quelques essais mécaniques ont montré les difficultés pratiques dans la définition des caractéristiques mécaniques ; dans certains cas même, on n'a pu définir de caractéristiques mécaniques.

Pour des terrains contenant peu de particules fines, comme ceux de la plaine de Tabasse, l'angle de frottement  $\varphi$  est un paramètre très important à connaître pour les problèmes de stabilité de talus, forces portantes de fondations, etc. Or, à cause de la présence de matériaux grossiers, la mesure de  $\varphi$  au laboratoire sur échantillons est pratiquement impossible. En effet, il faudrait des échantillons dont le diamètre soit au moins 10 fois plus grand que les plus gros éléments et d'autre part le prélèvement d'échantillons non remaniés est impossible.

C'est pourquoi nous avons réalisé, avec l'aide d'un stagiaire de l'Ecole Centrale, M. DENIAU, un certain nombre d'essais de laboratoire pour mettre en évidence l'influence sur l'angle de frottement des facteurs suivants :

- . forme des grains (angularité),
- . dimension des particules,
- . degré de compactage, c'est-à-dire densité sèche,
- . contrainte principale mineure  $\sigma_3$ .

CHAPITRE VIII

ETUDE DU PROBLEME DES CORRELATIONS EN MECANIQUE DES SOLS

1 - Classification des paramètres

2 - Etude des corrélations entre ces paramètres

VIII - ETUDE DU PROBLEME DES CORRELATIONS EN MECANIQUE DES SOLS

Pour un sol donné, on peut mesurer un très grand nombre de paramètres de natures très diverses, forme des grains, granulométrie, limites d'Atterberg, angle de frottement interne, densité minimum, teneur en eau, etc. On conçoit que tous ces paramètres ne peuvent être indépendants et que certaines relations doivent exister entre eux.

Mais, pour une recherche rationnelle de ces relations, il convient d'abord de classer tous ces paramètres. Pour cela, il nous a paru intéressant de reprendre une classification présentée par BIAREZ et FAVRE dans le rapport "Table ronde sur les corrélations de paramètres en mécanique des sols", paru en Septembre 1972, à l'Ecole Centrale de Paris. La plupart des résultats présentés dans ce chapitre sont extraits de cette publication.

1 - Classification des paramètres

Nous pouvons tout d'abord distinguer deux sortes de paramètres : d'une part ceux d'identification ou physiques (nature du matériau, forme et dimension des grains, limites d'Atterberg, etc.), d'autre part les paramètres mécaniques (cohésion, angle de frottement interne, etc.)

Nous pouvons ensuite distinguer trois classes de paramètres :

Classe I - Les paramètres qui ne dépendent pas de l'assemblage initial.

Ce sont des paramètres de nature :

- . nature des grains, avec entre autres :
  - minéralogie,
  - géométrie des grains qui comprend : leur forme, leurs dimensions (la dimension moyenne étant à la base de la courbe granulométrique),
- . les propriétés mécaniques indépendantes de l'assemblage. On peut séparer ces paramètres en deux catégories :
  - les paramètres des essais mécaniques normalisés quant aux sollicitations (qui définissent un assemblage). Se classent dans cette catégorie les caractéristiques Proctor, les limites d'Atterberg ...

- les paramètres des lois rhéologiques indépendants de l'assemblage initial, tels l'angle de frottement interne résiduel (pour les sables), ou l'indice de compression Cc. Ces paramètres sont en général indépendants de l'assemblage initial car l'échantillon a subi à ce moment une "grande déformation", où l'on est largement sorti du domaine élastique, et l'assemblage ne dépend donc plus que des sollicitations actuelles.

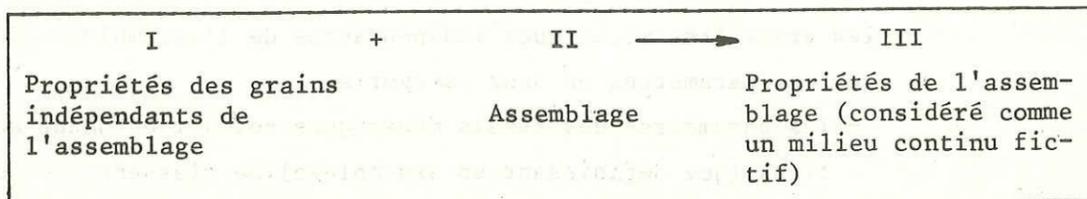
Classe II - Tous les paramètres d'assemblage. Mais la géométrie d'un assemblage est très complexe à décrire. En simplifiant beaucoup on peut retenir comme paramètres :

- . ceux d'une phase solide, qui comprennent :
  - les paramètres de compacité (densité, indice des vides, porosité)
  - les paramètres d'anisotropie tels que les directions statiques des plans tangents au contact des particules (valables surtout pour les milieux artificiels uniformes), ou le rapport Kv/Kh de la perméabilité verticale à la perméabilité horizontale ;
- . les paramètres de la phase liquide et essentiellement la teneur en eau. Celle-ci donne une idée de la distribution de l'eau par rapport au solide.

Classe III - Les paramètres mécaniques dépendant de l'assemblage initial et de la nature du matériau. On peut les diviser en :

- . paramètres de lois rhéologiques : module d'élasticité E, cohésion C, valeur au pic de l'angle de frottement interne  $\varphi$ . Ces paramètres sont mesurés en champ de contrainte homogène ;
- . paramètres de position mécanique (densité relative, indice de liquidité), c'est-à-dire des propriétés rapportées à des valeurs normalisées ;
- . paramètres de solution, qui sont mesurés en champ de contrainte non homogènes. Ce sont tous les paramètres d'essais "in situ".

Nous pouvons résumer ce qui précède à l'aide du schéma suivant :



.../...

2 - Etude des corrélations entre ces paramètres

De la classification précédente il ressort que l'on ne peut avoir que deux types de corrélations :

- a) les corrélations à l'intérieur d'une même classe. En particulier de très nombreuses corrélations ont pu être établies entre les paramètres de la classe I, telles :
- . les relations entre l'indice de plasticité  $I_p$  et la limite de liquidité  $W_L$ . Ainsi dans les zones tempérées on a pu vérifier pour les argiles ordinaires la relation  $I_p = 0,73 (W_L - 20)$ . Nous avons obtenu pour les régions étudiées (zone aride) une relation semblable :  $I_p = 0,73 (W_L - 15)$  ;
  - . les relations entre les caractéristiques Proctor et la granulométrie.

b) Les corrélations faisant intervenir les paramètres des trois classes :

Parmi ces corrélations, les plus intéressantes sont celles qui relient les paramètres des lois rhéologiques (c,  $\varphi$  et E) aux paramètres des classes I et II. En effet, elles permettent d'évaluer les propriétés mécaniques du sol sans avoir à faire des essais tels que les essais triaxiaux, qui sont d'une mise en oeuvre difficile, surtout avec les sols granulaires à grosses particules. Certaines corrélations ont pu être ainsi établies :

- . pour les argiles ordinaires des corrélations entre la cohésion non drainée, la teneur en eau, la contrainte de consolidation et le module oedométrique. Les corrélations figurent dans le livre "Table ronde sur les corrélations" précédemment cité.
  - . Dans ce même livre, on trouve des corrélations pour les sables entre le module oedométrique et la densité.
- Il est évident que ces corrélations ne seront valables que si l'on fixe un nombre important de paramètres. Ceci pourrait se faire en classifiant les matériaux par unité géologique. On peut fixer ainsi indirectement un certain nombre de facteurs : nature minéralogique des grains, angularité, mode de dépôt (influence sur l'assemblage initial), granulométrie (classification en sables, argiles ...)

Dans la suite, nous nous sommes intéressés à l'étude de corrélations possibles avec l'angle de frottement interne  $\varphi$ . C'est en effet un des seuls paramètres des lois rhéologiques qui interviennent dans les calculs de stabilité de pente ou de fondations pour les sols contenant une faible proportion (10 à 20 %) de matériaux fins ( $d < 0,74 \mu$ ).

.../...

CHAPITRE IX

ETUDE DE L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE

- 1 - Définition de l'angle de frottement interne
- 2 - Présentation des essais effectués
- 3 - Description des essais effectués

IX - ETUDE DE L'ANGLE DE FROTTEMENT INTERNE

1 - Définition de l'angle de frottement interne

Il paraît important, avant d'aller plus loin, de préciser quelle est la signification réelle de  $\varphi$ . L'angle de frottement interne a longtemps été considéré comme une donnée intrinsèque du sol. Cet angle était à la base même de la formule de COULOMB :  $\tau = C + \sigma \operatorname{tg} \varphi$  qui sert encore dans tous les calculs de stabilité.

Mais il semble que, maintenant, on ne puisse plus parler d'un  $\varphi$  intrinsèque. En effet, l'expérience montre que  $\varphi$  dépend de :

- . l'appareil utilisé pour le déterminer (appareil triaxial, boîte de cisaillement),
- . de la manière de le déterminer (calcul à la résistance maximale, au palier...)
- . des conditions de l'expérience, en particulier de la contrainte latérale  $\sigma_3$  pour le triaxial.

Aussi, dans la suite, l'angle de frottement interne sera considéré comme résultats de la mesure de la résistance maximum à l'appareil triaxial sous une contrainte  $\sigma_3$  donnée. La contrainte  $\sigma_3$  sera considérée comme un nouveau facteur pouvant influencer . Avec  $c = 0$ ,  $\varphi$  sera donc pour  $\sigma_3$  donné, l'angle que fait dans le plan de MOHR la tangente menée par l'origine au cercle de MOHR, avec l'axe des contraintes normales pour un matériau sans cohésion.

$\varphi$  sera donc calculé par la formule

$$\sin \varphi = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad \text{pour } (\sigma_1 - \sigma_3) \text{ maximum}$$

.../...

ce qui s'écrit encore :

$$\sin \varphi = \frac{1}{1 + \frac{2\sigma_3}{\tau M}}$$

où  $\tau M = (\sigma_1 - \sigma_3)$  maximum

Nous pouvons maintenant étudier l'influence des divers paramètres sur  $\varphi$

Signalons que l'étude de l'angle de frottement interne en fonction des facteurs tels que compacité, forme et rugosité des grains, grosseur des grains, granulométrie, a fait l'objet d'un certain nombre de recherches et de publications (AL-ISSA, 1973 ; BECKER, CHAN, SEED, 1973 ; de BEER, 1965 ; KIRKPATRICK, 1965 ; KOERNER, 1970 ; PERROT, 1968 ; WINTERKORN, DUTERTRE). En général, on a essayé de préciser la contribution de chaque facteur dans la valeur de l'angle de frottement. Comme exemple, nous reproduisons ci-dessous le tableau publié par COSTET et SANGLERAT (1969) pour estimer l'angle de frottement d'un matériau

$\varphi = 36^\circ + \varphi'_1 + \varphi'_2 + \varphi'_3 + \varphi'_4$			
1. Compacité	$\varphi'_1$	lâche moyenne serrée	- 6° 0 + 6°
2. Forme et rugosité des grains	$\varphi'_2$	Aigus moyens arrondis très ronds	+ 1° 0 - 3° - 5°
3. Grosseur des grains	$\varphi'_3$	sable gravier fin gros gravier	0 + 1° + 2°
4. Granulométrie	$\varphi'_4$	uniforme moyenne étalée	- 3° 0 + 3°

On remarque tout d'abord que tous les paramètres énumérés ci-dessus, sauf celui de forme et rugosité, peuvent s'exprimer par une valeur numérique. Les valeurs numériques sont en effet nécessaires pour pouvoir affiner de telles corrélations. Par exemple, on peut exprimer la compacité par la densité relative  $D_r$ , la grosseur des grains par la dimension de la fraction la plus importante, la granulométrie par  $\frac{d_{60}}{d_{10}}$  etc. Pour la forme et la rugosité des grains, il n'existe aucun paramètre.

.../...

Un de nos soucis dans cette étude a été de représenter numériquement ce paramètre au point de vue de la mécanique du sol<sup>(1)</sup>.

La deuxième remarque intéressante à faire sur le tableau ci-dessus est l'importance des deux facteurs de compacité et de forme-rugosité. C'est pourquoi dans le dixième chapitre nous avons étudié l'influence de la compacité sur l'angle de frottement, en cherchant à vérifier la formule empirique proposée par CAQUOT en 1939.

$$e_i \cdot \text{tg } \varphi_{pic} = A$$

où  $e_i$  est l'indice des vides initial et  $\varphi_{pic}$  la valeur de l'angle de frottement pour  $(\sigma_1 - \sigma_3)$  max. A est une constante qui dépend de la nature du matériau et de son angularité et de l'état de contrainte moyen. S'il existe un moyen de déterminer facilement A, il sera alors possible de déterminer  $\varphi_{pic}$  in situ en mesurant l'indice des vides in situ.

## 2 - Présentation des essais effectués

### a) Raison du choix du matériau

Le matériau a été choisi car il permettait d'obtenir des échantillons homogènes du point de vue de l'angularité. Par rapport aux billes de verres concassées, il présentait de plus l'avantage de ne pas comporter d'angles vifs, qui sont très rares dans la réalité. Mais ce matériau a des inconvénients qui ne sont malheureusement pas évaluables. En particulier il a un poids spécifique élevé (influence probable sur  $e_{max}$ ) et ses propriétés mécaniques sont assez différentes de celles du sable (peu de ruptures de particules).

### b) Description du matériau

Nous avons travaillé sur de la grenaille d'acier utilisée en particulier pour le décapage des surfaces et qui nous a été fournie par la Société WHEELABRATOR-ALLEVARD. Nous disposons de deux sortes de grenaille :

- . un type à grains ronds : nous avons trois échantillons de granulométries très serrées ( $d_{60}/d_{10} < 2$ ) et dont les grains avaient des diamètres mo-

(1) Les paramètres purement sédimentométriques comme les indices d'émoûsés ne sont valables que pour une fraction granulométrique donnée et ne rendent pas compte du facteur de rugosité et forme pour l'ensemble du sol.

yens respectifs de 0,2 mm, 0,6 mm et 1,7 mm.

- un type à grains anguleux ; nous avons trois échantillons à  $d_{60}/d_{10} < 2$  et dont les dimensions moyennes respectives (mesurées au tamis) étaient 0,2 mm, 0,7 mm et 1,7 mm.

Le deuxième type de grains provient du concassage de grenaille sphérique. Un inconvénient très important nous est apparu au cours des essais : l'angularité des grains augmentait quand la dimension diminuait. Ainsi les grains les plus gros (1,7 mm) se présentaient-ils souvent comme une demi-sphère. Il nous a donc été impossible de dissocier le rôle de la dimension et celui de l'angularité pour ce matériau. Le troisième type de matériau est le sable alluvial de Sonnaz (Chambéry).

Les densités spécifiques G des grains déterminées au picnomètre étaient :

Matériaux	Dimension	G
Grains ronds	1,0-2,5	7,71
	0,5-1,0	7,82
	0,2-0,5	7,83
Grains anguleux	1,0-2,5	7,87
	0,5-1,0	7,89
	0,1-0,5	7,98
Sable de Sonnaz	1,0-2,0	2,685
	0,5-1,0	2,687
	0,2-0,5	2,697

### 3 - Description des essais effectués

#### a) Mesure des densités extrêmes $\gamma_m$ et $\gamma_M$

La densité minimum  $\gamma_m$  a été déterminée en déversant lentement le matériau à l'aide d'un entonnoir à l'intérieur d'une boîte de volume connu.

La densité maximum a été obtenue en faisant vibrer le matériau sur une table vibrante pendant 10 minutes.

Les indices des vides extrêmes ont été calculés par les formules :

$$e_m = \frac{\gamma_s - \gamma_M}{\gamma_M} \quad \text{et} \quad e_M = \frac{\gamma_s - \gamma_m}{\gamma_m}$$

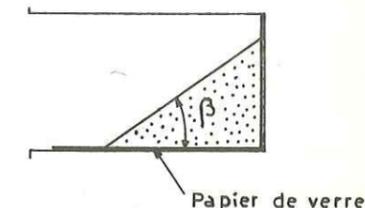
#### b) Mesure de l'angle de talus naturel $\beta$

La méthode utilisée consistait à remplir une boîte rectangulaire avec le

.../...

matériau étudié. La boîte était alors basculée lentement jusqu'à ce qu'elle ait tourné de 90°.

Nous mesurons alors l'angle que faisait la surface du talus obtenue sur l'horizontale. Du papier de verre était collé sur les parois afin d'éviter le glissement du talus sur ces parois.



Une comparaison avec la méthode qui consiste à prendre la pente d'un talus conique qui était obtenue par déversement lent du matériau, montre qu'il n'y a pratiquement pas de différence entre les deux méthodes quant aux résultats.

#### c) Essais à l'appareil triaxial

##### Conditions expérimentales

- essais sur matériau sec (mais mis à l'atmosphère ambiante pendant plusieurs jours),
- la pression intérieure de l'échantillon est constamment égale à la pression atmosphérique,
- la vitesse d'écrasement était de 1 mm/mn,
- les échantillons avaient un diamètre nominal de 35 mm et une hauteur de 88 mm,
- il n'y avait pas de dispositif d'antifrettage aux têtes de l'échantillon. La déformation n'était donc pas cylindrique, mais en forme de tonneau.

##### Hypothèses de calcul

- Pour le calcul de la contrainte longitudinale  $\sigma_1$ , on a utilisé la correction de section par la formule du tonneau. Nous introduisons ainsi deux erreurs :
  - les corrections employées étaient valables pour un échantillon de diamètre égal à 35 mm. Or, le diamètre de la section expérimentale variait entre 34 et 36 mm. Mais des vérifications, faites avec le diamètre réel, ont montré que l'erreur ainsi introduite sur  $\varphi$  était inférieure à 1° ;
  - la section calculée par la formule du tonneau était différente de la section expérimentale au cours de l'essai. Mais cette différence était négligeable avant l'apparition du pic de résistance, qui seul nous intéresse pour la détermination de  $\varphi$ .

.../...

- Pour le calcul de la densité initiale de l'échantillon, nous calculions le volume de celui-ci en mesurant le diamètre dans trois sections différentes, après avoir fait le vide à l'intérieur de l'échantillon. Une dispersion assez grande est apparue entre les trois résultats (jusqu'à 6 % d'écart). Ceci provenait de la forme non parfaitement cylindrique de l'éprouvette, une fois le moule enlevé. Toute une série de mesures de vérifications faites sur quelques échantillons a montré que la différence entre la moyenne sur 3 mesures et celle sur 16 mesures est inférieure à 0,9 %. On peut donc présumer que l'erreur aléatoire sur la mesure du diamètre D, faite en prenant la moyenne de 3 mesures (dans 3 sections différentes) est inférieure à 1 %. L'erreur sur la hauteur H étant inférieure à 0,5 % et celle sur le poids P étant négligeable, on a par le calcul suivant :

$$\gamma_d = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{4} \times H} \quad \frac{\Delta \gamma_d}{\gamma_d} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{2 \Delta D}{D}$$

Donc l'incertitude relative sur  $\gamma_d$  due à cette erreur aléatoire est inférieure à 2,5 %. Nous avons calculé les erreurs dues à l'épaisseur de la membrane (influence sur le diamètre) et la variation de la densité initiale due à la mise sous la pression latérale  $\sigma_3$ . Les deux erreurs sur  $\gamma_d$  entraînées ainsi sont inférieures à 1 %, de plus elles sont toujours dans le même sens et ne gênent donc pas nos travaux.

## CHAPITRE X

### RESULTATS DES ESSAIS SUR LES GRAINS D'ACIER ET LES SABLES

- 1 - Densités extrêmes
- 2 - Angle de talus naturel  $\beta$
- 3 - Essais triaxiaux
- 4 - Résultats relatifs au problème de la forme des particules
- 5 - Résultats des essais sur les sables

X - RESULTATS DES ESSAIS SUR LES GRAINS D'ACIER

1 - Densités extrêmes

a) Influence de la dimension

Nous avons tracé les courbes donnant  $e_m$  et  $e_M$  en fonction de la dimension des particules (Fig.22). Nous avons reporté aussi sur cette figure les indices de vide limite  $e_{min}$  et  $e_{max}$  qui ont été obtenus lors des essais triaxiaux. Ces valeurs diffèrent légèrement des précédentes, ce qui n'est pas surprenant compte tenu des conditions expérimentales différentes.

Nous pouvons constater sur ces courbes que :

- . pour les matériaux à grains ronds, les indices des vides limites varient peu avec la dimension. On peut les prendre comme constants dans le domaine de dimension étudié (avec des variations de l'ordre de 8 %) ;
- . pour les matériaux angulaires : les indices des vides diminuent quand la dimension augmente. Ainsi  $e_m$  diminue de plus de 25 % quand on passe de la dimension 0,2 mm à celle de 1,7 mm.

Mais cette diminution est probablement due en grande partie à la diminution de l'angularité des particules quand la dimension augmente.

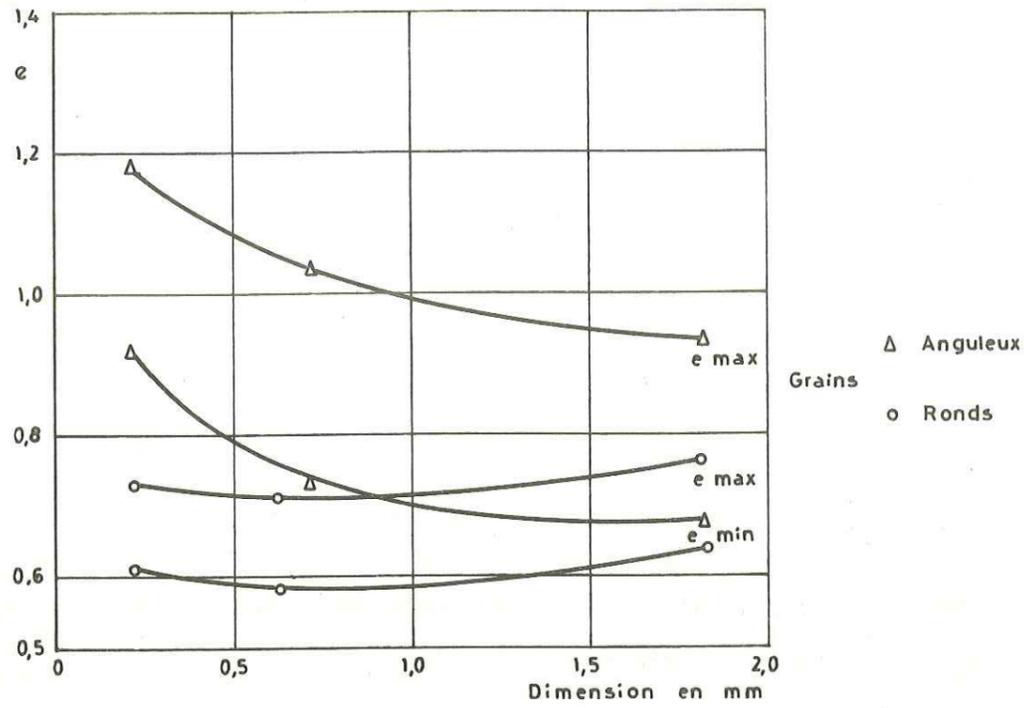
Dans les deux cas on constate que la différence ( $e_M - e_m$ ) reste sensiblement constante quand la dimension augmente. On peut comparer ces résultats avec ceux trouvés par BECKER, SEED et CHAN (1973).

Ces auteurs ont trouvé que pour des sables :

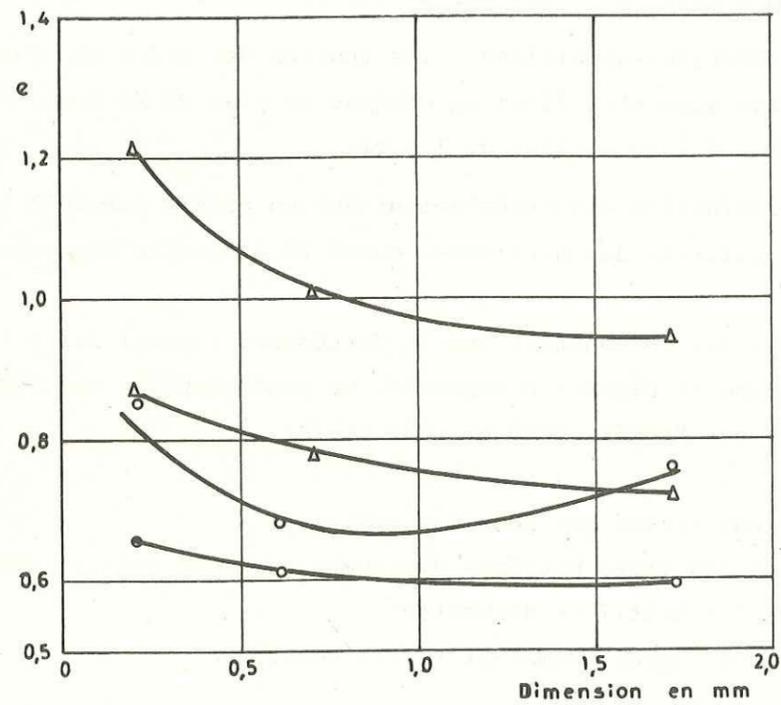
- . les indices des vides extrêmes diminuent quand la taille maximum des particules de l'échantillon augmentait,
- . la différence ( $e_M - e_m$ ) semblait rester constante.

b) Influence de l'angularité

Sur la figure 22 nous pouvons constater que les matériaux angulaires ont des indices des vides limites plus élevés.



Variation de  $e_{max}$  et  $e_{min}$  en fonction de la dimension des particules (compactage par vibrations)



Variation des indices des vides limites obtenue dans le triaxial en fonction de la dimension des particules

Fig. 22

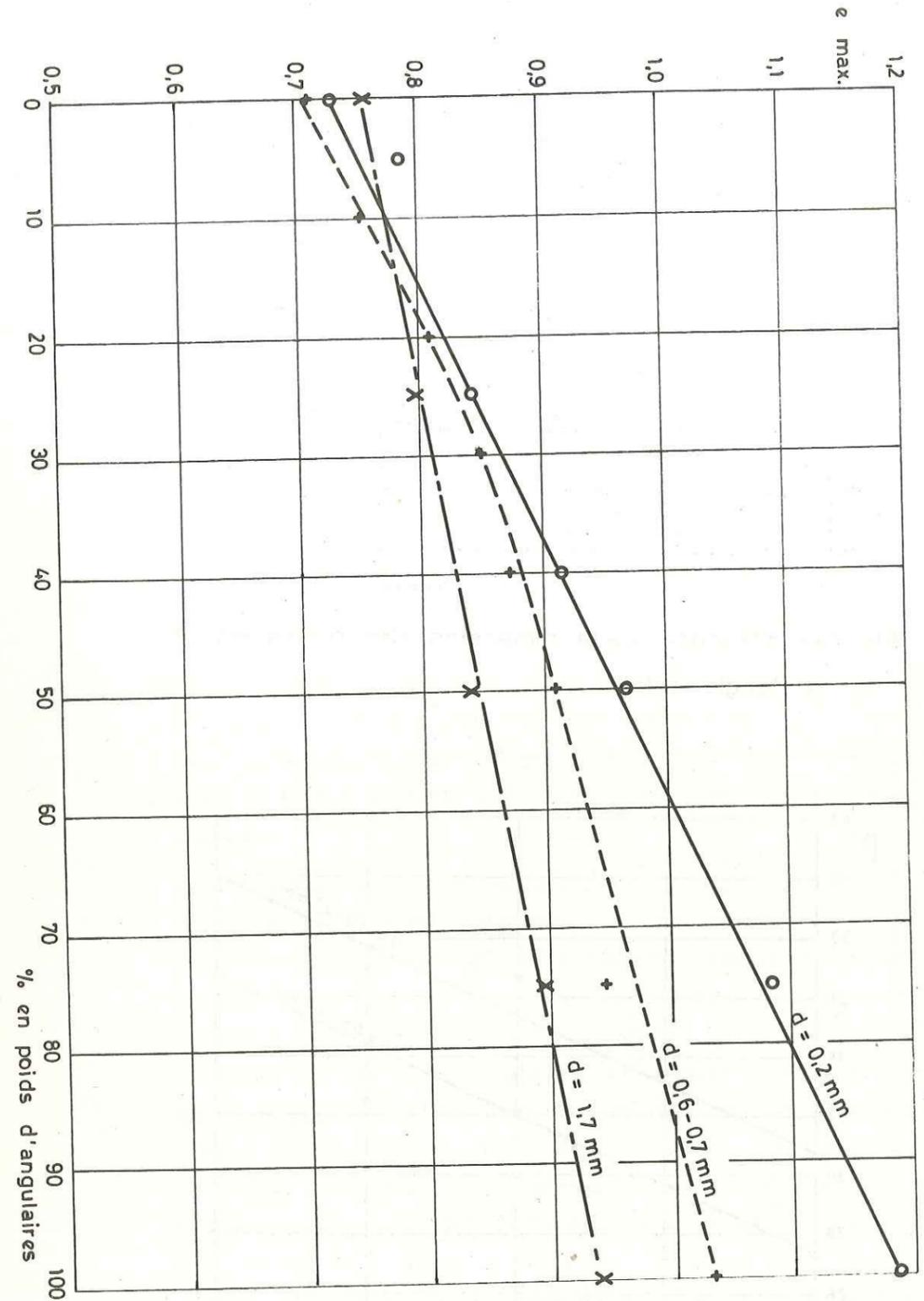


Fig. 23 - Variation de  $e_{max}$  en fonction du pourcentage d'angulaires dans un mélange de particules rondes et angulaires.

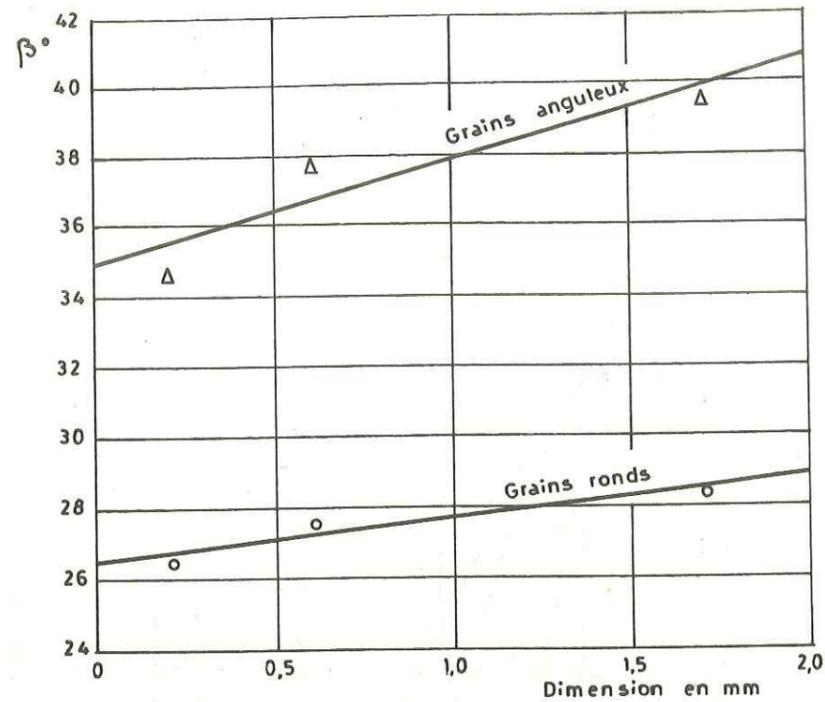


Fig. 24 - Influence de la dimension des grains sur l'angle  $\beta$

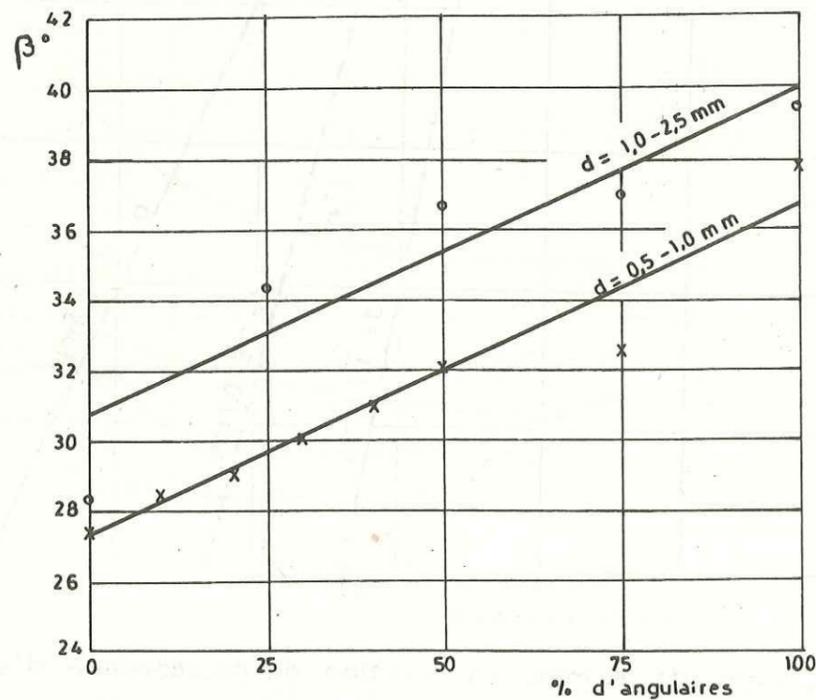


Fig. 25 - Influence du pourcentage de grains dans un mélange sur l'angle  $\beta$

Pour mettre le phénomène mieux en évidence, nous avons fait des mélanges des matériaux ronds et angulaires de dimensions moyennes et égales et nous avons tracé la courbe donnant  $e_m$  en fonction du pourcentage d'angulaires (voir Fig. 23). On constate que  $e_m$  est une fonction sensiblement linéaire croissante du pourcentage d'angulaires.

Ceci permet de penser que l'on pourrait utiliser  $e_m$  pour juger de l'angularité d'un matériau.

On constate d'autre part que le fait que, pour les angulaires, la dimension soit liée à l'angularité a pour effet d'écarter les courbes quand la proportion d'angulaires augmente.

2 - Angle de talus naturel  $\beta$

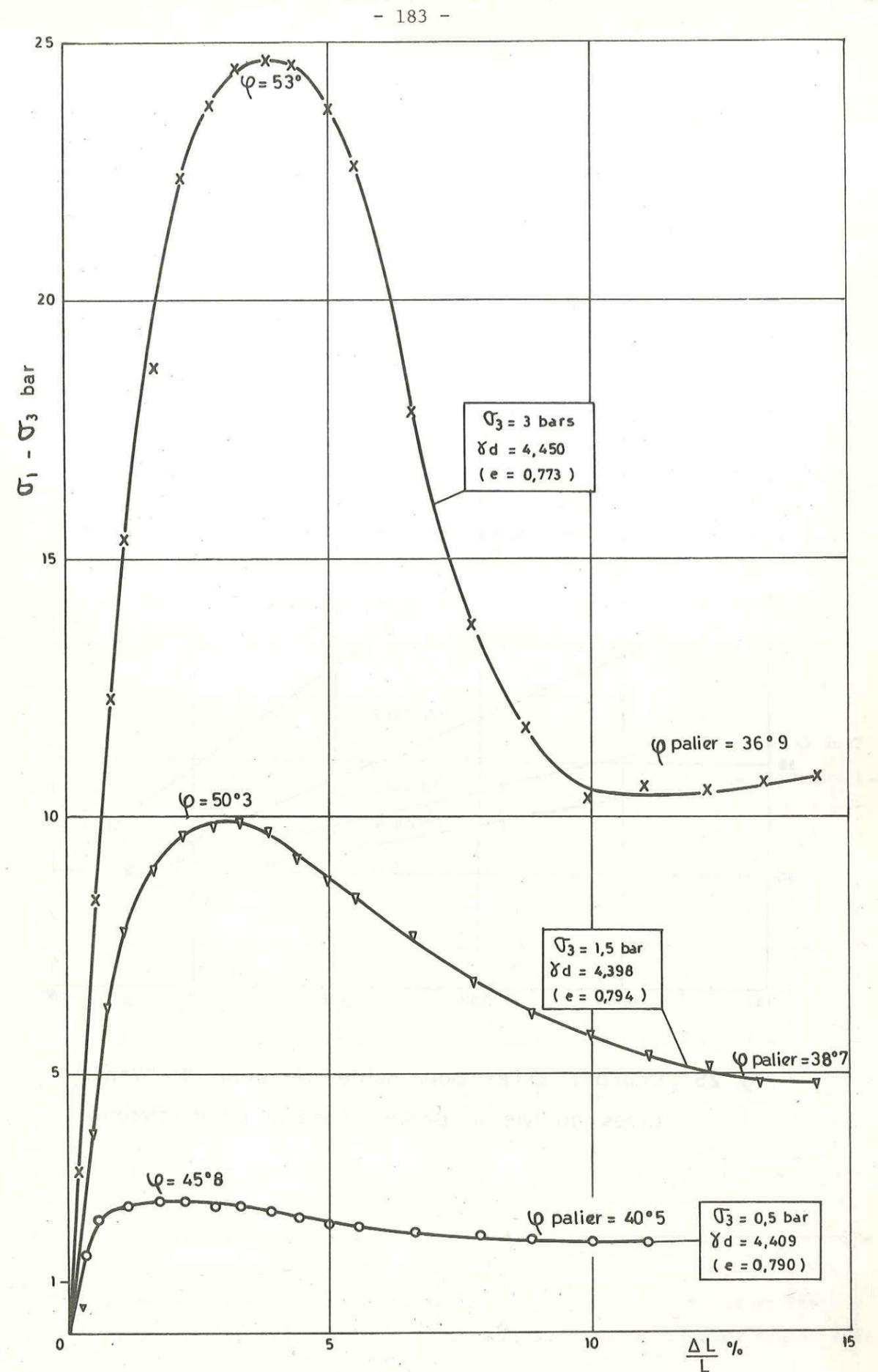
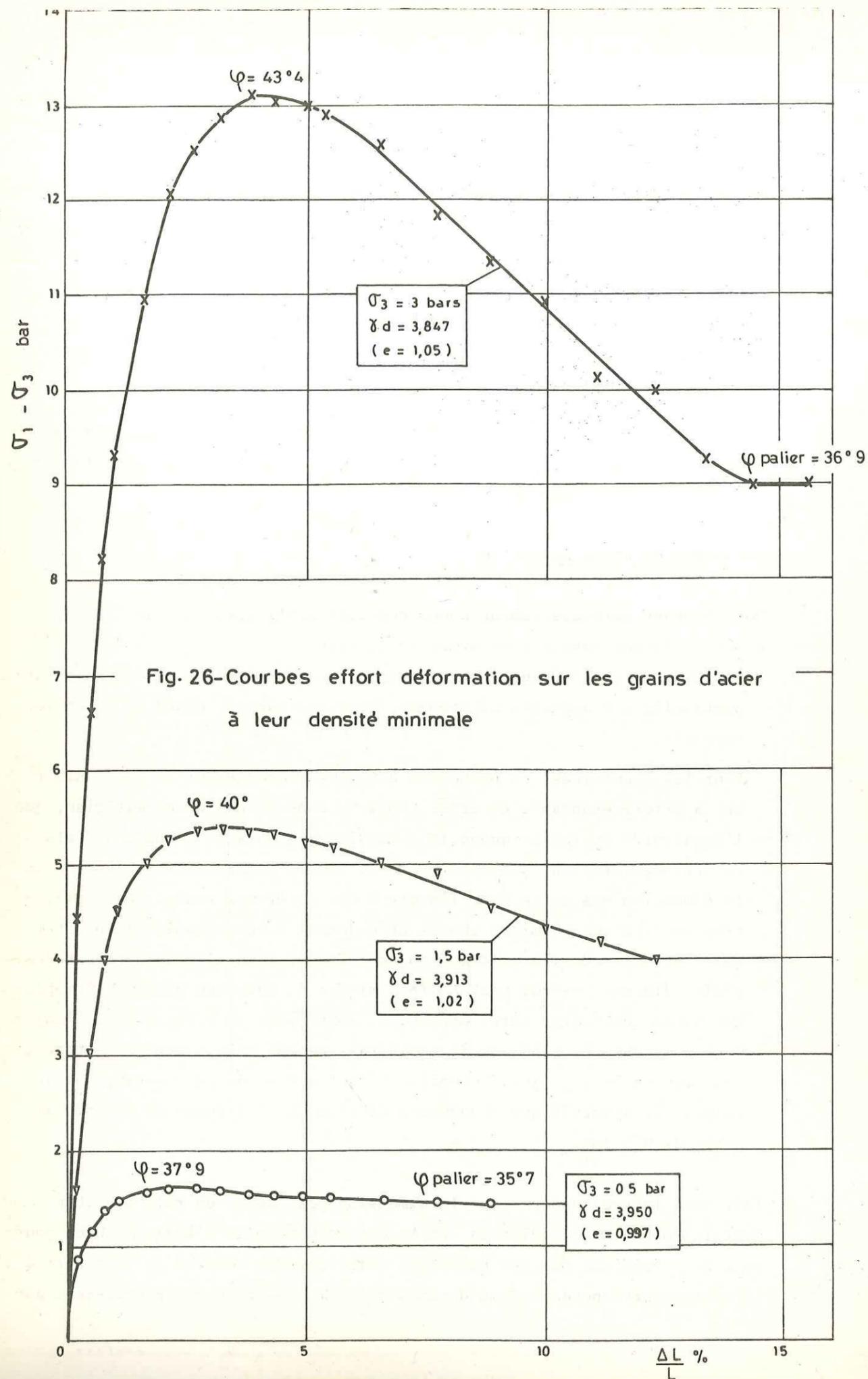
Nous n'avons malheureusement aucun résultat bibliographique sur ce sujet.

A partir de nos essais nous avons pu tracer :

les courbes de la figure 24 qui donnent  $\beta$  en fonction de la dimension des particules :  $\beta$  augmente légèrement, pour les rondes, quand la dimension augmente.

Pour les angulaires, ce phénomène est plus prononcé. Or là le résultat est à priori étonnant. En effet, on a vu dans le cas de ce matériau, que l'angularité diminuait quand la dimension augmentait. L'angle de talus naturel devrait donc diminuer ou, à la limite augmenter moins vite avec la dimension que ne le fait l'angle  $\beta$  des matériaux ronds. Une explication pouvait aux premiers abords être donnée à ce phénomène : en effet, quand on augmente l'angularité on accroît  $e_m$ , donc l'enchevêtrement des grains diminue, ce qui peut faire diminuer  $\beta$ . Mais une autre expérience est venue contredire cette hypothèse. Nous avons en effet étudié l'angle  $\beta$  d'un mélange de ronds et d'angulaires, ce qui nous a permis de tracer : les courbes de la figure 25 donnant  $\beta$  en fonction du pourcentage d'angulaires. Il apparaît que  $\beta$  augmente de plus de 30 % quand ce pourcentage passe de 0 à 100.

Tout ceci laisse supposer que la dimension peut avoir un rôle important pour les matériaux angulaires sur la détermination de l'angle  $\beta$ . Ceci pourrait être confirmé par les positions relatives des courbes de la figure 25; la courbe correspondant à la dimension 1,7 mm se situe assez nettement au-



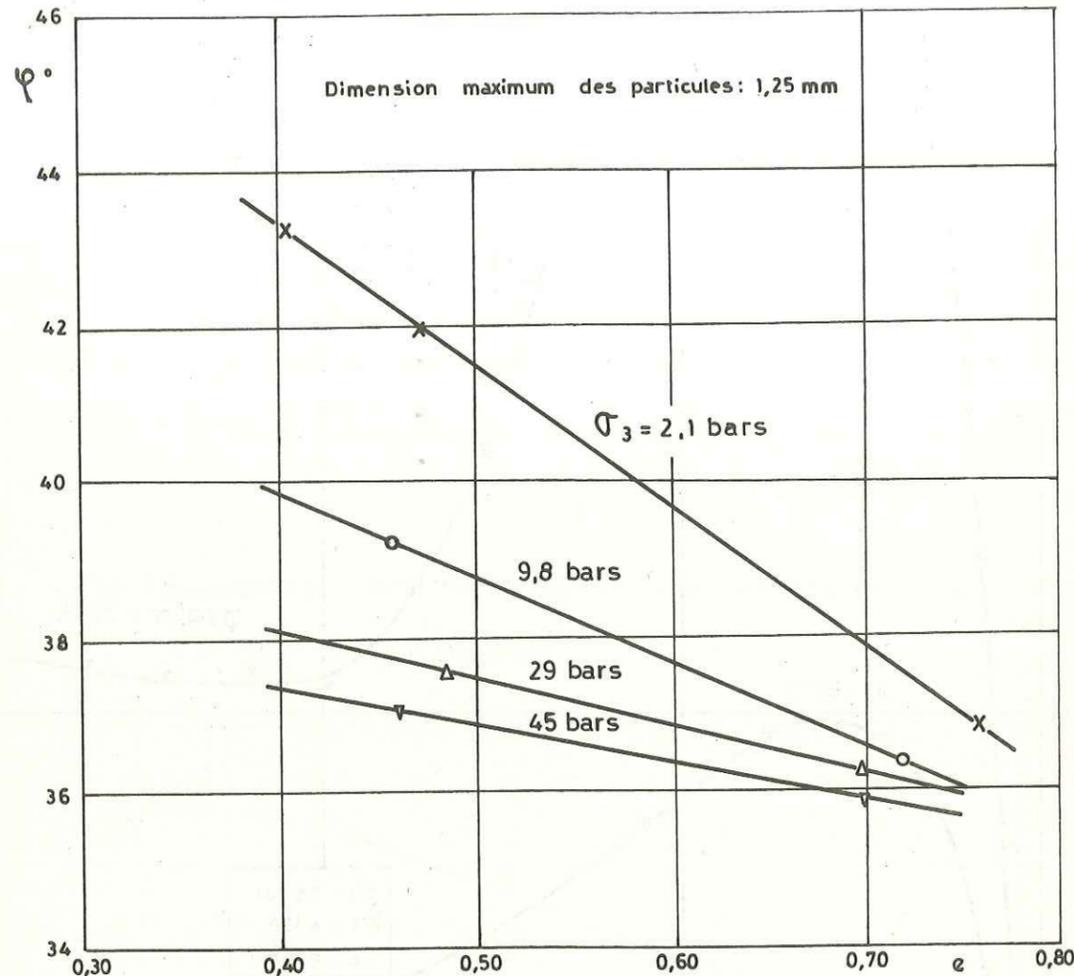


Fig. 28 - Courbes  $\varphi(e)$  pour sable de roche de "Venats" tirées du livre de Becker, Seed et Chan référence.

dessus de celle correspondant à 0,6-0,7 mm.

L'influence de la dimension des particules sur l'angle de talus naturel mériterait d'être l'objet d'expériences plus complètes.

### 3 - Essais triaxiaux

#### a) Courbes de déformations

Les déformations n'ont jamais été poussées à plus de 18 % car l'incertitude sur la section de l'échantillon devenait beaucoup trop importante. Nous n'avons donc rarement pu mettre en évidence l'apparition d'un palier. Nous avons malgré cela retrouvé la forme classique des courbes de déformation. En particulier on a pu noter l'augmentation de la fragilité du matériau avec la densité initiale (pic de résistance plus prononcé). De même les matériaux angulaires paraissent plus fragiles que les ronds. Nous avons représenté quelques courbes sur les figures 26 et 27.

#### b) Influence de la compacité

De très nombreux travaux ont été faits sur les variations de  $\varphi$  avec  $e$  (ou  $D_r$ ). Tous les résultats concordent sur le fait que  $\varphi$  est une fonction décroissante de l'indice des vides. Nous pouvons en particulier citer les travaux de :

BECKER, SEED et CHAN (1973) qui trouvent sur des sables que la décroissance de  $\varphi$  est plus forte aux faibles pressions latérales (les essais étaient faits entre 2 bars et 45 bars). La décroissance est alors en moyenne de 6 à 8° quand  $e$  passe de  $e_m$  à  $e_M$ . Voir en particulier la figure extraite de leurs travaux (Fig. 28).

E. de BEER (1965), après avoir rassemblé de nombreux résultats faits sur des sables, conclut que  $\varphi$  décroît en moyenne de 12 à 16° quand  $e$  passe de  $e_m$  à  $e_M$ .

De nombreuses hypothèses ont été faites sur la relation entre  $\varphi$  et  $e$  (ou  $D_r$ ) On peut citer entre autres :

la relation  $e \times \text{tg } \varphi = k$ , où  $k$  est une constante quand la densité varie. Cette relation a été vérifiée par de nombreux auteurs, sur des sables, avec une valeur de  $k$  comprise entre 0,4 et 0,6. Voir en particulier les résultats rapportés par A. PERROT (1968) et les courbes obtenues par AL-ISSA (1973).

La relation  $\text{tg } \varphi = \frac{a}{e - e_m}$  où  $a$  est une constante qui dépend du matériau.

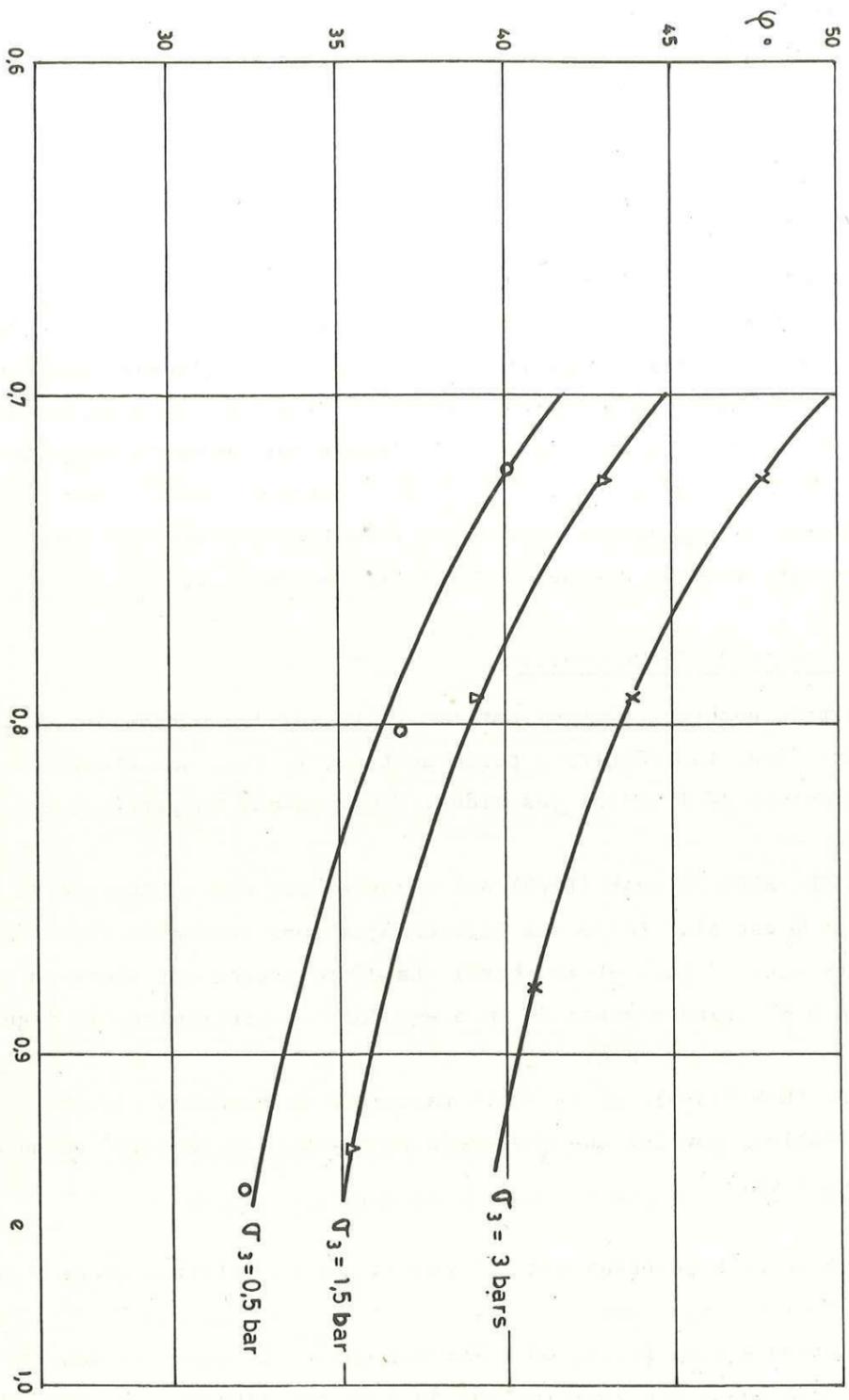


Fig. 29 - Influence de l'indice des vides initial sur l'angle de frottement interne pour les matériaux angulaires de dimension 0,5 - 1,0 mm

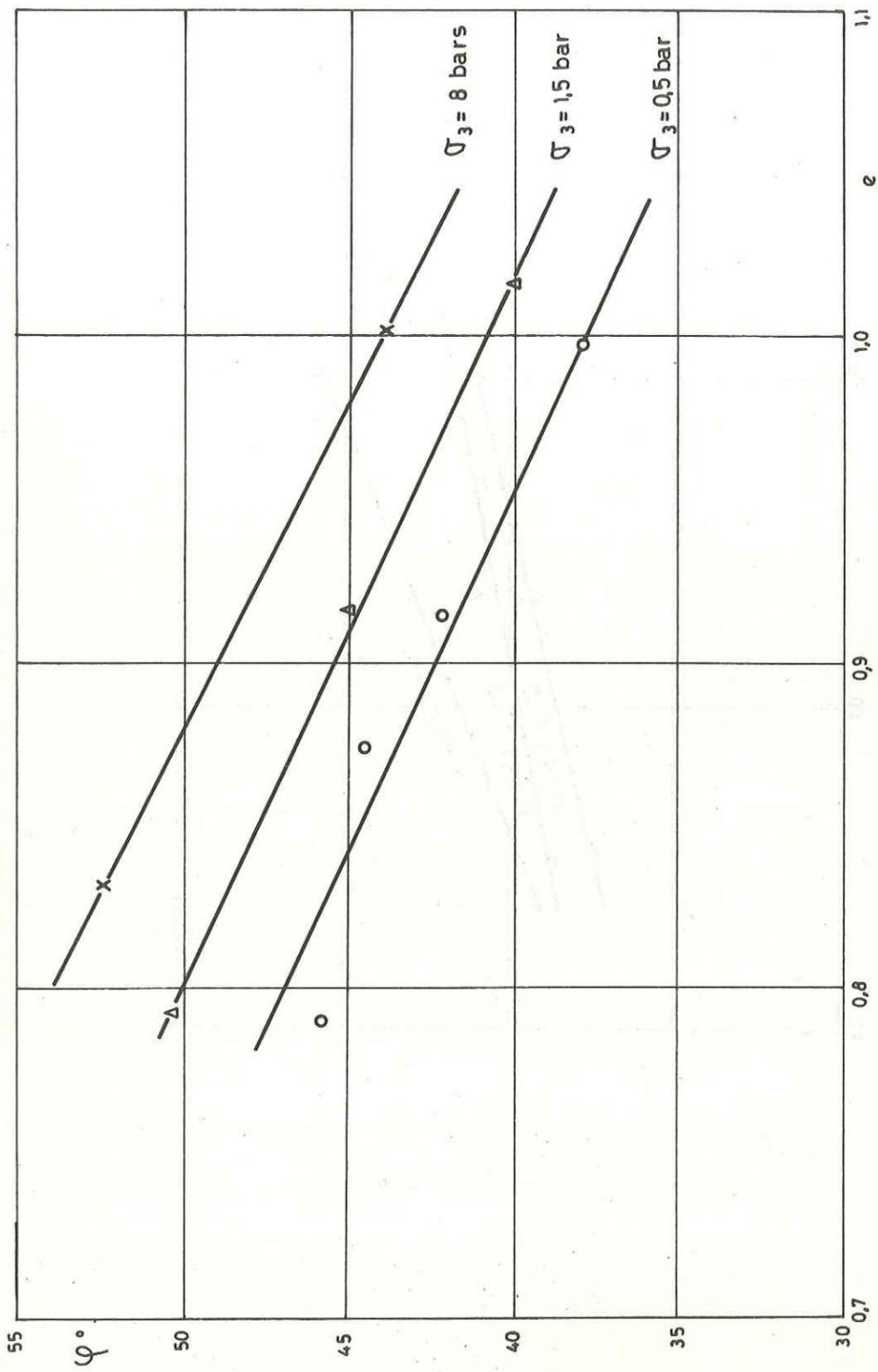


Fig. 30 - Influence de l'indice des vides initial sur l'angle de frottement interne pour matériaux angulaires de dimension 1,0 - 2,5 mm

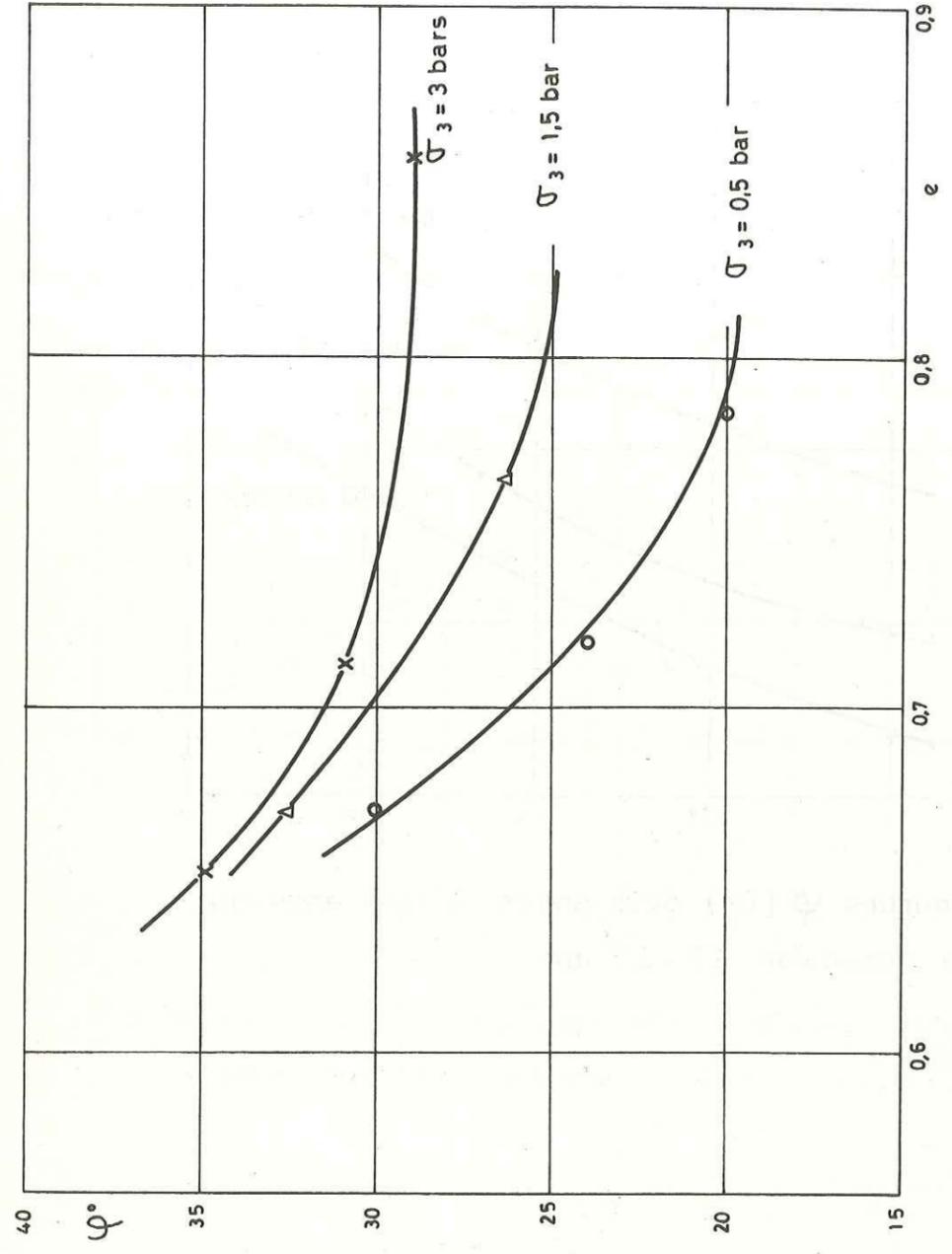


Fig. 32 - Courbes  $\varphi$  (e) pour matériaux à grains d'acier ronds de dimension 0,2 - 0,5 mm

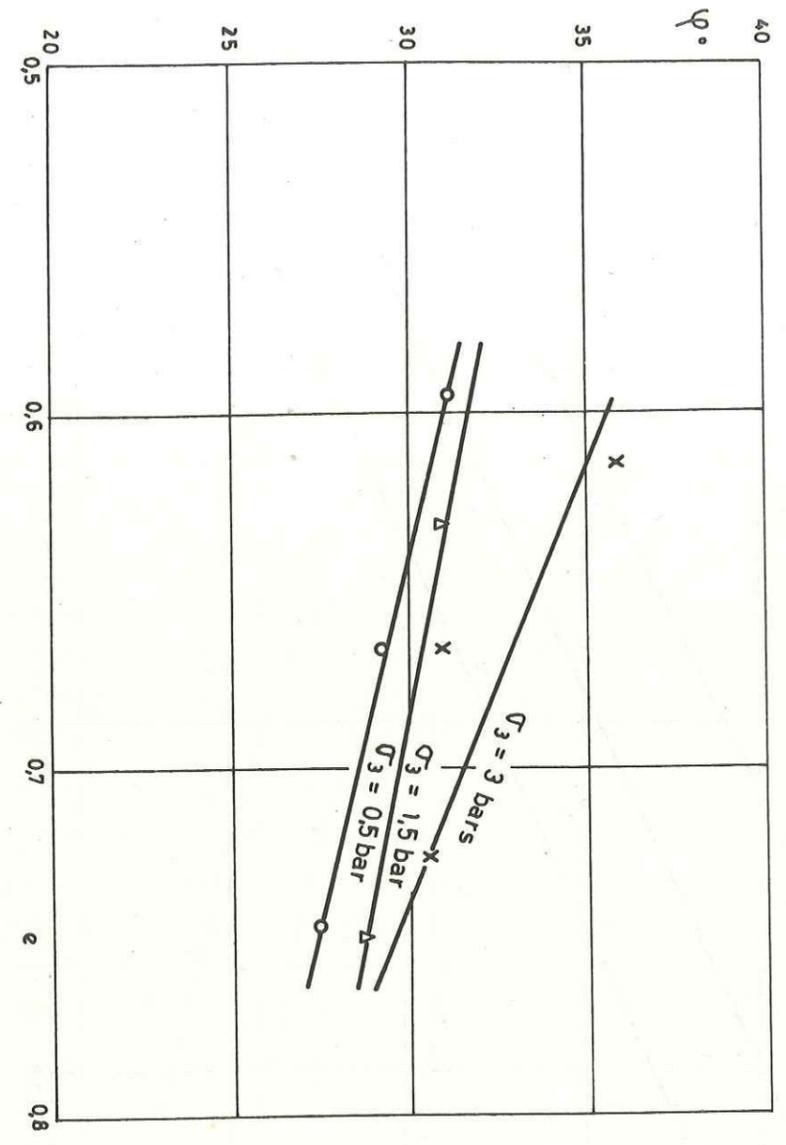


Fig. 31 - Courbes  $\varphi$  (e) pour matériaux à grains d'acier ronds de dimension 1,0 - 2,5 mm

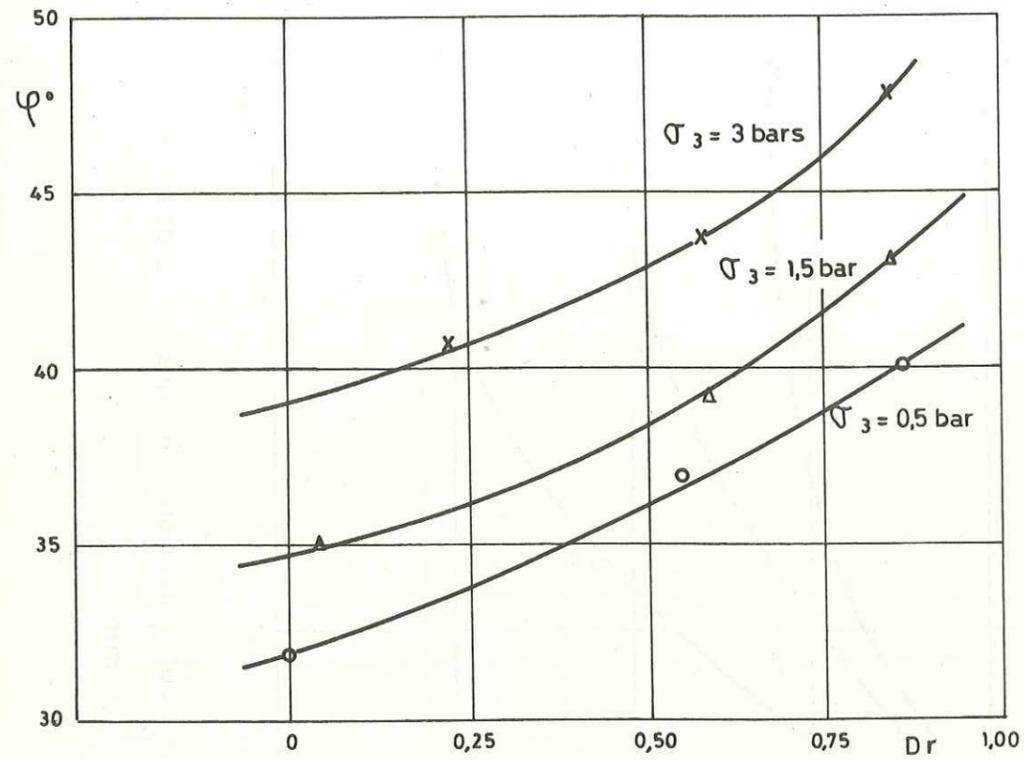


Fig. 33 - Courbes  $\varphi (Dr)$  pour grains d'acier anguleux de dimension 1,0 - 2,5 mm

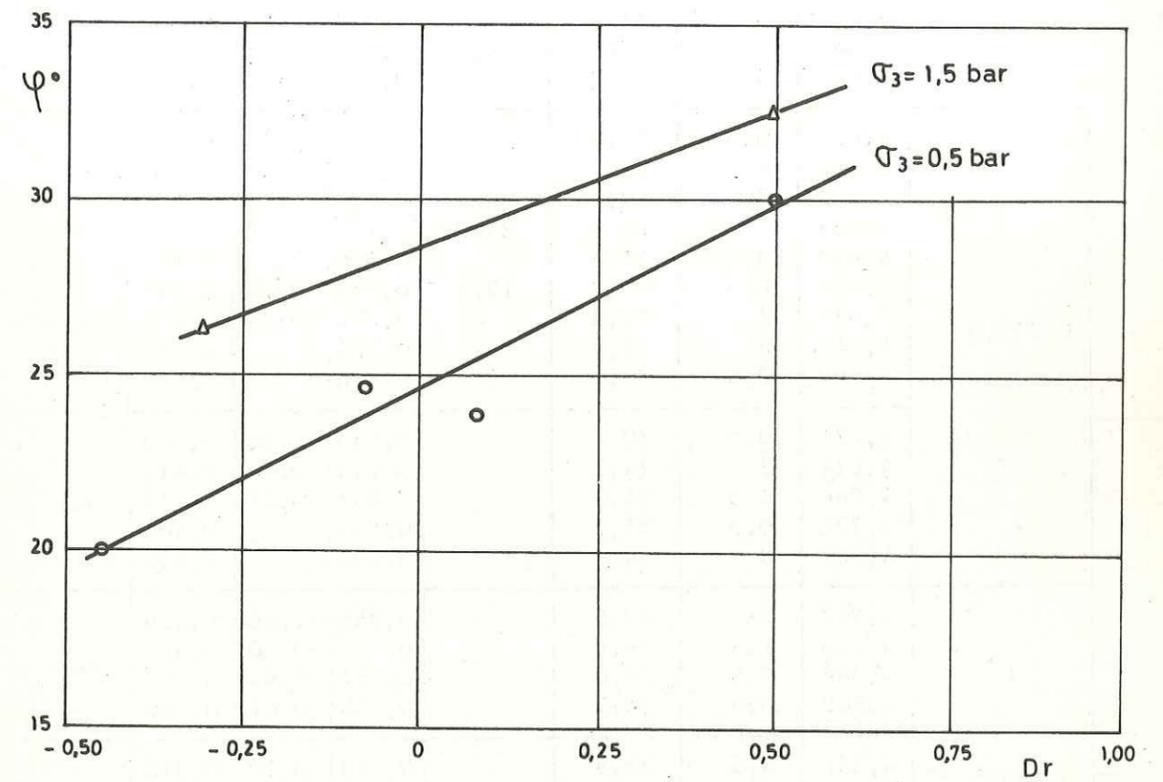


Fig. 34 - Courbes  $\varphi (Dr)$  pour grains d'acier ronds de dimension 0,2 - 0,5 mm

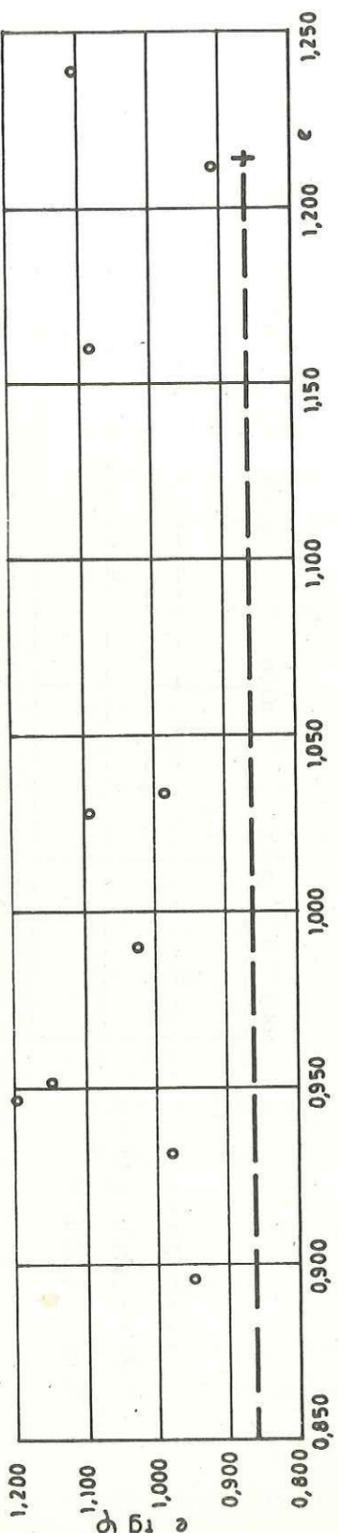
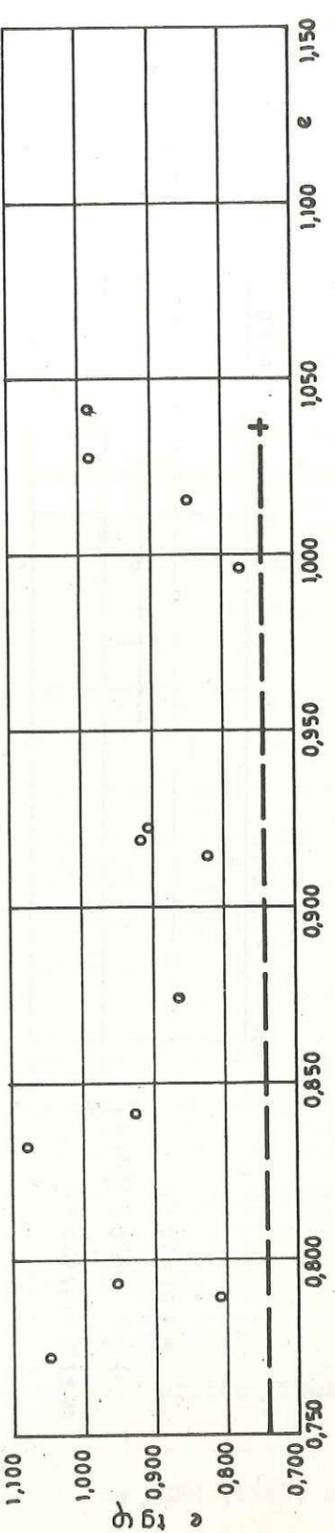
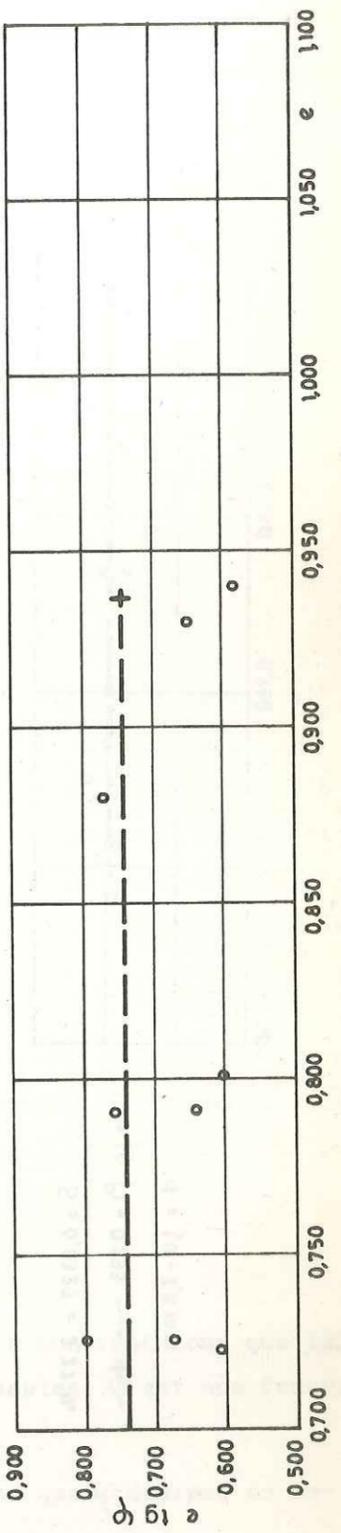
Tableau n°19-Résultat des essais effectués sur les grains acier ronds

Dimensions (mm)	$\gamma_d$	$\sigma_3$ (bars)	pic $\varphi$ (°)	palier $\varphi$ (°)	e	Dr	e.tg $\varphi$	Compacité
1,0-2,5	4,42	0,5	27,4		0,744	0,12	0,386	min
	4,41	1,5	28,6		0,748	0,08	0,409	
	4,47	3	30,5		0,725	0,28	0,427	
	4,39	4,5	27,1		0,756	0,02	0,387	
	4,627	0,5	29,1	25,4	0,666	0,77	0,371	moyenne
	4,627	3	30,9		0,666	0,77	0,399	
	4,726	0,5	26,4	28,6	0,631	1,06	0,313	max
	4,726	1,5	30,8		0,631	1,06	0,376	
	4,84	0,5	31,6	25,4	0,593	1,37	0,365	
	4,84	3,5	32,2	24,6	0,593	1,37	0,373	
	4,80	3	35,8		0,606			
0,5-1,0	4,635	0,5	25,6	25,0	0,687	0,17	0,329	min
	4,635	1,5	27,7		0,687	0,17	0,361	
	4,635	3	29,3		0,687	0,17	0,386	
	4,462	1,5	26,0		0,753	0,35	0,367	
	4,683	3	31,5	19,5	0,670		0,410	moyenne
	4,675	0,5	23,2		0,673	0,29	0,288	
	4,675	3	32,8		0,673	0,29	0,434	
	4,543	8	24,9		0,721		0,335	
	4,694	0,5	27,9		0,666		0,353	
	4,771	0,5	30		0,639	0,56	0,369	max
	4,824	3	34,1		0,612	0,80	0,414	
	4,846	1,5	34,0		0,631	0,77	0,419	
4,722	0,5	31,7		0,656		0,405		
4,787	8	34,4		0,634		0,434		
0,2-0,5	4,212	3	29,0		0,859	-1,06	0,476	min
	4,430	1,5	26,4		0,767	-0,30	0,381	
	4,388	0,5	20,0		0,784	-0,44	0,285	
	4,502	0,5	24,7		0,739	-0,07	0,340	
	4,557	0,5	23,9		0,718	0,10	0,318	moyenne
	4,575	3	29,5		0,711	0,15	0,402	
	4,691	0,5	30,0		0,669	0,50	0,386	max
	4,69	1,5	32,6		0,669	0,50	0,428	
	4,735	3	34,8		0,694	0,62	0,455	

Tableau n°20 - Résultat des essais effectués sur les grains acier triangulaires

Dimensions (mm)	$\gamma_d$	$\sigma_3$ (bars)	pic $\varphi$ (°)	palier $\varphi$ (°)	e	Dr	e.tg $\varphi$	Compacité	
1,0-2,5	4,059	0,5	31,9		0,940	-0,01	0,585	min	
	4,082	1,5	35,1		0,928	0,04	0,652		
	4,187	3	40,7		0,550	0,23	0,767		
	4,370	0,5	36,9		0,801	0,54	0,601	moyenne	
	4,395	1,5	39,0		0,791	0,58	0,641		
	4,395	3,0	43,6		0,791	0,58	0,753		
	4,567	0,5	40,0		0,723	0,85	0,607	max	
	4,560	1,5	43,0		0,726	0,84	0,677		
	4,559	3	47,4		0,726	0,84	0,798		
	0,5-1,0	3,950	0,5	37,9		0,997	0,13	0,776	min
		3,913	1,5	40,0		1,016	0,07	0,852	
		3,847	3	43,4		1,05	-0,04	0,993	
3,891		8	43,8		1,028		0,986		
4,208		0,5	44,6		0,875	0,54	0,863	moyenne	
4,111		1,5	45,1		0,919	0,40	0,922		
4,283		3	47,9		0,842	0,65	0,932		
4,104		3	44,7		0,923	0,38	0,913		
4,121		0,5	42,1		0,915	0,41	0,827		
4,409		0,5	45,8	40,5	0,790	0,83	0,812	max	
4,398		1,5	50,3	38,7	0,794	0,82	0,956		
4,450		3	53,6	39,6+1	0,773	0,89	1,048		
4,305	8	52,4		0,833		1,081			
0,1-0,5	3,608	0,5	36,2		1,122	0,36	0,910	min	
	3,694	1,5	43,4	36,9	1,160	0,21	1,086		
	3,567	3	41,8	35,9	1,239	-0,10	1,104		
	4,012	0,5	46,1		0,990	0,87	1,026	moyenne	
	3,936	3	46,7	36,5	1,028	0,72	1,091		
	3,925	1,5	44,2	38,7	1,034	0,70	0,985		
	4,131	0,5	47,4	35,3	0,932	1,10	0,982	max	
	4,090	1,5	51,2	40,9	0,952	1,02	1,151		
	4,100	3	52,6	40,3	0,947	1,04	1,199		
	4,210	0,5	46,9	39 +1	0,896	1,24	0,951		

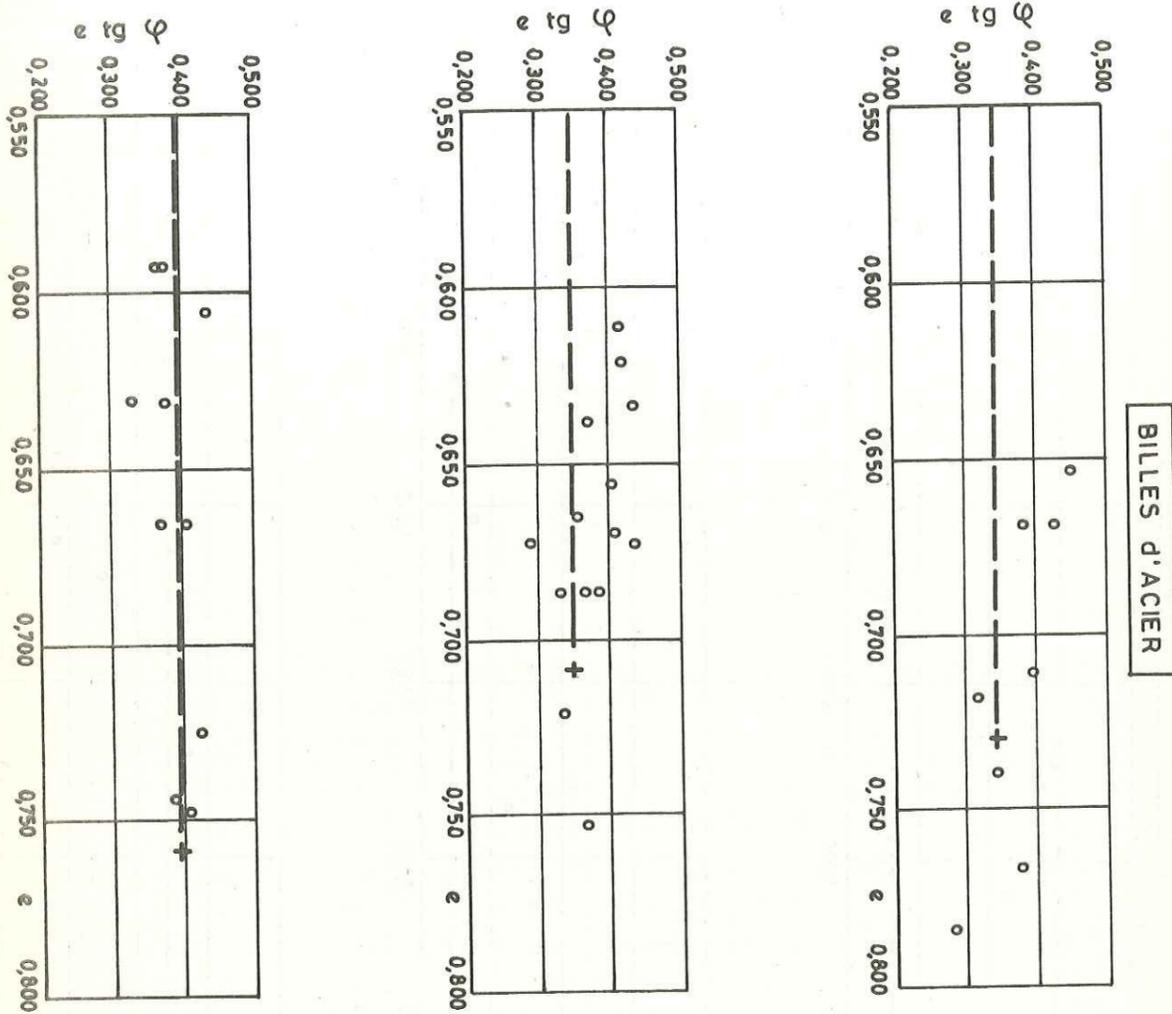
Fig. 35 - Relation entre  $(\sigma \text{ tg } \varphi)$  et  $\sigma$  pour grains d'acier anguleux



GRAINS D'ACIER ANGULEUX

Matières	Dimensions	Yf	Ymax	Δy	ef	emin	Δe	β°	ef.tg β	δ	δ en %
Grains d'acier ronds	1,0-2,5	4,385	4,706	0,321	0,758	0,638	0,158	27,4	0,393	0,0327	3,27
	0,5-1,0	4,575	4,999	0,364	0,709	0,583	0,126	26,1	0,347	0,0526	5,26
	0,2-0,5	4,527	4,869	0,342	0,729	0,608	0,121	25,3	0,345	0,0735	7,35
Grains d'acier anguleux	1,0-2,5	4,063	4,671	0,608	0,937	0,685	0,252	38,5	0,745	0,1015	10,15
	0,5-1,0	3,874	4,538	0,664	1,036	0,739	0,297	35,6	0,742	0,1993	19,93
	0,1-0,5	3,606	4,084	0,478	1,213	0,954	0,259	35,5	0,866	0,2025	20,25
Sable de Sommaz	1,0-2,0	1,430	1,612	0,182	0,878	0,666	0,212	37,3	0,669	0,0353	3,35
	0,5-1,0	1,399	1,586	0,187	0,921	0,694	0,227	36,1	0,672	0,0325	3,25
	0,2-0,5	1,326	1,559	0,233	1,030	0,730	0,300	35,6	0,734	0,0336	3,36

Tableau n° 21 - Variation de la densité et de l'indice des vides en fonction du compactage par vibration et mesures des valeurs β et ef.tg β et δ écarts-types.



$S = 0,07351 = 7,35 \%$   
 $e \text{ tg } \beta = 0,345 \rightarrow +$   
 $D = 0,2 - 0,5 \text{ mm}$

$S = 0,05259 = 5,26 \%$   
 $e \text{ tg } \beta = 0,347 \rightarrow +$   
 $D = 0,5 - 1,0 \text{ mm}$

$S = 0,0327 = 3,27 \%$   
 $e \text{ tg } \beta = 0,393 \rightarrow +$   
 $D = 1,0 - 2,5 \text{ mm}$

Fig. 36 - Relation entre  $(e \text{ tg } \varphi)$  et  $e$  pour billes d'acier

Cette relation a été étudiée par DUTERTRE et WINTERKOM et est basée sur une analogie avec les propriétés visqueuses des liquides.

Résultats d'essais

Nous avons tracé les courbes  $\varphi(e)$  et  $\varphi(Dr)$  pour une dimension donnée et à  $\sigma_3$  constant (Fig. 29 à 34). Les densités relatives ont été calculées en prenant  $Dr = \frac{eM - e}{eM - em}$ . Les échantillons triaxiaux ont quelquefois des densités qui sortent du domaine  $(em, eM)$ . Ceci explique que l'on ait des  $Dr$  non compris entre 0 et 1.

Les résultats des essais sur les grains d'acier sont présentés dans les tableaux n° 19, 20, 21.

Nous retrouvons sur notre matériau le résultat classique des sables, c'est-à-dire la décroissance de  $\varphi$  quand l'indice des vides croît (et donc que  $\gamma_d$  décroît). Cette décroissance semble plus nette pour les angulaires.

Ainsi quand  $Dr$  passe de 0 à 1

- des matériaux ronds décroît en moyenne de  $6^\circ$ ,
- des matériaux angulaires décroît en moyenne de  $10^\circ$ .

Sur les Fig. 35, 36 nous avons reporté le produit  $e.tg \varphi = f(e)$  pour savoir si la relation  $e.tg \varphi = k$  est valable pour les grains d'acier. On remarque d'une part que  $k$  est fonction croissante de  $\sigma_3$  et d'autre part que la dispersion est plus grande pour les grains angulaires que pour les grains arrondis. Dans le cas des éléments angulaires de dimensions moyennes 0,2 et 0,7 mm, cette dispersion est telle qu'il est difficile de confirmer que la relation  $e.tg \varphi = k$  est valable.

On peut noter toutefois que les matériaux angulaires ont un produit  $(e \times tg \varphi)$  très supérieur à celui des matériaux ronds (en moyenne 0,85 au lieu de 0,4). Parmi les angulaires eux-mêmes, les matériaux les plus petits (qui sont plus anguleux) ont un produit  $(e \times tg \varphi)$  plus grand.

c) Influence de la pression latérale  $\sigma_3$

Les nombreux résultats trouvés dans la bibliographie montrent tous que la courbe intrinsèque n'est pas une droite. Pour les sables,  $\varphi$  est une fonction décroissante de  $\sigma_3$ .

Les résultats publiés par E. de BEER (1965) montrent que  $\varphi$  diminue en mo-

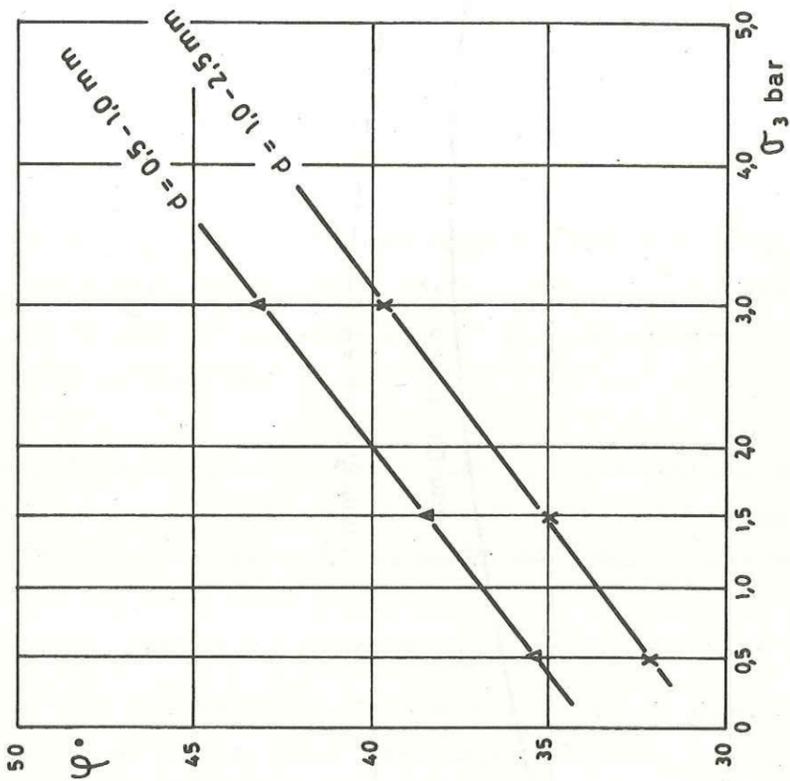


Fig. 38 - Courbes  $\varphi$  ( $\sigma_3$ ) pour grains d'acier anguleux  
Les échantillons sont placés à  $Dr = 0$

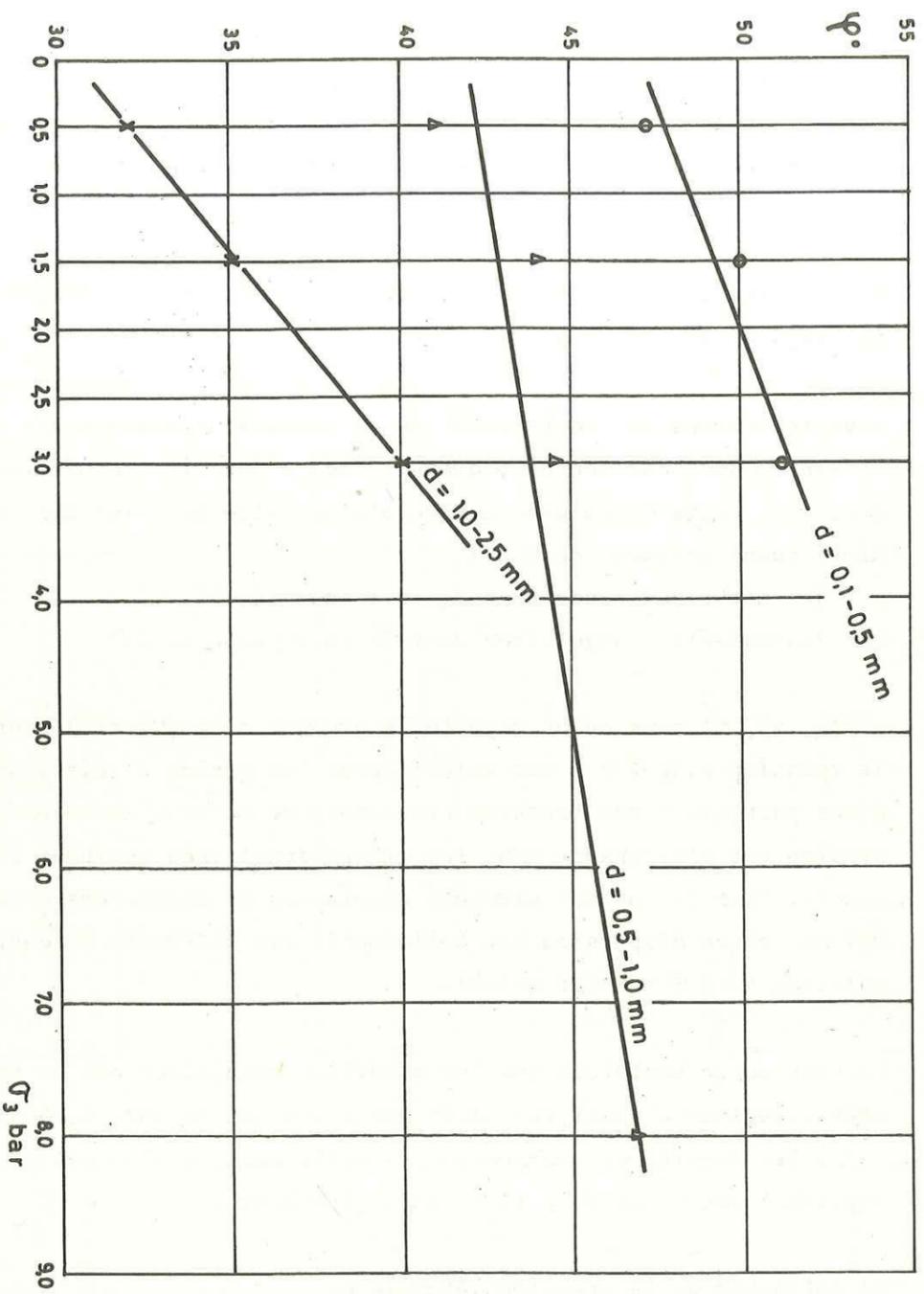
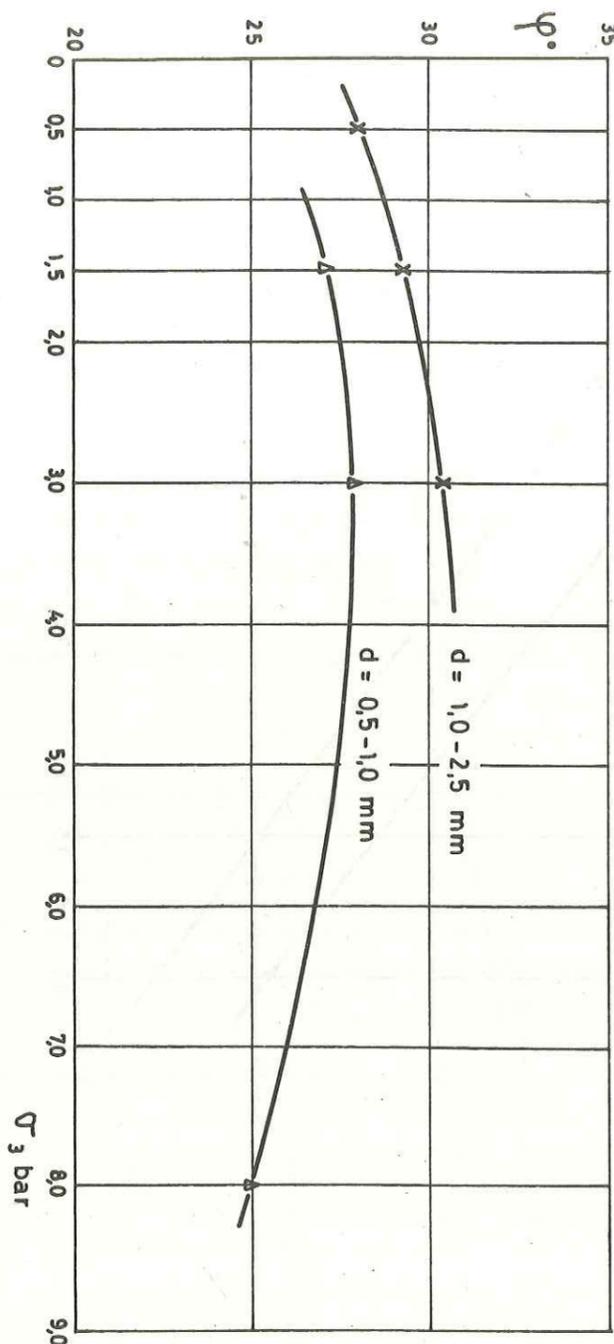


Fig. 37 - Influence de  $\sigma_3$  sur  $\varphi$  pour des échantillons à grains d'acier anguleux  
de différentes dimensions. Tous les  $\varphi$  sont pris à  $e = 0,940$

Fig. 39 - Courbes  $\varphi(\sigma_3)$  pour grains d'acier ronds. Les échantillons sont placés à  $e = 0,720$



yenne de 2 à 4° quand  $\sigma_3$  passe de 0,2 à 1 bar, et de 2 à 5° quand  $\sigma_3$  passe de 1 à 10 bars. L'action de  $\sigma_3$  est donc plus forte aux basses pressions.

BECKER, SEED et CHAN (1973) trouvent que la décroissance de  $\varphi$  est surtout importante pour les faibles pressions. De plus  $\varphi$  tend vers une limite lorsque  $\sigma_3$  dépasse 10 bars. Cette décroissance de  $\varphi$  est expliquée par une augmentation de la rupture des particules.

#### Résultats des essais sur les grains d'acier

Nous avons tracé les courbes  $\varphi(\sigma_3)$  à un même  $e$  ou un même  $D_r$  (Fig. 37 à 39) Nous avons pour cela utilisé les courbes  $\varphi(e)$  et  $\varphi(D_r)$  à  $\sigma_3$  constant. Quelques essais supplémentaires à 8 bars ont été faits pour confirmer l'allure des courbes obtenues.

Le résultat est totalement contradictoire avec celui des sables.  $\varphi$  est trouvé être une fonction croissante de  $\sigma_3$ . Cette augmentation peut atteindre 8° quand  $\sigma_3$  passe de 0,5 à 3 bars.  $\varphi$  augmente encore, mais moins vite quand on passe à 8 bars.

Ce phénomène provient probablement de l'absence de ruptures de particules avec nos matériaux à grains d'acier. L'élévation de  $\varphi$  peut alors s'expliquer par un meilleur enchevêtrement des particules quand  $\sigma_3$  augmente.

#### d) Influence de la dimension des particules

Nous abordons là probablement le point le plus controversé. Les résultats sont souvent très divergents ; ainsi :

. KOLBUSZEROSKI et FREDERICK ont fait des essais sur des sables à la boîte de cisaillement. Ils séparent  $\varphi$  en 2 composantes

$$\varphi = \varphi_f + \varphi_s$$

où  $\varphi_f$  est l'angle qui correspond au frottement des particules  
 $\varphi_s$  est l'angle qui correspond au travail de désenchevêtrement des grains.

Voir les textes de ROWE, NERVLAND et ALLETY pour le calcul de ces angles et la justification de la théorie.

Les deux auteurs trouvent alors :

- . que la composante de frottement  $\varphi_f$  est indépendante de la dimension,
- . que la composante de variation de volume  $\varphi_s$  augmente avec la dimension.

.../...

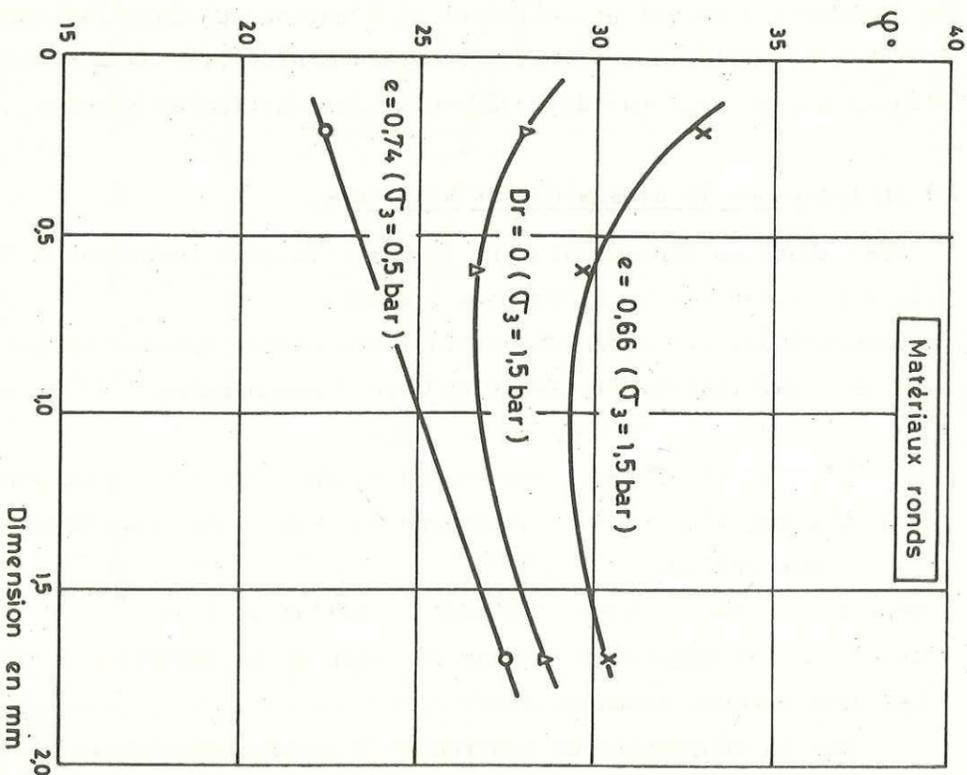
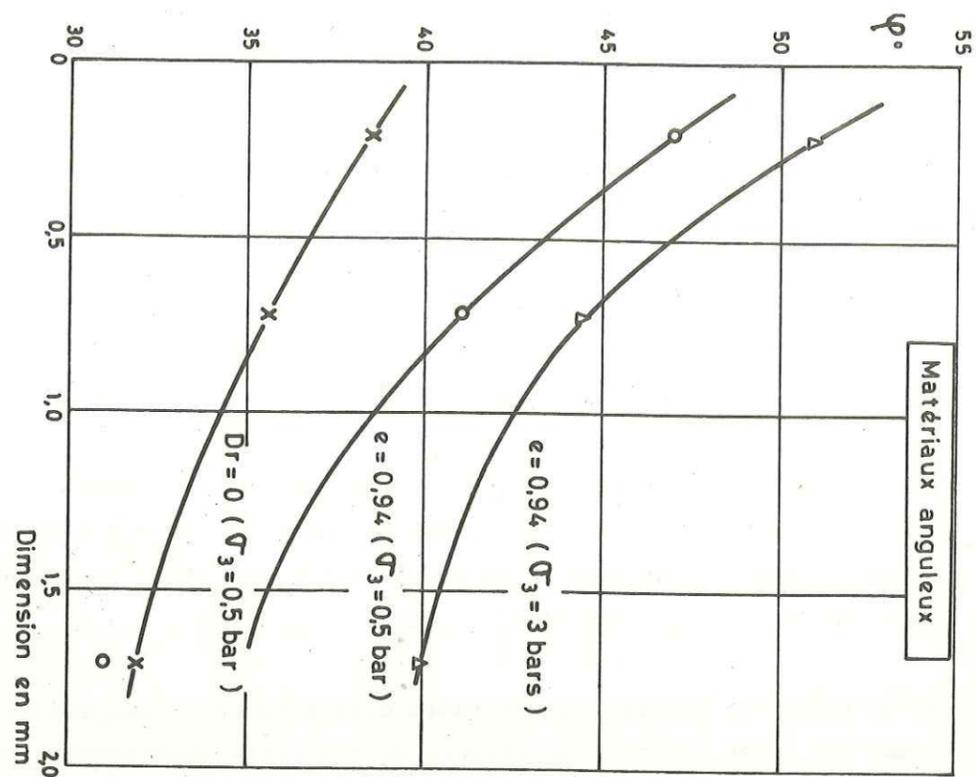


Fig. 40 - Influence de la dimension des particules

. KIRKPATRICK (1965) a fait des essais sur des sables et des billes de verre à granulométrie uniforme. En employant encore la décomposition en  $\phi_f$  et  $\phi_s$ , il trouve :

- que  $\phi_f$  est indépendant de la taille des particules,
- que  $\phi_s$  diminue quand la dimension des particules augmente.

. BECKER, SEED et CHAN (1973) ainsi que MARSAL, qui ont travaillé sur les mêmes matériaux, trouvent que  $\phi$  diminue quand la taille maximum des particules augmente. Cette variation est moins importante si on fixe  $D_r$  au lieu de fixer l'indice des vides.

Cette dimension de  $\phi$  serait liée à une plus forte tendance à la rupture des sols grossiers, les contraintes intergranulaires étant plus importantes.

. KOERNER (1970) a fait des essais triaxiaux sur de la poudre de quartz, avec des  $d_{10}$  variant de 0,001 mm à 2,6 mm. Il s'est assuré, par construction des cercles de MOHR, que les matériaux les plus fins ne présentaient pas de cohésion. Il sépare  $\phi$  en  $\phi_f$  et  $\phi_s$  et trouve que  $\phi_f$  décroît quand la taille augmente. Cette décroissance est très forte pour des  $d_{10}$  inférieurs à 0,6 mm (variation de  $\phi_f$  de 20° quand  $d_{10}$  passe de 0,001 à 0,5 mm). KOERNER soulève l'éventualité d'une variation de coefficient de frottement du matériau constitutif des grains sous l'effet des variations des contraintes intergranulaires quand la taille augmente.

Résultats des essais

La figure n° 40 présente les courbes donnant  $\phi$  en fonction de la dimension des particules à  $\sigma_3$  constant et à  $e$  ou  $D_r$  constant. Seules les courbes construites pour un même  $D_r$  sont bien représentatives car elles éliminent l'effet de la taille sur les indices des vides extrêmes. On remarque que :

- . la dimension a peu d'influence sur  $\phi$  pour les matériaux ronds (variations inférieures à 1°) ;
- . pour les angulaires,  $\phi$  diminue de 6° quand la dimension passe de 0,2 à 1,7 mm. Mais là encore il est difficile de conclure, étant donné que les matériaux les plus fins sont les plus angulaires.

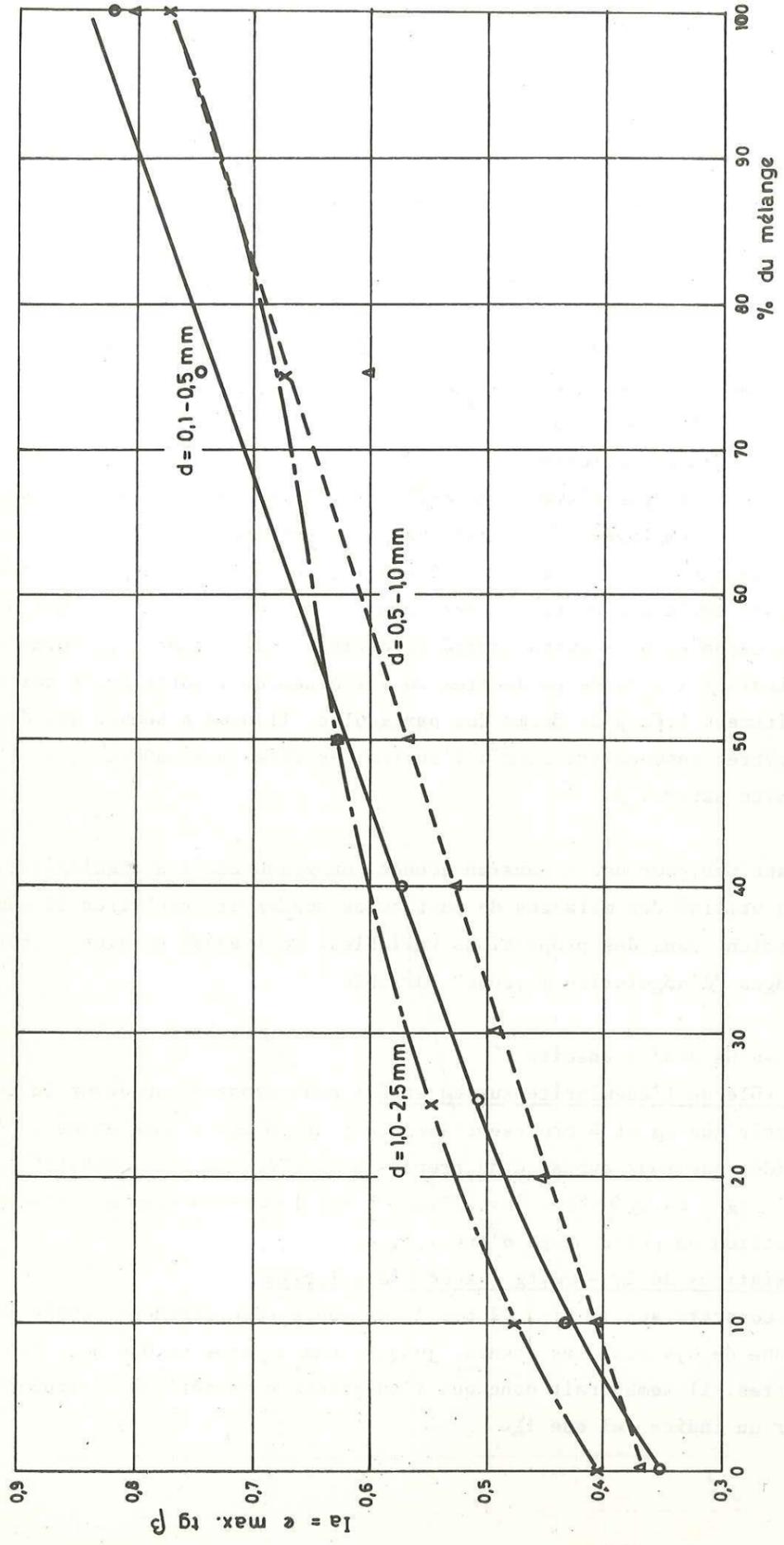


Fig. 42 - Variation de l'indice d'angularité Ia en fonction du pourcentage d'angularités dans un mélange

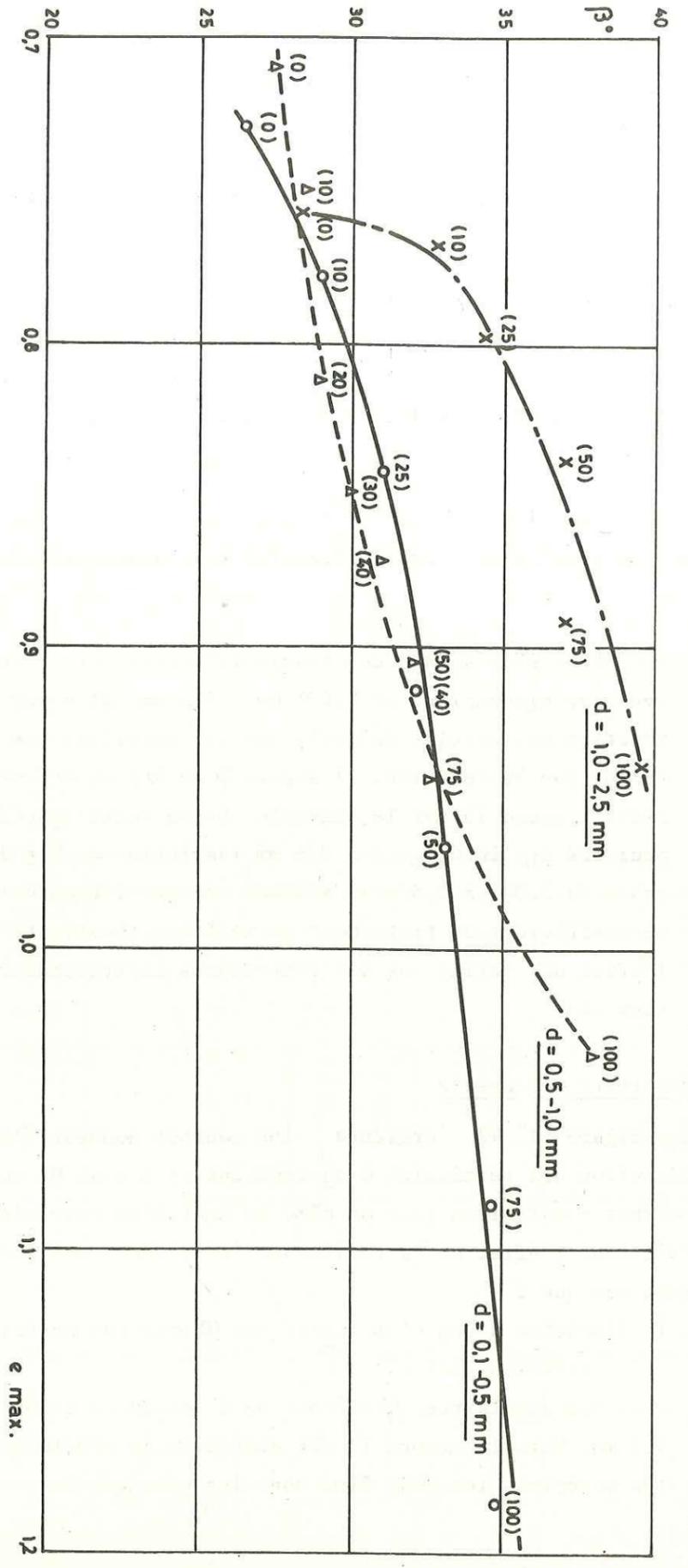


Fig. 41 - Variation de  $e$  max. et  $\beta$  en fonction du pourcentage d'angularités

Il semblerait donc que l'influence de la taille des particules sur  $\varphi$  soit surtout liée à l'augmentation du nombre des ruptures de particules avec les matériaux grossiers. Ceci expliquerait l'influence négligeable de la dimension sur nos billes rondes d'acier.

4 - Résultats relatifs au problème de la forme des particules

Tous les auteurs sont d'accord sur le fait que  $\varphi$  augmente quand :

- . la sphéricité des grains diminue,
- . leur angularité augmente,
- . leur rugosité augmente.

Mais ces trois paramètres sont difficiles à mesurer. De nombreuses méthodes ont été employées (voir par exemple l'article de WINTERKOM) ; mais elles sont toutes d'un emploi difficile et n'ont conduit pour l'instant à aucun résultat concluant. Aussi nous avons envisagé le problème d'une autre façon et nous avons essayé de définir indirectement la forme d'une particule à l'aide de paramètres du sol aisément mesurables et qui soient étroitement liés à la forme des particules. Il nous a semblé que deux paramètres convenaient bien : l'indice des vides maximum et  $e_M$  et l'angle de talus naturel  $\beta$ .

N'ayant pas, pour une dimension donnée, un grand choix d'angularités, nous avons utilisé des mélanges de particules rondes et angulaires de même dimension, dans des proportions variables. Nous avons pu ainsi créer des mélanges "d'angularité moyenne" variable.

Nous avons étudié ensuite :

- . le rôle de l'angularité sur  $e_M$  et  $\beta$  : nous avons vu au début de cette partie que  $e_M$  et  $\beta$  croissent avec le pourcentage d'angulaires . D'où l'idée que nous avons eu de prendre pour "indice d'angularité" le produit  $I_a = e_M \cdot \text{tg } \varphi$  (Voir aussi Fig. 41 sur les variations de  $e_M$  et  $\beta$  en fonction du pourcentage d'angularité).
- . Variations de  $I_a = e_M \cdot \text{tg } \varphi$  avec l'angularité

On constate sur la Fig. 42 que  $I_a$  augmente régulièrement depuis une moyenne de 0,4 pour les rondes, jusqu'à une moyenne de 0,8 pour les angulaires. Il semblerait donc que l'on puisse caractériser l'angularité par un indice tel que  $I_a$ .

.../...

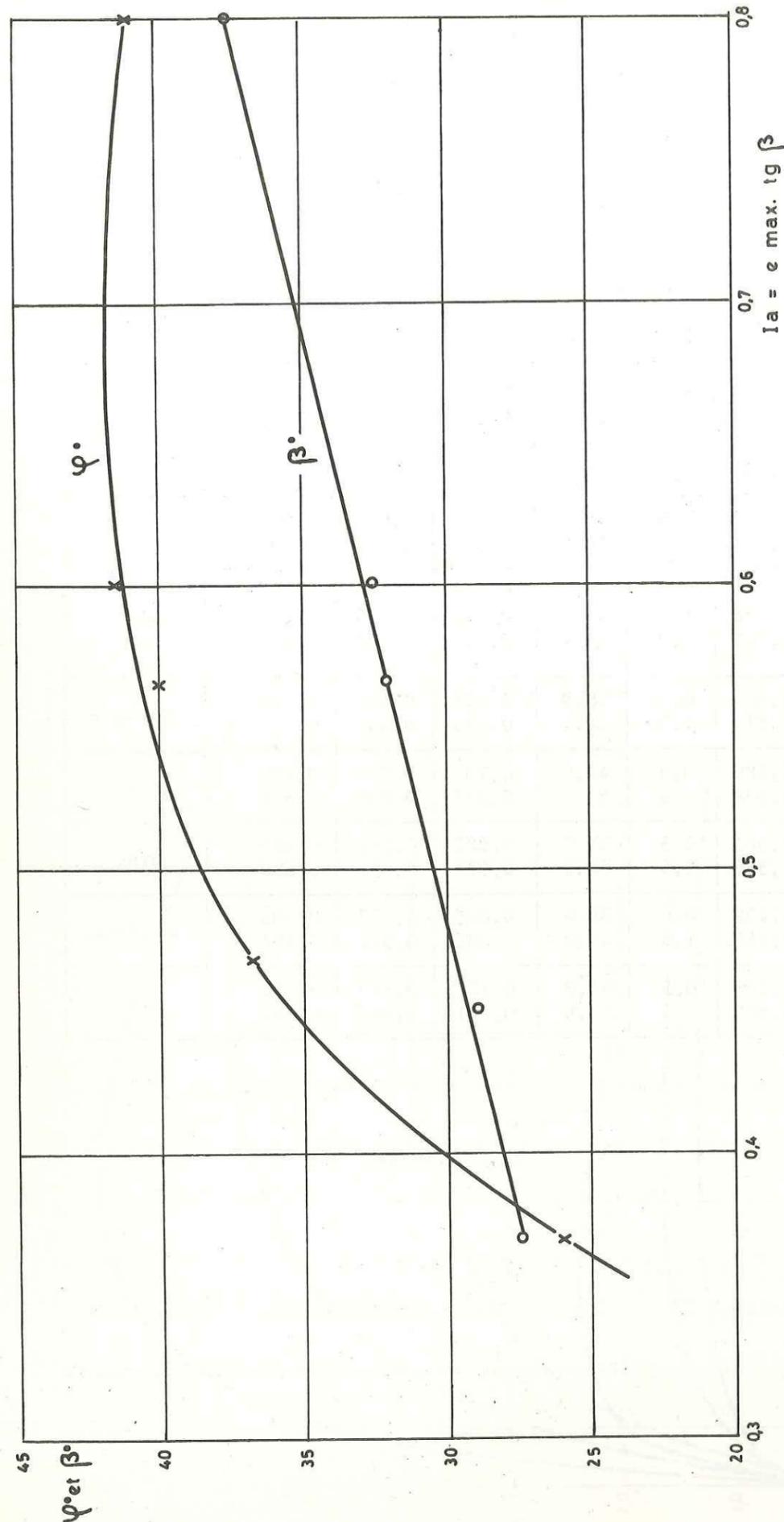


Fig. 43 - Relation entre  $\varphi$  et  $I_a$  lorsqu'on fait varier le pourcentage d'angulaires dans un mélange de ronds et d'angulaires de dimension 0,5-1,0 mm. (On a rapporté aussi l'angle de talus naturel  $\beta$ )

Tableau n°22 - Résultat des essais effectués sur les sables de Sonnaz

Dimensions (mm)	$\gamma_d$	$\sigma_3$ (bars)	pic $\varphi^\circ$	e	Dr	e.tg $\varphi$	Compacité
1,0-2,0	1,457	0,5	37,0	0,843	0,165	0,635	min
	1,454	1,5	35,3	0,847	0,146	0,600	
	1,505	0,5	41,1	0,784	0,443	0,684	moyenne
	1,547	1,5	41,3	0,736	0,670	0,647	
	1,606	0,5	45,4	0,672	0,972	0,681	max
	1,607	1,5	44,9	0,671	0,976	0,669	
0,5-1,0	1,421	0,5	38,5	0,891	0,132	0,714	min
	1,438	1,5	35,9	0,869	0,229	0,629	
	1,425	3,0	35,4	0,886	0,154	0,630	
	1,470	0,5	38,9	0,828	0,410	0,668	moyenne
	1,514	1,5	39,4	0,775	0,643	0,637	
	1,580	0,5	44,9	0,701	0,969	0,699	max
1,579	1,5	43,4	0,702	0,965	0,664		
0,2-0,5	1,361	0,5	34,8	0,982	0,160	0,683	min
	1,368	1,5	34,2	0,971	0,197	0,660	
	1,429	0,5	38,4	0,887	0,477	0,703	moyenne
	1,445	1,5	40,0	0,886	0,547	0,727	
	1,518	0,5	44,8	0,777	0,843	0,772	max
	1,549	1,5	43,4	0,741	0,963	0,701	

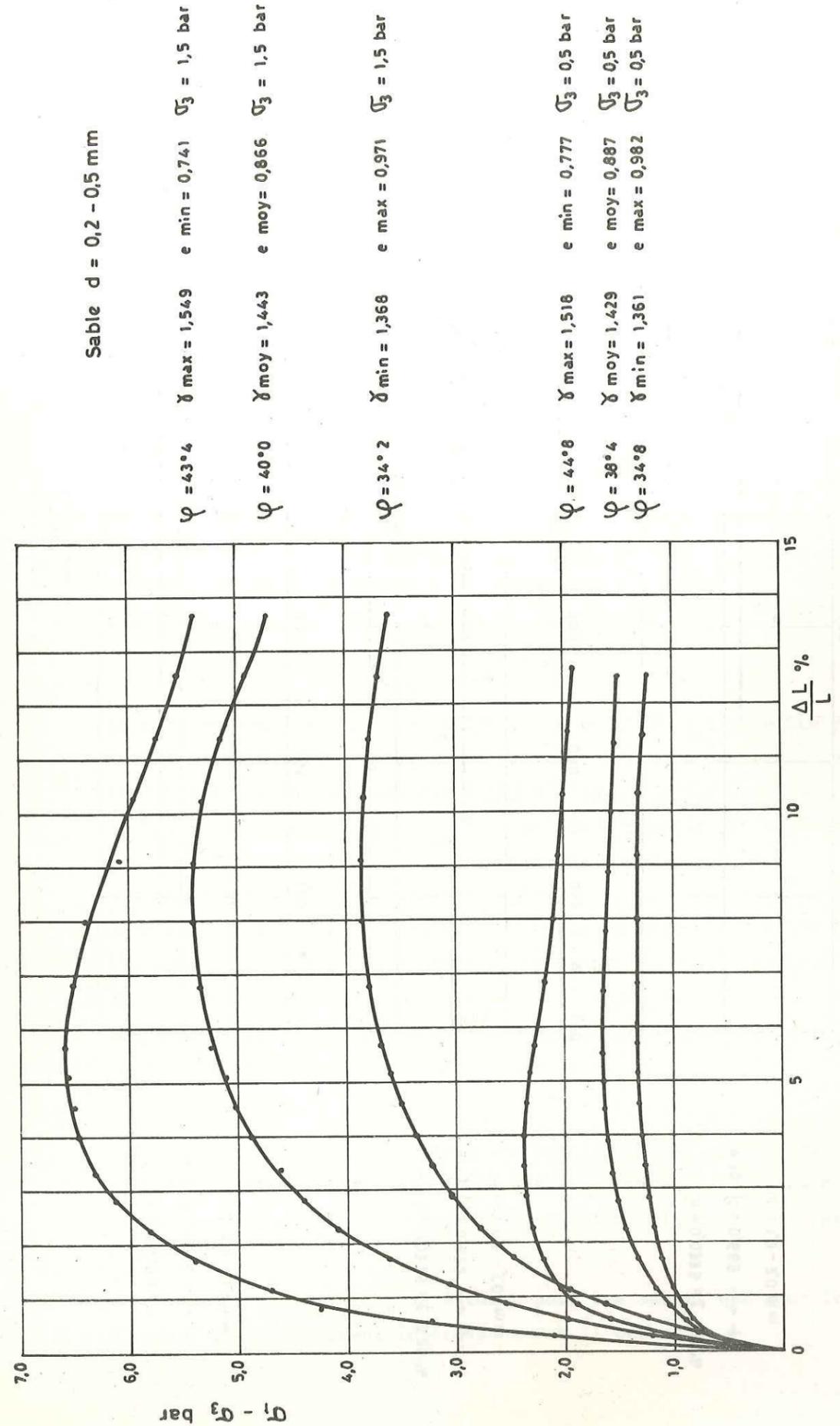
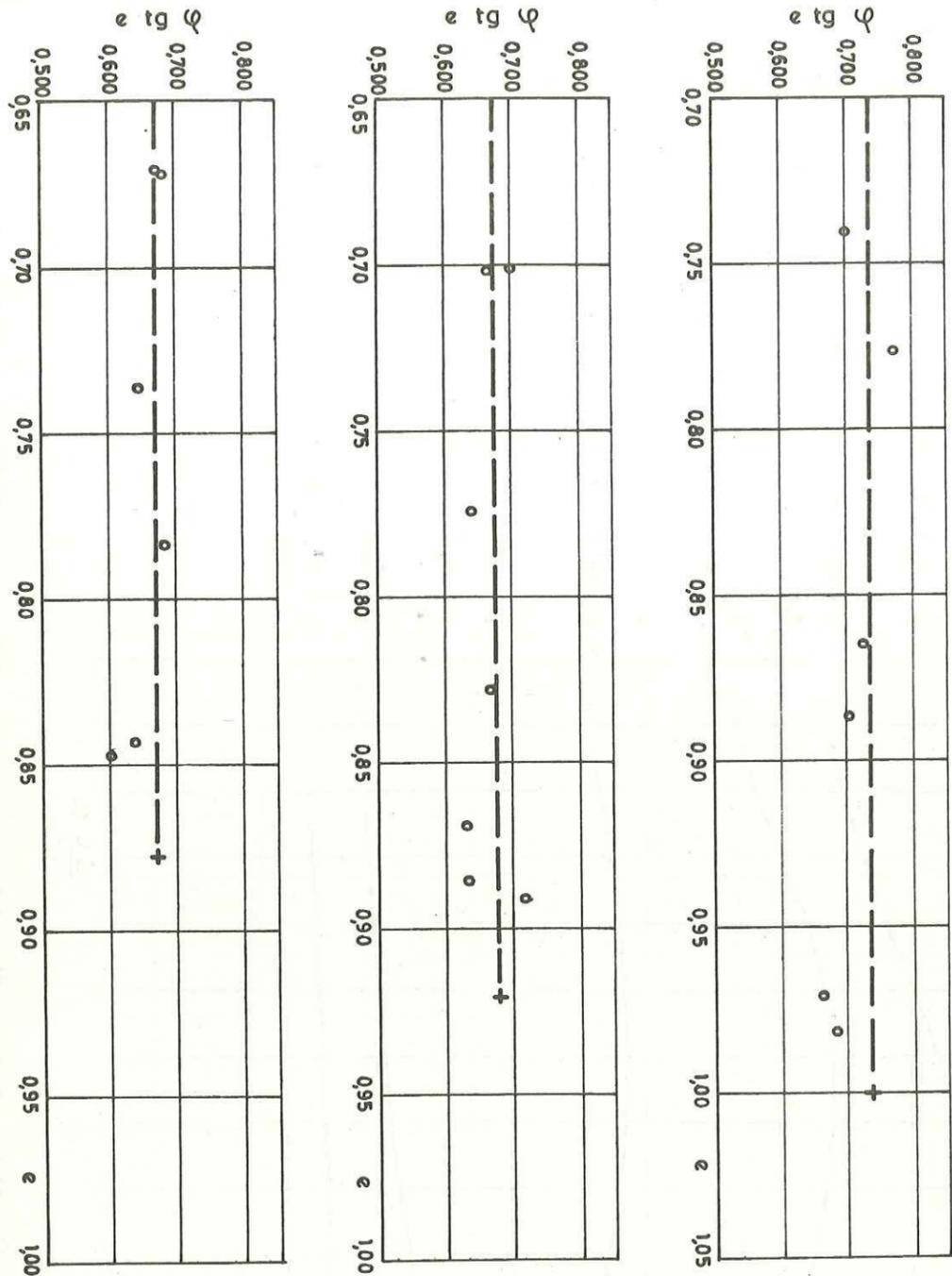


Fig. 44 - Courbes effort déformation sur le sable pour différentes densités

Fig.45-Relation entre (e tg φ) et e pour sable



$S = 0,0335 = \pm 3,35\%$   
 $e \text{ tg } \beta = 0,569 \rightarrow +$   
 $d = 1,0 - 2,0 \text{ mm}$

$S = 0,0325 = \pm 3,25\%$   
 $e \text{ tg } \beta = 0,672 \rightarrow +$   
 $d = 0,5 - 1,0 \text{ mm}$

$S = 0,0336 = \pm 3,36\%$   
 $e \text{ tg } \beta = 0,734 \rightarrow +$   
 $d = 0,2 - 0,5 \text{ mm}$

On peut tout de même faire deux remarques :

- nous avons parlé d'angularité, mais il aurait mieux valu parler de forme car il nous est impossible ici de dissocier les trois facteurs sphéricité, angularité et rugosité ;
- il faudrait s'assurer que l'"angularité" que nous avons caractérisée ici par  $I_a$  est celle qui intervient dans la détermination de  $\varphi$ . Pour cela nous avons étudié le lien entre  $\varphi$  et  $I_a$ .

Relation entre  $\varphi$  et  $I_a$

Nous avons fait des essais triaxiaux sur trois mélanges de rondes et d'angulaires de dimension moyenne (0,6-0,7 mm), dans des proportions différentes. Nous avons déterminé  $e_M$ ,  $\beta$  et  $\varphi$  pour chacun.  $\varphi$  a été obtenu par la moyenne de deux essais à  $\sigma_3 = 0,5 \text{ bar}$  et  $\sigma_3 = 1,5 \text{ bar}$ , à la densité minimale  $\gamma_m$ . C'est donc un  $\varphi$  pour  $D_r = 0$ . On peut voir sur la figure 43 les points expérimentaux dans le plan  $\varphi - I_a$ . Ces points et ceux obtenus pour les rondes et les angulaires s'ordonnent sur une courbe donnant  $\varphi$  comme une fonction croissante de  $I_a$ . Il semble donc que  $I_a$  puisse être considéré comme un bon indice d'angularité.

5 - Résultats des essais sur des sables

Afin de pouvoir tester la validité de la relation  $e \cdot \text{tg } \varphi = Cte$  pour les matériaux granulaires naturels, nous avons également effectué une série d'essais sur le sable. Les résultats des essais effectués sur les sables sont représentés par le tableau 22. On a représenté les courbes contraintes-déformation à l'appareil triaxial sur la Fig. 44

La mesure de  $I_a$  a été effectuée d'une manière analogue à celle des grains d'acier, c'est-à-dire le produit  $e_M \cdot \text{tg } \beta$ . Les courbes  $e \cdot \text{tg } \varphi = f(e)$  correspondantes montrent une dispersion moindre dans les valeurs  $e \cdot \text{tg } \varphi$  que pour les grains d'acier, Fig.35-36. D'autre part, pour les sables testés on peut vérifier la validité de l'expression

$$e \cdot \text{tg } \varphi = e_M \cdot \text{tg } \beta = I_a \quad (1)$$

Les courbes  $e \cdot \text{tg } \varphi$  sont représentées sur la Fig. 45 et les écarts-types sont donnés dans le tableau 21. A titre de comparaison, dans ce même tableau, on a représenté les écarts-types sur  $e \cdot \text{tg } \varphi$  pour les grains d'acier.

Ce résultat, qui est le plus évident pour les sables que pour les grains d'acier, est extrêmement intéressant car il permet :

.../...

- pour un matériau de nature donnée, d'apprécier son angularité par un facteur  $I_a$  facile à mesurer,
- pour un matériau sans cohésion, d'estimer  $\text{tg } \varphi$  en fonction de l'indice des vides in situ, par application de

$$e \cdot \text{tg } \varphi = I_a = e_M \cdot \text{tg } \beta$$

où  $e_M$  est l'indice des vides maximum (matériau déversé) et  $\beta$  l'angle de talus naturel du matériau déversé, ces deux facteurs étant assez faciles à mesurer.

Cependant, pour généraliser les résultats obtenus et vérifier la validité de la formule ( 1 ) il faudra effectuer d'autres essais sur divers matériaux de granulométrie et angularité différentes.

Signalons d'autre part que la formule ( 1 ) n'est valable que pour les faibles contraintes latérales ( $\sigma_3 = 0,5$  à  $1,5$  bar). En effet, l'angle de frottement est fonction de la contrainte latérale. On peut expliquer l'influence de  $\sigma_3$  par la modification de la forme des grains par rupture des angles aigus des matériaux : les essais triaxiaux effectués sur des sables de  $0,5-1$  mm ont en effet montré que pour une contrainte latérale relativement faible (3 bars) on arrive à produire, par ces ruptures, jusqu'à 7 % de matériaux fins ( $< 0,5$  mm) qui n'existaient pas au début de l'essai.

Par conséquent, il faudra le cas échéant corriger la formule ( 1 ) pour déterminer  $\varphi$  en tenant compte des contraintes réelles au niveau de la surface de rupture supposée. Si on se place aux profondeurs présentant de l'intérêt pour la géologie de l'ingénieur (20-30 m maximum), on peut admettre que les contraintes  $\sigma_3$  in situ sont encore suffisamment faibles pour pouvoir appliquer la formule ( 1 ). Pour de fortes contraintes latérales, l'influence de  $\sigma_3$  devra être déterminée au moyen d'essais spéciaux que nous n'avons pas eu les moyens d'effectuer.

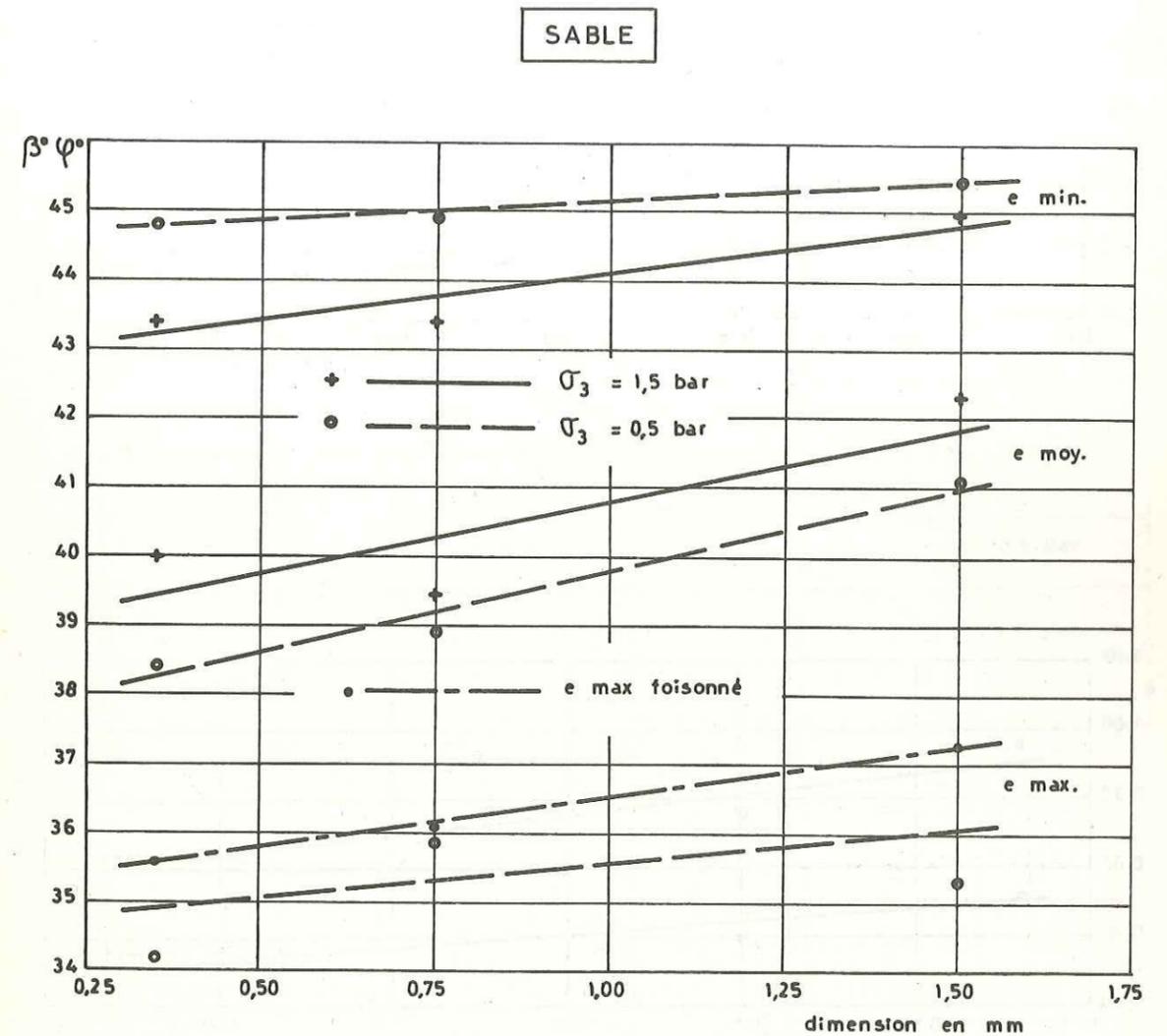


Fig.46 - Influence de la dimension des particules sur  $\varphi$  (triaxial) et  $\beta$

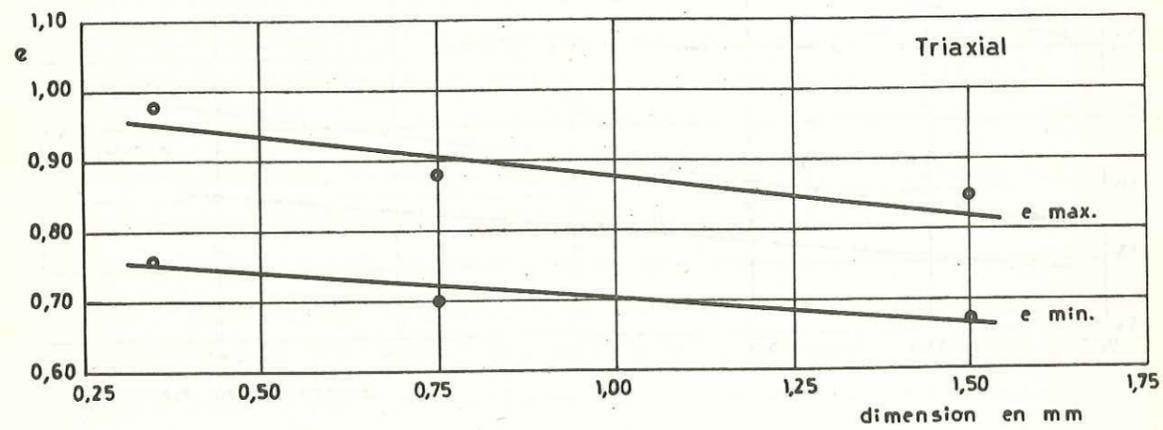
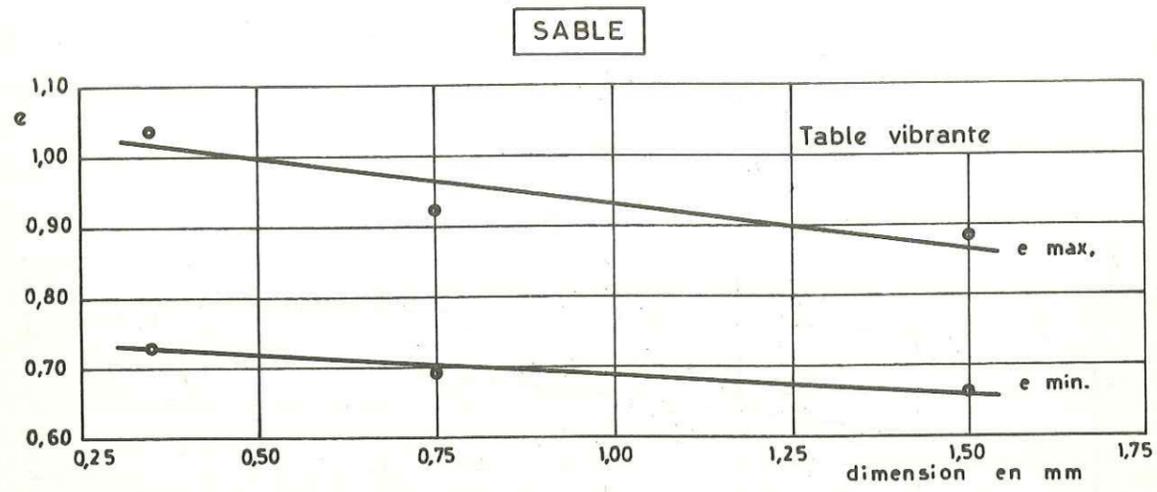


Fig.47- Variation de l'indice des vides en fonction de la dimension des particules

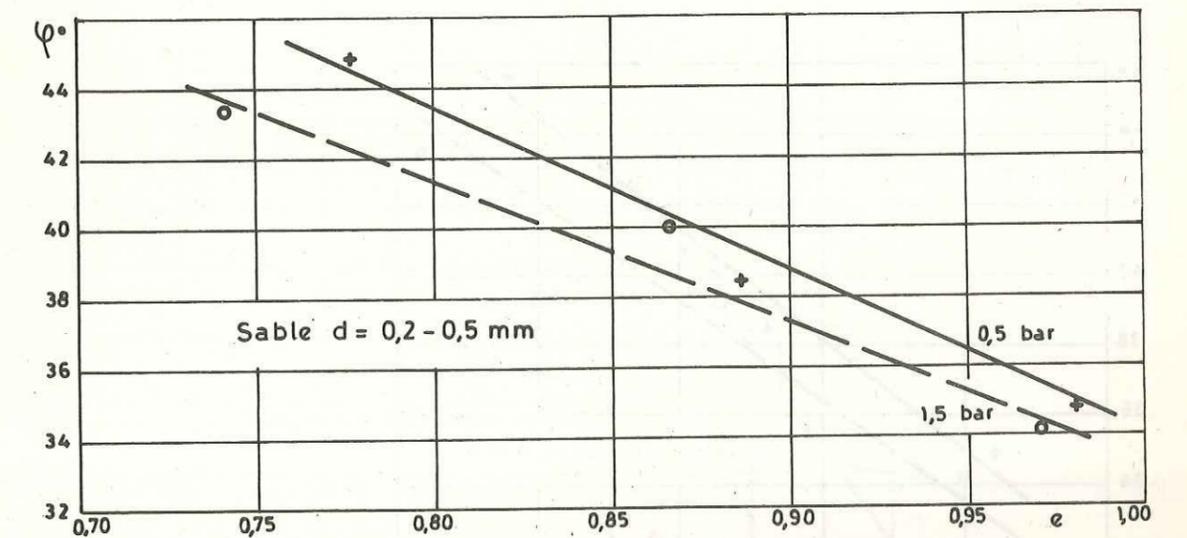
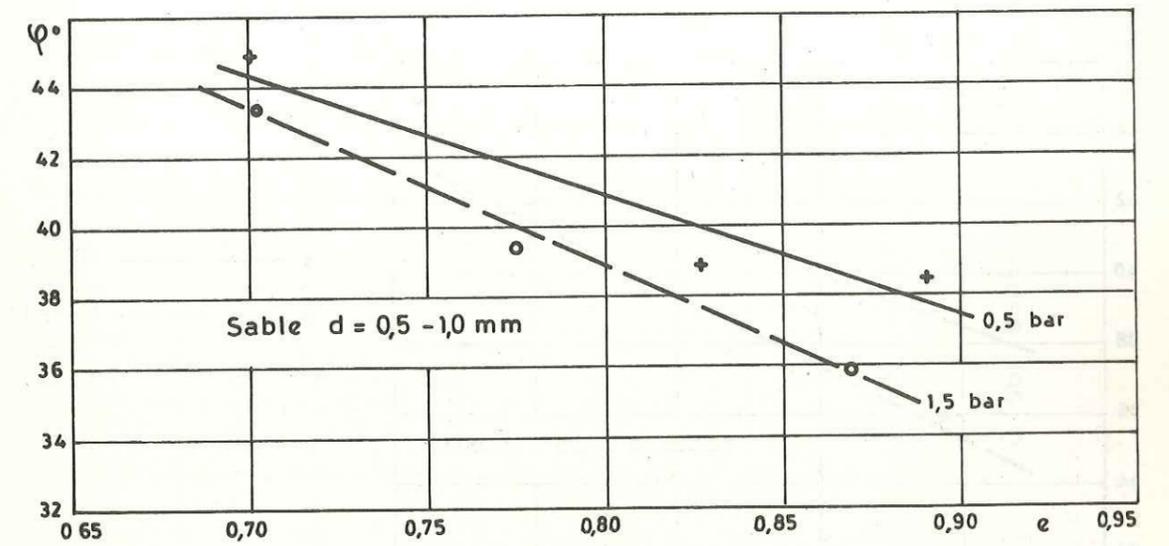
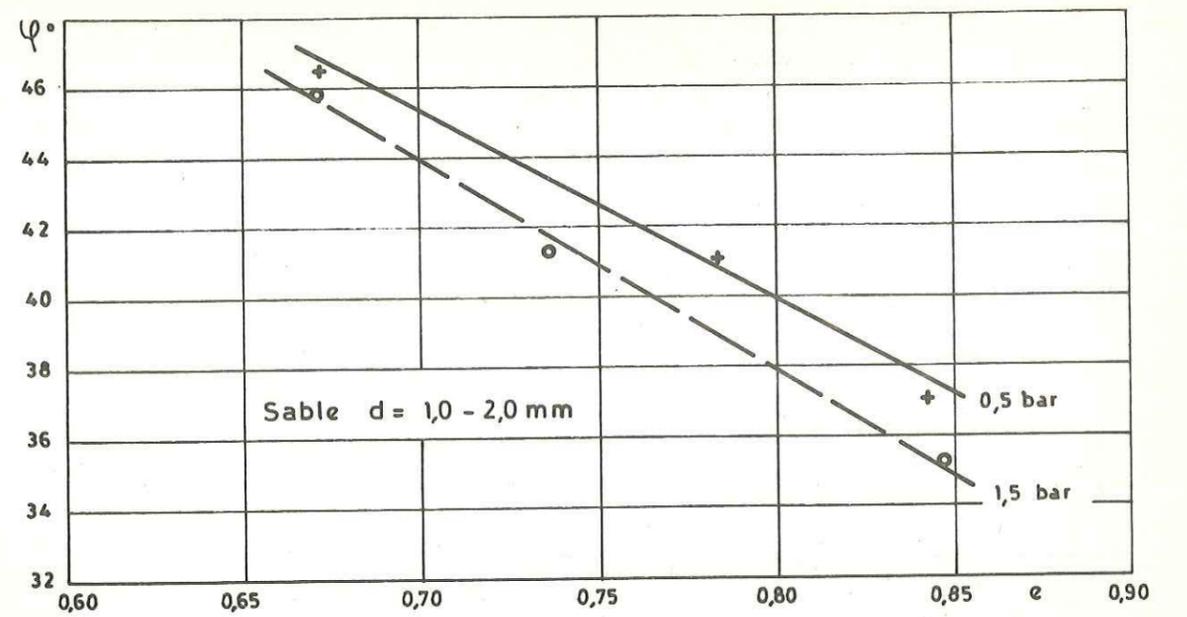
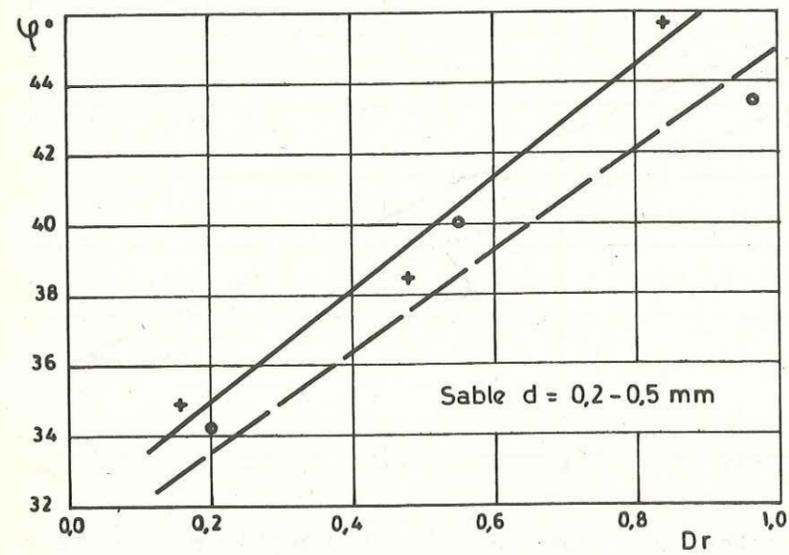
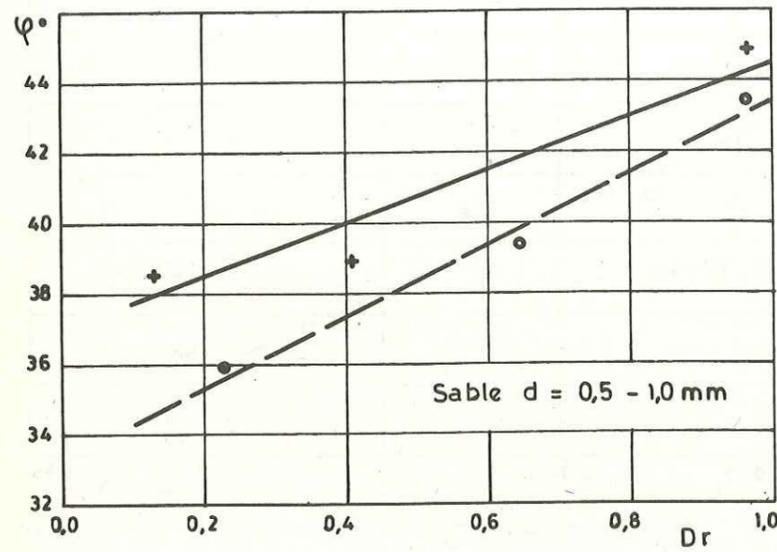
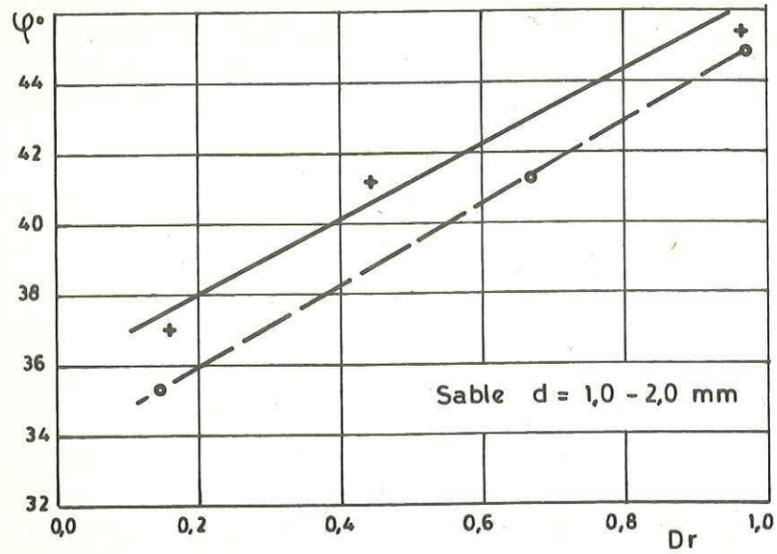


Fig.48- Influence de l'indice des vides initial sur l'angle de frottement interne pour les sables



+ ———  $\sigma_3 = 0,5 \text{ bar}$   
 o - - - -  $\sigma_3 = 1,5 \text{ bar}$

Fig.49- Courbes  $\varphi$  en fonction de la densité relative ( Dr )

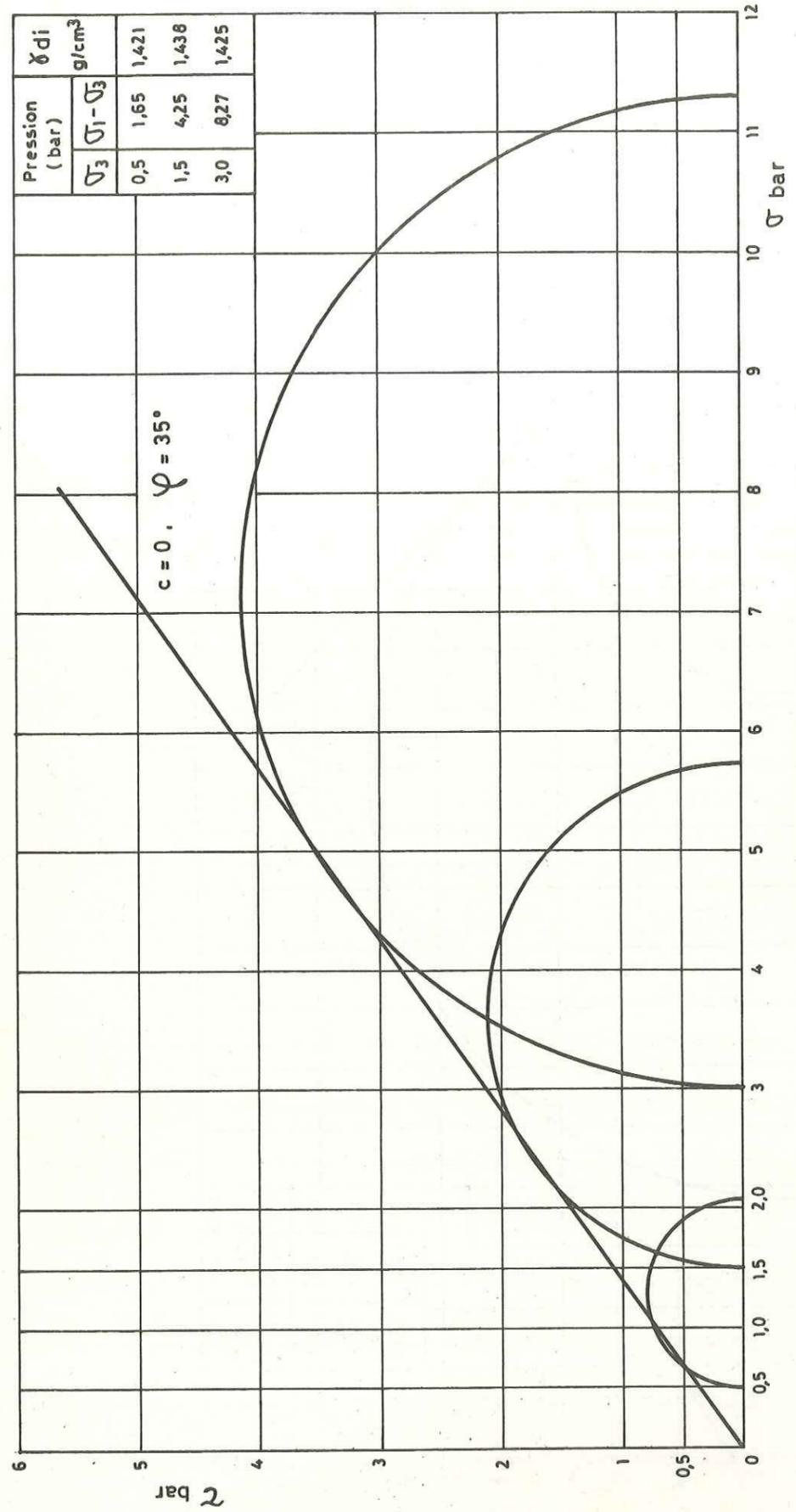


Fig. 50 - Essai triaxial NCD sur sable de dimension 0,5 - 1,0 mm

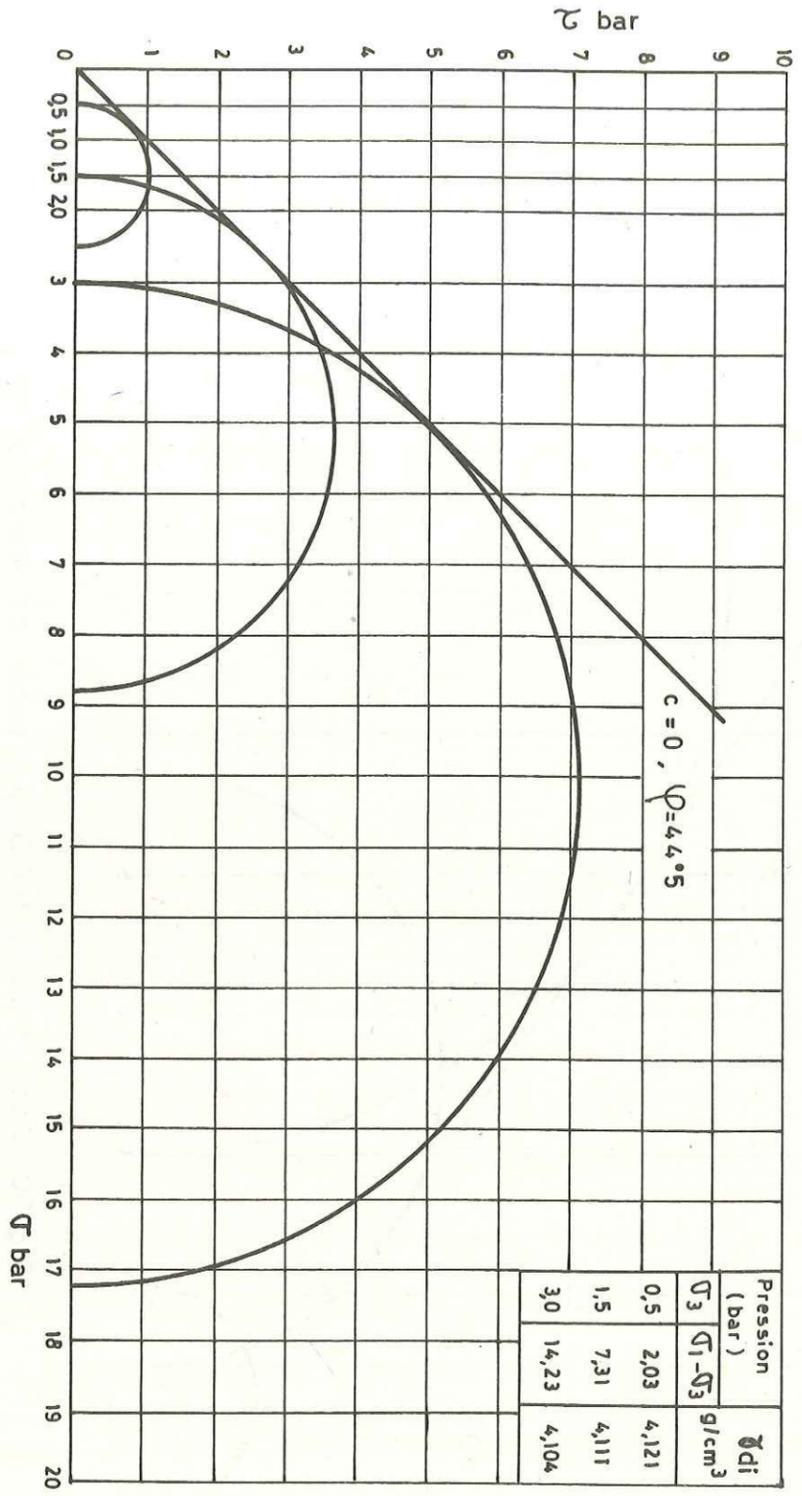


Fig. 51 - Essai triaxial NCD sur grains d'acier anguleux de dimension 0,5-1,0 mm

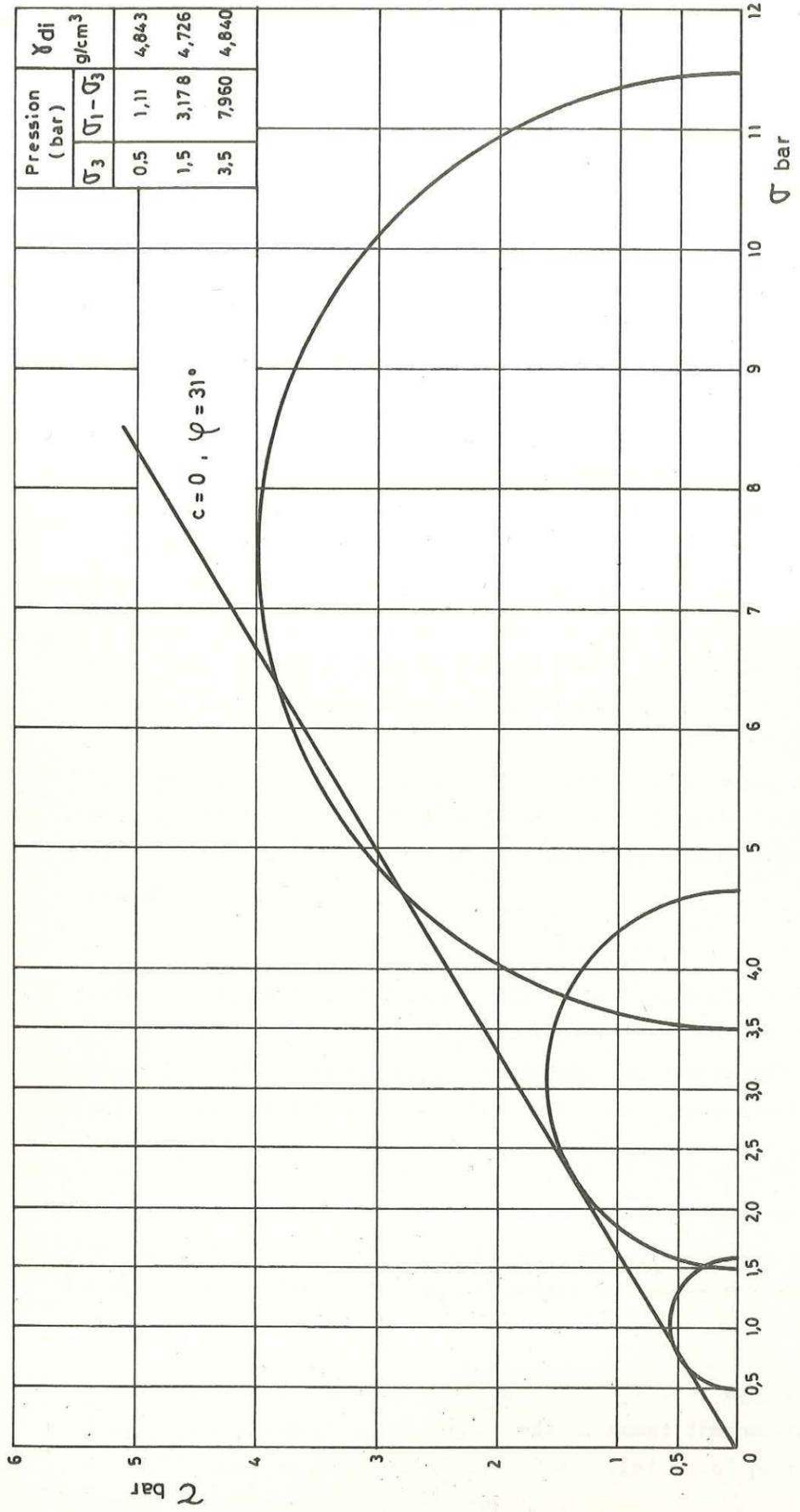


Fig. 52 - Essai triaxial NCD sur billes d'acier de diamètre variant de 1,0 à 2,5 mm

### CONCLUSIONS

Dans cette partie de notre mémoire, nous avons essayé d'étudier un des paramètres substantiels des ruptures mécaniques des matériaux pulvérulents : l'angle de frottement interne.

L'étude bibliographique ainsi que les résultats de nos essais de laboratoire ont indiqué que la forme des grains constituant le sol et la compacité du sol sont des facteurs déterminants pour l'estimation de l'angle de frottement, aux faibles contraintes latérales. Pour cette raison, nous nous sommes concentrés sur ces deux facteurs.

Nous avons également considéré l'influence des autres facteurs, principalement d'après les données bibliographiques.

1. L'angularité et la sphéricité dépendent de la forme macroscopique des grains ; la rugosité dépend de la microstructure de la surface. Donc ces deux facteurs sont fonction de la forme macroscopique et microscopique des grains.

Un sol donné composé d'un ensemble de grains de dimensions et de formes différentes, peut difficilement être étudié en partant de notions purement géométriques pour définir une caractéristique statistique que l'on appelle l'angularité. Par exemple, les dénominations couramment utilisées telles que : aigus, arrondis, très ronds, etc. sont des notions très subjectives et grossières, il est donc difficile de donner une description précise.

Dans nos essais avec les grains d'acier, nous avons remarqué qu'il existe un lien intime entre les formes des grains et certains paramètres de l'ensemble. Ces facteurs sont  $e_{\max}$  : indice des vides maximal et  $\beta$  : angle de frottement naturel.

En effet, pour les particules sphériques d'acier,  $e_{\max}$  est égal à 0,7-0,75 ; pour les particules angulaires de mêmes dimensions,  $e_{\max}$  est de 0,9-1,2. Pour les mêmes particules  $\beta$  est égal à  $26^\circ$  pour les grains sphériques et  $38^\circ$  pour les grains anguleux.

Pour constituer des matériaux avec une angularité variable, nous avons utilisé des mélanges de particules sphériques et angulaires en les caractérisant par un coefficient d'angularité égal à la valeur de rapport du poids des particules angulaires au poids des particules sphériques. Ensuite, nous avons cherché la corrélation entre ce coefficient d'angularité et les paramètres suivants :  $e_{max}$ ,  $\beta$  et  $e_{max} \cdot \text{tg } \beta$ .

Ces trois paramètres sont bien corrélés avec le coefficient d'angularité mais la corrélation est meilleure pour  $e_{max} \cdot \text{tg } \beta$ .

Par conséquent, nous avons proposé de définir l'angularité des matériaux par une valeur numérique égale à  $I_a = e_{max} \text{tg } \beta$ . L'avantage de cette définition est de pouvoir d'une manière objective déterminer un coefficient numérique caractérisant l'angularité des matériaux.

2 - Le deuxième facteur influençant substantiellement l'angle de frottement est la densité du sol. La variation de l'angle de frottement en fonction de la compacité peut atteindre  $16^\circ$ . Les essais effectués ont démontré que pour les faibles contraintes latérales la valeur de la constante dans la formule

$$e \cdot \text{tg } \varphi = \text{Cte}$$

est égale à  $I_a$ . Ceci est logique car en général la valeur de la constante doit dépendre de la forme et de la propriété mécanique des grains (pour  $\sigma_3 = \text{Cte}$ ). Etant donné que pour les faibles contraintes l'influence des propriétés mécaniques des grains est faible, la valeur de la constante doit être influencée substantiellement par la forme des grains.

Donc pour estimer l'angle de frottement du sol in situ par la formule exprimée ci-dessus, il suffit de déterminer l'indice des vides in situ et  $e_{max} \cdot \text{tg } \beta$ .

La validité de cette approche a été vérifiée pour les grains d'acier et pour les sables. Afin d'apprécier la validité de la méthode proposée pour les divers sols pulvérulents, il faudra effectuer de nombreux essais. Malheureusement, les résultats d'essais existant dans la littérature ne sont pas exploitables à ce point de vue du fait du manque des données  $e_{max}$  et  $\text{tg } \beta$ .

.../...

Il nous semble que la formule

$$\varphi = \text{arc tg } \frac{e_{max}}{e_0} \text{tg } \beta$$

peut permettre d'estimer facilement l'angle de frottement en effectuant de simples mesures de  $e_{max}$  et  $\beta$  d'une part et  $e_0$ , indice des vides in situ, d'autre part.

3 - L'angle de frottement interne n'est pas une constante quand la pression latérale  $\sigma_3$  du triaxial varie.

Pour les sables  $\varphi$  décroît quand  $\sigma_3$  croît. Ce phénomène serait dû à l'augmentation du nombre des ruptures de particules (ou de leurs aspérités) quand  $\sigma_3$  augmente. Pour l'application à l'étude de glissements de terrains, où les contraintes  $\sigma_3$  sont toujours assez faibles sur la surface de glissement, on pourra retenir que  $\varphi$  diminue de  $2$  à  $4^\circ$  lorsque  $\sigma_3$  passe de  $0,2$  à  $1$  bar. La décroissance est plus faible au-dessus.

Dans nos expériences, avec des grains d'acier, nous avons trouvé au contraire une augmentation de  $\varphi$  avec  $\sigma_3$ . Ceci peut s'expliquer par un meilleur enchevêtrement des particules sans qu'il y ait de ruptures de grains, vu la plus forte résistance à la rupture de l'acier.

4 - La dimension a une influence encore imprécise sur l'angle  $\varphi$

Il semble néanmoins que pour des mélanges uniformes  $\varphi$  diminue quand la dimension des grains augmente. Ceci serait dû au fait que plus les grains sont gros et plus les contraintes intergranulaires sont élevées. Les ruptures de grains sont donc plus fréquentes, ce qui entraîne une diminution de  $\varphi$ . Cette rupture de grains paraît d'ailleurs jouer un rôle capital dans la détermination de  $\varphi$ , comme nous l'avons déjà vu.

5 - En l'absence de fins, la granulométrie aurait un rôle assez faible sur l'angle de frottement interne  $\varphi$

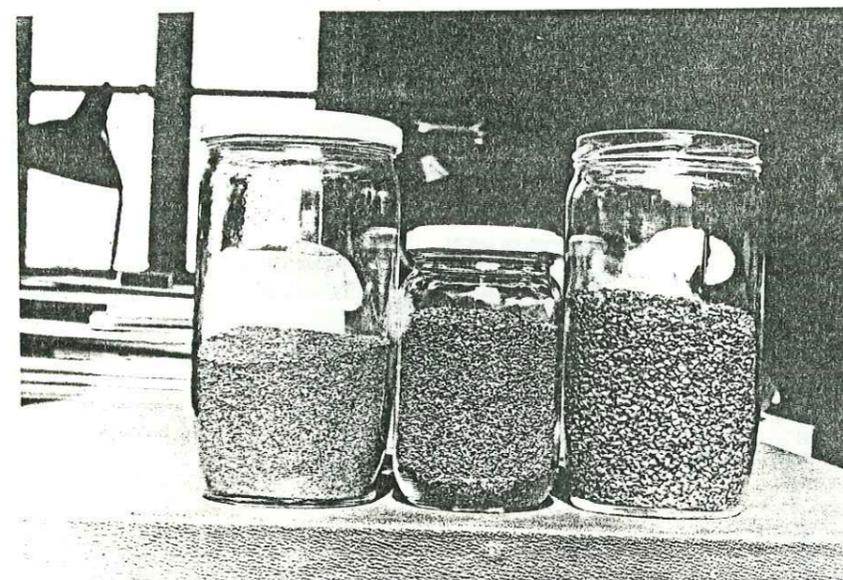
Cependant, les matériaux qui ont une granulométrie plus étalée ont des plus élevés. Là encore, ceci serait dû au fait qu'un matériau à granulométrie serrée est plus sujet aux ruptures de particules.

Nous n'avons pas étudié l'influence des fins sur la résistance d'un sol. On peut néanmoins admettre que l'introduction de particules fines dans un sol a une influence néfaste sur le comportement mécanique de celui-ci.

.../...

C'est d'ailleurs ce qu'ont mis en évidence MARSAL et FUENTES de la ROSA.

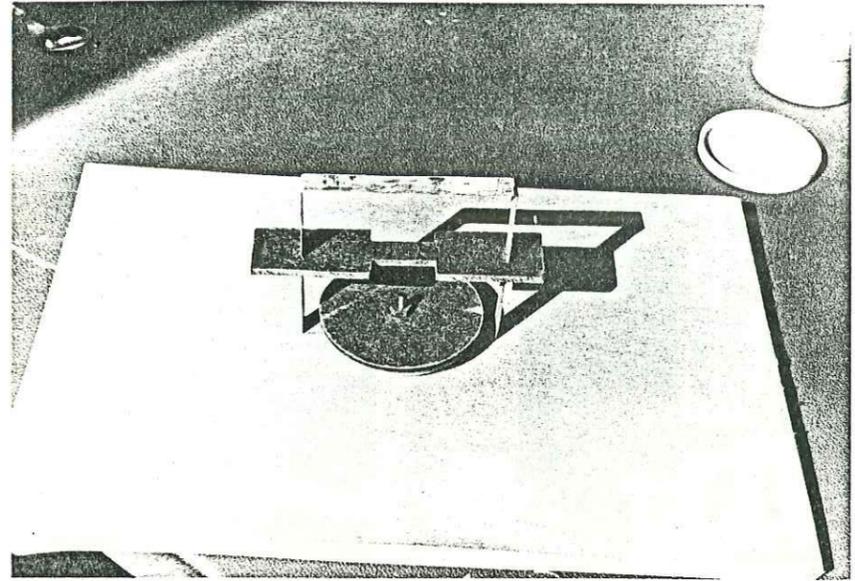
Pour conclure, nous dirons que pour les sols naturels sans fins, où les  $d_{60}/d_{10}$  sont toujours élevés, la granulométrie ne devrait pas jouer un rôle important.



Grains d'acier angulaires



Billes d'acier



Appareil pour mesurer l'angle de talus naturel  $\beta$

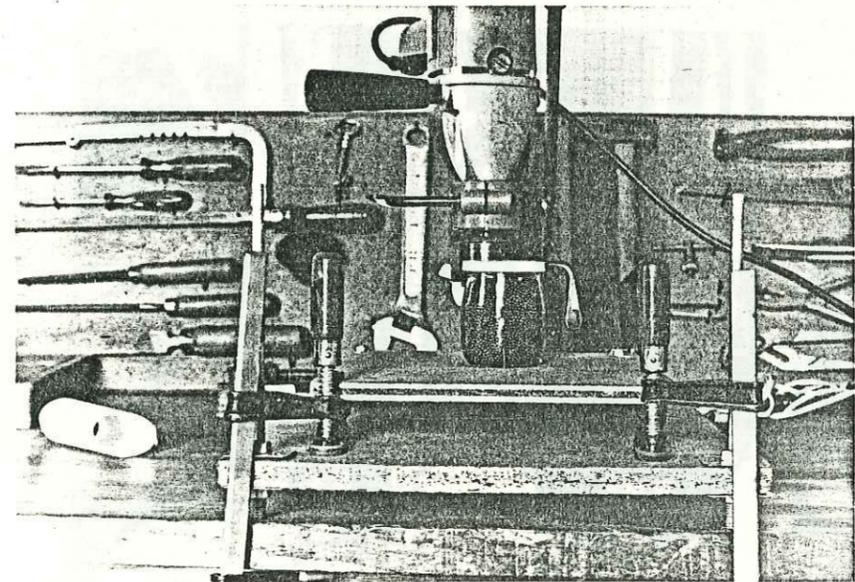
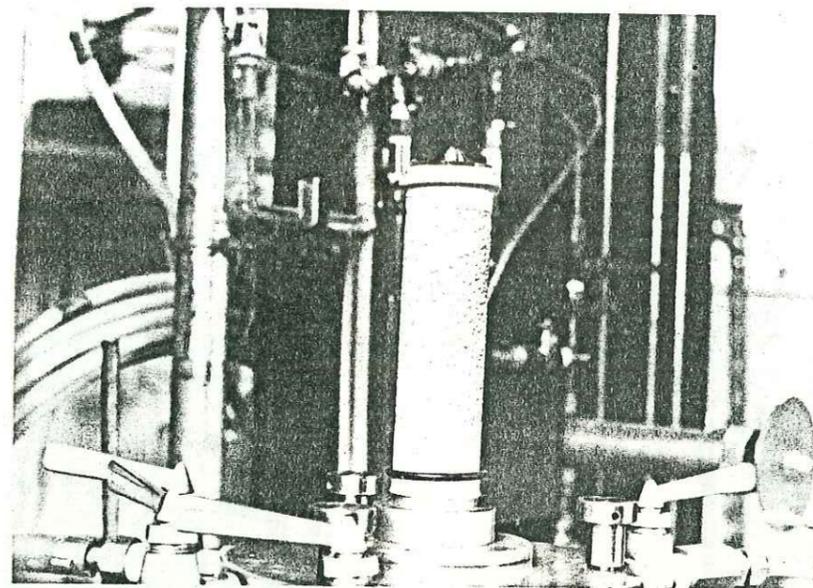
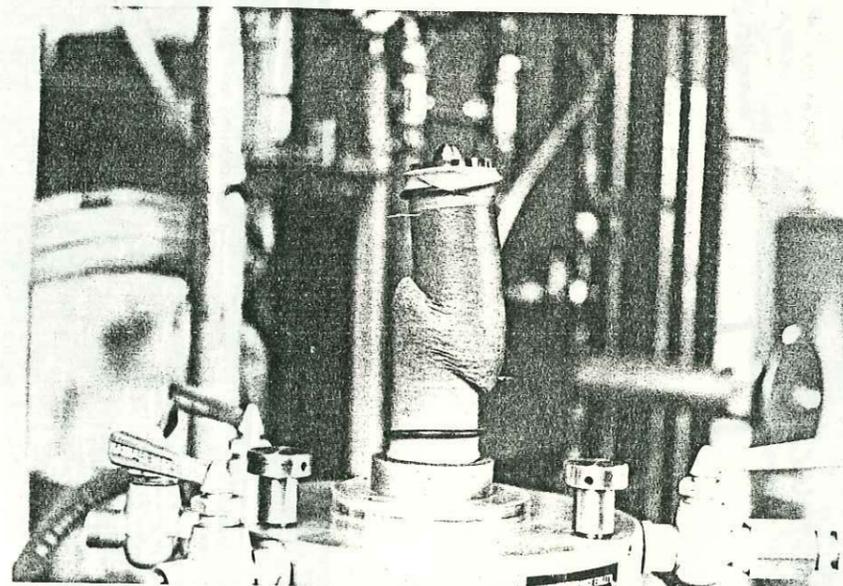


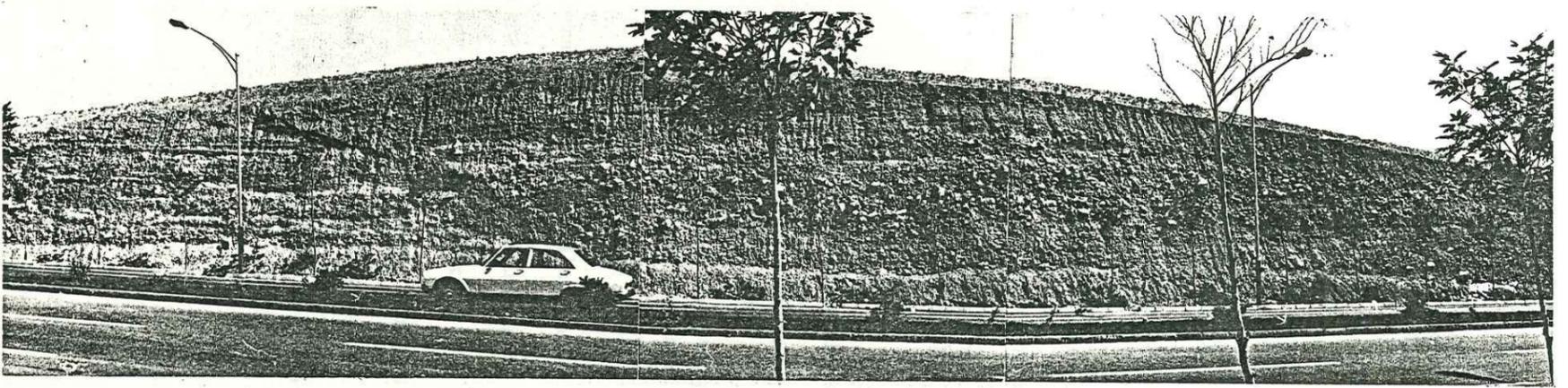
Table vibrante



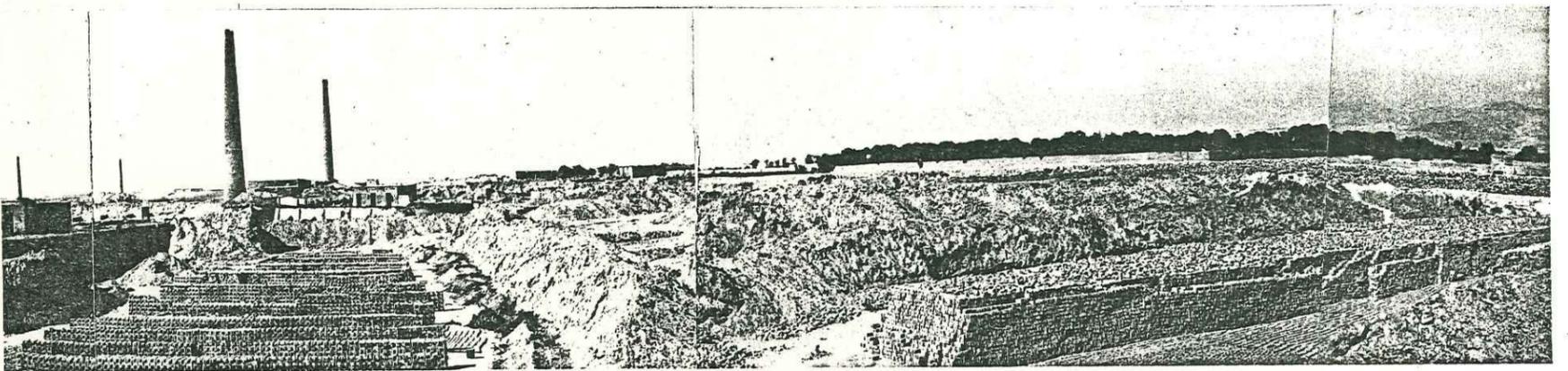
Vue d'un échantillon dans l'appareil triaxial  
avant l'essai



Vue d'un échantillon à la fin de l'essai triaxial



Vue d'un glacis d'accumulation au Nord de Téhéran



Vue d'une zone argileuse au Sud de Téhéran et utilisation de cette argile

FIGURES ET PLANS

	Pages
Carte n° 1 - Carte générale de l'Iran. Situation de la région étudiée.	10
Carte n° 2 - Situation générale de la région étudiée et implantation des puits.	41
Carte n° 3 - Carte géologique de la région étudiée	50-51
Carte n° 4 - Carte hydrogéologique de la région étudiée	55
Carte n° 5 - Variation du pourcentage des matériaux grossiers (> 10 mm) dans la plaine de Tabasse	110
Carte n° 6 - Variation du pourcentage des matériaux fins (< 2 mm) dans la plaine de Tabasse	111
Carte n° 7 - Variation du poids volumique sec (g/cm <sup>3</sup> ) dans la plaine de Tabasse	126
Carte n° 8 - Variation de l'indice des vides dans la plaine de Tabasse	128
Schéma n° 1 - Coupe d'un ghanate	27
Schéma n° 2 - Coupe d'un puits semi-profond	29
Schéma n° 3 - Implantation des puits	61
Schéma n° 4 - Principe d'un essai de plaques in situ	91
Schéma n° 5 - Essai de perméabilité in situ	99
Schéma n° 6 - Variation des pourcentages des divers matériaux rencontrés dans le puits n° 12	109
Coupe géologique A-A' de la plaine de Tabasse	41
Coupe géologique B-B' de la plaine de Tabasse	42
Coupe géologique C-C' des plaines de Tabasse et de Rise	43

	Pages
Figure n° 1 - Variation de la granulométrie avec la profondeur dans les plaines de Tabasse et de Rise	114 à 118
Figure n° 2 - Variation du pourcentage de particules > 10 mm en fonction de l'altitude	119
Figure n° 3 - Variation du pourcentage de fines < 2 mm en fonction de l'altitude	120
Figure n° 4 - Variation du pourcentage de particules fines avec l'altitude	121
Figure n° 5 - Variation du pourcentage de fins (< 2 mm) avec la profondeur	122
Figure n° 6 - Variation du pourcentage de matériaux grossiers avec la profondeur	123
Figure n° 7 - Variation du poids volumique sec en fonction du pourcentage de fins (< 2 mm)	127
Figure n° 8 - Variation du poids volumique sec en fonction de l'altitude	128
Figure n° 9 - Variation du poids volumique sec en fonction de la profondeur	129
Figure n° 10 - Variation de $\gamma_d$ en fonction du temps de vibration. Grains d'acier	133
Figure n° 11 - Variation de $\gamma_d$ en fonction du temps de vibration. Sable	134
Figure n° 12 - Variation du poids volumique sec en fonction du pourcentage de fins (< 0,05 mm) et de la limite de liquidité ( $W_L$ %)	135
Figure n° 13 - Variation du poids volumique sec. Valeur moyenne par puits	136
Figure n° 14 - Variation de $\gamma_d$ pour une même altitude par rapport à la situation des oueds principaux dans la plaine de Tabasse	137
Figure n° 15 - Relation entre $I_p$ et $W_L$ dans la plaine de Tabasse	139
Figure n° 16 - Variation du degré de saturation avec la profondeur	140
Figure n° 17 - Variation de l'indice des vides en fonction de l'altitude	143
Figure n° 18 - Relation entre le module de déformation E et le poids volumique sec $\gamma_d$	147

	Pages
Figure n° 19 - Variation du module de déformation E, de la cohésion C et de l'angle de frottement interne $\varphi$ en fonction du pourcentage de fins (< 0,005 m)	148
Figure n° 20 - Relation entre C, $\varphi$ , E et le poids volumique sec $\gamma_d$ (état saturé)	149
Figure n° 21 - Relation entre C, $\varphi$ et le poids volumique sec $\gamma_d$ (état naturel)	150
Figure n° 22 - Variation des indices des vides limites obtenue dans le triaxial en fonction de la dimension des particules	178
Figure n° 23 - Variation de $e_{max}$ en fonction du pourcentage d'angulaires dans un mélange de particules rondes et angulaires	179
Figure n° 24 - Influence de la dimension des grains sur l'angle $\beta$	180
Figure n° 25 - Influence du pourcentage de grains dans un mélange sur l'angle $\beta$	180
Figure n° 26 - Courbes effort-déformation sur les grains d'acier à leur densité maximale	181
Figure n° 27 - Courbes effort-déformation sur les grains d'acier à leur densité maximale	183
Figure n° 28 - Courbes $\varphi(e)$ pour sable de roche de "Venats" tirées du livre de Becker, Seed et Chan	184
Figure n° 29 - Influence de l'indice des vides initial sur l'angle de frottement interne pour les matériaux angulaires de dimension 0,5-1,0 mm	186
Figure n° 30 - Influence des vides initial sur l'angle de frottement interne pour matériaux angulaires de dimension 1,0-2,5 mm	187
Figure n° 31 - Courbes $\varphi(e)$ pour matériaux à grains d'acier ronds de dimension 1,0-2,5 mm	188
Figure n° 32 - Courbes $\varphi(e)$ pour matériaux à grains d'acier ronds de dimension 0,2-0,5 mm	189
Figure n° 33 - Courbes $\varphi(D_r)$ pour grains d'acier anguleux de dimension 1,0-2,5 mm	190
Figure n° 34 - Courbes $\varphi(D_r)$ pour grains d'acier ronds de dimension 0,2-0,5 mm	191
Figure n° 35 - Relation entre ( $e \text{ tg } \varphi$ ) et e pour grains d'acier anguleux	195

	Pages
Figure n° 36 - Relation entre (e tg $\varphi$ ) et e pour billes d'acier	196
Figure n° 37 - Influence de $\sigma_3$ sur $\varphi$ pour des échantillons à grains d'acier anguleux de différentes dimension.	198
Figure n° 38 - Courbes $\varphi$ ( $\sigma_3$ ) pour grains d'acier anguleux. Les échantillons sont placés à $D_r = 0$	199
Figure n° 39 - Courbes $\varphi$ ( $\sigma_3$ ) pour grains d'acier ronds. Les échantillons sont placés à $e = 0,720$	200
Figure n° 40 - Influence de la dimension des particules	203
Figure n° 41 - Variation de $e_{max}$ et $\beta$ en fonction du pourcentage d'angulaires	204
Figure n° 42 - Variation de l'indice d'angularité $I_a$ en fonction du pourcentage d'angulaires dans un mélange	205
Figure n° 43 - Relation entre $\varphi$ et $I_a$ lorsqu'on fait varier le pourcentage d'angulaires dans un mélange de ronds et d'angulaires de dimension 0,5-1,0 mm	207
Figure n° 44 - Courbes effort-déformation sur le sable pour différentes densités	209
Figure n° 45 - Relation entre (e tg $\varphi$ ) et e pour sable	210
Figure n° 46 - Influence de la dimension des particules sur $\varphi$ (triaxial) et $\beta$	213
Figure n° 47 - Variation de l'indice des vides en fonction de la dimension des particules	214
Figure n° 48 - Influence de l'indice des vides initial sur l'angle de frottement interne pour les sables	215
Figure n° 49 - Courbes $\varphi$ en fonction de la densité relative ( $D_r$ )	216
Figure n° 50 - Essai triaxial NCD sur sable de dimension 0,5-1,0 mm	217
Figure n° 51 - Essai triaxial NCD sur grains d'acier anguleux de dimension 0,5-1,0 mm	218
Figure n° 52 - Essai triaxial NCD sur billes d'acier de diamètre variant de 1,0 à 2,5 mm	219

	Pages
Tableau n° 1 - Précipitations et températures annuelles dans différentes villes d'Iran	12-13
Tableau n° 2 - Précipitations et températures mensuelles	46
Tableau n° 3 - Analyse chimique de l'eau	54
Tableau n° 4 - Variation du coefficient de perméabilité dans la couche supérieure du sol (0,3-1,5 m) dans les plaines de Tabasse et de Rise	58
Tableau n° 5 - Granulométrie	63 à 66
Tableau n° 6 - Propriétés physiques des sols	68 à 73
Tableau n° 7 - Propriétés physiques des sols	74 à 77
Tableau n° 7a- Résultats d'essais de résistance à la compression des conglomerats	79
Tableau n° 8 - Angle de talus naturel des sols	80
Tableau n° 9 - Résultats d'essais de cisaillement en laboratoire	81
Tableau n° 10 - Détermination du poids volumique in situ	86
Tableau n° 11 - Résultats d'essais d'identification in situ	87-88
Tableau n° 12 - Résultats d'essais de plaque in situ	94
Tableau n° 12bis - Résultats d'essais de plaque in situ	95
Tableau n° 13 - Résultats d'essais de cisaillement in situ	96
Tableau n° 13 bis - Résultats d'essais de cisaillement in situ (état naturel)	97
Tableau n° 14 - Résultats d'essais de perméabilité in situ	100-102
Tableau n° 15 - Moyennes des résultats par puits	112-113
Tableau n° 16 - Comparaison des poids volumique in situ avec les densités foisonnées et du Proctor normal dans différentes régions d'Iran et de France	131
Tableau n° 17 - Changements de densité sèche pour les terrains de même granulométrie et altitude en fonction de leur situation par rapport aux lits des oueds	132
Tableau n° 18 - Teneur en sel des alluvions des plaines de Tabasse et de Rise	145
Tableau n° 19 - Résultat des essais effectués sur les grains acier ronds	192

	Pages
Tableau n° 20 - Résultat des essais effectués sur les grains acier triangulaires	193
Tableau n° 21 - Variation de la densité et de l'indice des vides en fonction du compactage par vibration et mesures des valeurs de $\beta$ et $e_f$ .tg $\beta$ et $\delta$ écarts-types	194
Tableau n° 22 - Résultat des essais effectués sur les sables de Sonmaz	208

LISTE DES SYMBOLES

$\gamma$	- Poids volumique du sol
$\gamma_d$	- Poids volumique du sol sec
$\gamma_h$	- Poids volumique du sol humide
$\gamma_f$	- Densité foisonnée
$\gamma_{di}$	- Densité initiale
G	- Poids spécifique
e	- Indice des vides
$e_f$	- Indice des vides foisonnés
$e_m$	- Indice des vides maximales
$e_m$	- Indice des vides minimales
Dr	- Densité relative
h	- Porosité
W	- Teneur en eau
S	- Degré de saturation
WL	- Limite de liquidité
Wp	- Limite de plasticité
Ip	- Indice de plasticité
K	- Coefficient de perméabilité
E	- Module de déformation
$\sigma_n$	- Contrainte normale
$\tau$	- Contrainte tangentielle
$\varphi$	- Angle de frottement interne
C	- Cohésion
$\beta$	- Angle de talus naturel
$\mu$	- Coefficient de Poisson
d	- Dimension
$I_a$	- Indice d'angularité
$\delta$	- Ecart-type

B I B L I O G R A P H I E

- AL-ISSA M. - "Recherche de lois de contrainte-déformation des milieux pulvé-  
rulents". Thèse de Docteur-Ingénieur. Université Scientifique  
et Médicale de Grenoble, 1973.
- ALLELY et NEWLAND - "Volume changes in drained triaxial tests on granular  
materials" Géotechnique, Vol. 7, n° 1, p. 17, 1957.
- AWAD H. - "Un problème de morphologie aride, "les pédiments". Bull. Soc.  
Géogr. Egypte XXVIII, pp. 5-19, 1955.
- BECKER, CHAN et SEED - "Strength and deformation characteristics of rockfill  
materials in plane strain and triaxial compression tests".  
Report n° TE 72-3 to state of California Dept. of Water Resour-  
ces. University of California - Berkeley.
- de BEER E. - "Influence of the mean normal stress on the shearing of sand".  
Proceedings of the Sixth Int. Conf. on Soil Mechanics and  
Found. Eng., Canada, 1965.
- BIAREZ J., FAVRE J.L. - "Table ronde sur les corrélations de paramètres en  
mécanique des sols". Ecole Centrale de Paris, 1972.
- BOBEK H. - Features and formation of the Great Kawir and Misilej. Univ. of  
Téhéran, Arid Zone Res. Center, Public, n° 2, 63, p. 16 pl.  
1 carte h.t., 1959.
- BOBEK H. - Die Salzwüsten Irans als Klimazeugen. Anz. phil.-hist. Kl. Osterr.  
Ak. Wissenschaften, n° 3, pp. 7-19, 1961.
- BOBEK H. "Klima and Landschaft Irans, In, Vol. 2, und Fruhgeschichlicher Zeit.  
Wien. Geogr. Jahrbuch a Osterrich 250 pp. 1-42, 1953-54.
- BOUT P., DERUAU M., DRESCH J., PEGUY Ch. P., -"Observations de géographie  
physique en Iran septentrional." Mém. Centre Doc. Cartogr C.N.R.S.  
VIII, pp. 0-101, 1961.

- COQUE R., - "Morphologie de la Tunisie pré-saharienne". Trav. Inst. Rech. Sahariennes, XVII, pp. 59-81.  
Bonnes descriptions de glaciers étagés quaternaires, semblables à ceux du Maroc.
- COSTET J., SANGLERAT G., - Cours pratique de mécanique des sols. DUNOD, 1969.
- DERRUAU M. - Précis de Géomorphologie. pp. 184-190. Paris. 1956.
- DEWAN M.L., FAMOURI J., - "The soils of Iran". F.A.O., Rome, 319 p. 93 fig. 3 cartes., 1964.
- DRESCH J. - "Le piémont de Téhéran". C.N.R.S. - Mémoires et documents. Centre Doc. Cartogr. T VIII, Chap. IV, pp. 85-101, 1953.
- DRESCH J. - Observations sur des formes et dépôts quaternaires en Syrie. B.S.G.F., 7è série, V, pp. 603-606, 1963b.
- DRESCH J. - Observaciones sobre las regiones aridas de America del Sur y de los Estados Unidos. U.G.I. Conf. Reg. Latino amer., Mexico, III, pp. 190-199. 1966.
- EGHBALI A. - "Contribution à l'étude du problème de l'irrigation en Iran. Canaux souterrains, puits". Thèse, Paris, 1955.
- ENGALENC M. - "Contribution à la géologie, géomorphologie, hydrogéologie de la région de Téhéran (Iran)". Thèse, Montpellier, 1963.
- FOROUGHI H. - "Contribution à l'étude des nappes en pays aride. Essai de bilan hydrogéologique de la plaine de Kerman (Iran)". Thèse de Docteur-Ingénieur, Université Scient. et Médicale de Grenoble, 1976.
- FOOKES P.G., KNILL J.L. - "The application of engineering geology in the regional development of northern and central Iran". Engineering Géology an Int. Journal, Vol. 3 n° 2, April 1969.
- GABRIEL A. - Zur Oberflächengestaltung der Pfannen in den Trochenräumen Zentral persiens. Festchr. 60. Lebensjahres Spreitzer, Wien, pp. 42-57, 1958.
- GANSSEER A. - "New aspects of the geology in central Iran. In world Pet. Congress 4 th Rome, 1955. Proc. Sec. I, Geology Geophysics, p. 279-300.
- GIBB, Sir Alexander and parttners. Report on water resources survey, Teheran region, London, 1958.

- KIRKPATRICK - "Effects of grain size and grading on the behaviour of granular materials". Proc. of the Sixth Int. Conf. on Soil Mechanics and Found. Eng., Canada, 1965.
- KOERNER - "Effect of particle characteristics on soil strength". Journal of the Soil Mechanics and Foundation Eng. Proc. A.S.C.E., July 1970.
- KRINSLEY, D.B. - "A geomorphological and paleoclimatological study of the playas of Iran. Air Force Cambridge Res. Labs., Contract N° PROCP 70-800, Final Rept. AFCRL - 70-0503. Washington, D.C. U.S. Govt. Print. Office, Pt. 1, p. 329, Pt. 2, pp. 330-486.
- KOLBUZEWSKI et FREDERIC - "The significance of particle shape and size on the mechanical behaviour of granular materials". European Conf. on Soil Mech. and Found. Eng., Wiesbaden 1963, Section 4.
- MARSAL et FUENTES DE LA ROSA - "Mechanical Properties of Rockfill soil mixtures". 12è Congrès des Grands Barrages, Mexico, 1976.
- MAVLIANOV G.A. - "Quelques données sur les couches alluviales loessiformes de l'Ouzbekistan". C.R.A.c. Sc. U.R.S.S., LX, pp. 1231-1234, Traduction C.E.D.P.  
Les limons d'épandage semi-arides du piémont des montagnes d'Asie Centrale.
- MEYKADEH C.A., FITT R.L., BODINGTON T.J. - "Tehran water supply". Row water collection and distribution system, n° 6327, pp. 467-486, 1959.
- MOZESSON D.L. - "Sur le microrelief et les dépressions des semi-déserts complexes de la Précaaspienne et leur utilité pour la mise en valeur agricole." Izv. Ak. Nauk. S.S.S.R., Sér. Géogr. n° 6, pp. 68-76.
- PERROT - "Bibliographie sur la résistance au cisaillement des matériaux grossiers". L.C.P.C., Nov. 1968.
- "QUATERNAIRE", 1963 - B.S.G.F., 7ème série, t. v, n° 4, pp. 407-650, pl. XI, XX.
- RIEBEN H. - "Notes sur la géologie du Nord de l'Iran! Sangmelima Cameroun. Halsey Memorial Press. Amer. Presbyt. Mission Elat., 1942.
- RIEBEN H. - " Observations sur la plaine de Téhéran". Doc. Téhéran. 1957.
- RIEBEN H. - Rapport au gouvernement Iranien sur les ressources en eaux souterraines de la plaine alluviale de Téhéran. F.A.O., Rome, rapport n° 168.

- RIEBEN H. - Note préliminaire sur les terrains alluviaux de Téhéran et particulièrement du territoire de Chémiran. Bull. Soc. Vaudoise des S.C. Nat., n° 283.
- RIEBEN H. - "Les terrains alluviaux de la région de Téhéran". Centre des Zones Arides, Téhéran, 1960.
- RIEBEN H. - "The geology of the Teheran plain". American Journal of Sc., Vol. 253, pp. 617-639, 1963.
- ROWE - "The stress-dilantary relation for statics equilibrium of an assembly of particles in contact". Proc. Roy. Soc. A 269, pp. 500-527, 1962.
- SCHARLAN K. - "Zum problem der pluvialzeiten in Nord-Est Iran" Berlin Z. für geomor. N.S. II, pp. 258-277, 1958.
- STRATIL, SAUER G. - "Geographische forchungen in ost. Persien Routen durch die Wüste Lut und ihre Randgebiete, Wien, 1956.
- TCHAHKOUTAHI C. - "Le problème de l'eau à Téhéran". Thèse, Paris, 1963.
- TRICART J. et CAILLEUX A. - Traité de géomorphologie. Tome IV. Le modelé des régions sèches. SEDES, Paris, 1969.
- ZAMON KHAN M. - "Hydrogéologie du bassin versant du Moharlu. Hydrodynamique des massifs calcaires de la région de Chiraz (Iran). Thèse de Docteur-Ingénieur, Univ. Scient. et Medicale de Grenoble, 1974.
- WINTERKORN et DUTERTRE - "Shear phenomena in natural granular materials". Princeton soil engineering. Research series n° 6.



Dernière page d'une thèse

VU

Grenoble, le

Le Président de la thèse

VU, et permis d'imprimer,

Grenoble, le

Le Président de l'Institut  
National Polytechnique

Le Président de l'Université  
Scientifique et Médicale