



Comportement des sols soumis au roulage. Essai d'évaluation des déformations subies par les terrains agricoles lors de l'implantation de lignes électriques

A. Faure, J.C. Fiès, Gwendal Monnier

► To cite this version:

A. Faure, J.C. Fiès, Gwendal Monnier. Comportement des sols soumis au roulage. Essai d'évaluation des déformations subies par les terrains agricoles lors de l'implantation de lignes électriques. INRA-EDF-1971-1973, 1974. hal-02858587

HAL Id: hal-02858587

<https://hal.inrae.fr/hal-02858587>

Submitted on 8 Jun 2020

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.

STATION D'AGRONOMIE I.N.R.A.
Centre de Recherches d'AVIGNON

COMPORTEMENT DES SOLS
SOUMIS AU ROULAGE

Essai d'évaluation des déformations subies par les terrains
Agricoles lors de l'implantation de lignes électriques.

par

Alain FAURE - Jean Claude FIES - Gérard MONNIER

avec la collaboration technique de
Claude Jeandet et Jean Claude PIERRE

CONVENTION DE RECHERCHES

I.N.R.A. - E.D.F.

1971 - 1973

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

Les recherches présentées ici ont été entreprises à la demande et avec l'appui d'Electricité de France (Direction des Services Juridiques et Financiers).

Elles avaient comme objectif général l'établissement de bases à l'indemnisation de dégâts éventuellement subis par les terrains agricoles, lors de l'implantation de pylones porteurs de lignes de transport ou de distribution d'énergie électrique.

Plus précisément, les buts poursuivis peuvent être regroupés en quatre catégories principales :

- 1) - Evaluation des dégâts tels qu'ils peuvent se manifester à la fin des travaux d'implantation, c'est à dire à l'époque où est déterminée l'indemnisation.
- 2) - Prévision de la durée des dégâts.
- 3) - Définition des moyens techniques susceptibles d'assurer la remise en état partielle ou totale des terrains.
- 4) - Accessoirement, recherche des moyens de prévision des dégâts avant même l'ouverture des chantiers.

Trois observations importantes doivent être faites :

- La mission qui nous a été confiée consistait à rechercher des bases objectives générales à l'établissement d'un barème d'indemnisation et non pas de déterminer ce barème lui-même.
- Dans le même esprit, l'objet à étudier était le sol et son comportement en fonction des contraintes qui lui avaient été appliquées et non pas la réaction des plantes aux déformations enregistrées.
- Il nous était demandé de rechercher pour l'évaluation des dégâts des critères simples, ce qui sous-entendait que de tels critères devaient pouvoir être appréhendés par des non spécialistes de physique ou de mécanique des sols.

Cette dernière contrainte s'est très vite avérée déterminante tant vis à vis de l'orientation générale du travail que de la méthode utilisée.

ENfin, bien que le cadre prévu pour ce travail ait été la région parisienne, ce point étant concrétisé par l'association au projet de la Chambre d'Agriculture de l'Ile de France, il apparaissait souhaitable que les résultats obtenus le soient de façon à permettre ou du moins à préparer leur extrapolation à l'ensemble du territoire national.

I - METHODE GENERALE UTILISEE

=====

En ce qui concerne les buts principaux de l'étude - évaluation de l'ampleur des déformations du sol sous chantier, du degré et de la vitesse de leur réversibilité - deux méthodes pouvaient être envisagées : l'expérimentation et l'analyse de situation par voie d'enquête.

La première aurait consisté à appliquer à une série de terrains, différents traitements simulant l'action sur le sol dans différentes conditions des engins du Génie Civil utilisés pour l'implantation des pylônes et à comparer l'état du sol qui en aurait résulté à celui d'un terrain pris à proximité immédiate. L'avantage d'une telle méthode est évidemment sa précision, liée à une maîtrise relative des traitements et à la possibilité d'avoir en chaque point des répétitions.

Elle présente toutefois une difficulté fondamentale : il est en effet indispensable pour choisir les traitements et leurs conditions d'application d'avoir une connaissance au moins qualitative des différents facteurs susceptibles d'influer de façon directe ou par interaction sur le résultat. Dans le cas qui nous intéresse, tel n'était pas le cas et nous avons dû procéder par voie d'enquête.

Dans cette méthode, on analyse un échantillon convenablement constitué de situations que l'on choisit aussi représentatives que possible de l'ensemble des situations rencontrées dans la pratique. Les informations recueillies lors de ces analyses (réponses à des question-

naires, observations, mesures) sont ensuite traitées dans le but de rechercher les relations qui peuvent exister entre elles. Ainsi, il est possible sans faire "a priori" d'hypothèses trop contraignantes, de rechercher s'il existe des relations entre un critère simple, particulier, et un ensemble de données caractéristiques d'un état de déformation.

DESCRIPTION DE L'ECHANTILLON

Il a été constitué en tenant compte de plusieurs impératifs dont l'importance avait été appréciée au cours de l'étude préalable aux recherches proprement dites :

- Les possibilités pratiques compte-tenu des moyens matériels disponibles, d'étudier chaque cas de façon suffisamment approfondie. Nous avons été de ce fait conduits à limiter à une quarantaine le nombre des situations retenues ; ce nombre s'avérant par ailleurs suffisant pour autoriser le traitement statistique des données.
- La nécessité de couvrir les principaux types de situations (type de chantiers, distribution et transports, ancienneté au chantier au moment de l'observation, état du terrain au cours du déroulement du chantier, etc...)
- La nécessité qu'au sein de l'échantillon la variation d'intensité des facteurs susceptibles d'influer sur le résultat soit suffisante pour que leur loi d'action puisse être déterminée.

Sur ces bases, nous avons retenu :

- I - Des chantiers de distribution, caractérisés par la rapidité d'exécution, la légèreté des moyens de Génie Civil mis en oeuvre ; Les sept chantiers constituant ce sous échantillon étaient tous en cours ou juste terminés au moment des observations. Ils étaient de plus tous localisés dans la région parisienne (Yvelines).

II - Des chantiers de transports caractérisés par une période de travaux pouvant s'échelonner sur plusieurs semaines, le roulage d'engins lourds et variés.

(1) Une première série d'entre eux (seize) étaient terminés depuis six à dix huit mois et avaient été remis en culture. Ils ne portaient plus de traces superficielles du passage des engins.

(2) Une deuxième série (quinze) a été étudiée au cours des opérations d'implantation ou juste après la fin du chantier.

La catégorie II₍₁₎ était entièrement localisée dans la région parisienne, tandis que les chantiers de la catégorie II₍₂₎ se situaient pour une partie d'entre eux dans la région parisienne, pour le reste dans le Nord de la France (limite des départements du Nord et du Pas de Calais de Douai à la Mer du Nord).

Pour l'ensemble des catégories recensées ci-dessus, les observations ont été effectuées à des saisons variables avec une prédominance au printemps et à l'automne. En particulier nous n'avons pu observer de chantier en cours ni en plein hiver (Décembre, Janvier, Février) ni en plein été (Juillet, Août). Toutefois, les observations faites pour les chantiers en cours et les informations recueillies pour les chantiers anciens nous permettent de penser que le sol a été humide et parfois très humide dans tous les cas durant au moins une partie de la durée du chantier.

La texture des terrains étudiés était très variable (cf. triangle de texture) à titre d'exemple les teneurs en argile varient de 7,8 à 60 %.

Il en est de même de l'état culturel au moment de l'ouverture du chantier. L'échantillon comprend des prairies permanentes, des labours récents non ensimencés, des blés, orge, maïs, betterave à sucre, pomme de terre, lin, pris à des stades culturels variables. Une telle diversité correspond à des types de préparation du sol et donc à des états structureaux initiaux très variés.

Enfin, hormis la distinction entre les chantiers de distribution et les chantiers de transport, il n'a pas été possible à quelques exceptions près, d'obtenir des informations suffisantes sur la conduite du chantier (type d'engin, nombre de passage, etc...) pour rendre compte de l'influence éventuelle d'un facteur "intensité des contraintes". Il apparaît en première approximation que tous les chantiers d'implantation de lignes de transport ont été conduits avec le même type de matériel.

INFORMATIONS RECUEILLIES

Il s'agit d'une part d'interviews des agriculteurs, des chefs de chantiers des contrôleurs de travaux d'E.D.F. portant sur les conditions générales de conduites du chantier et dans le cas de chantiers anciens sur les techniques de remise en état et le comportement ultérieur de la parcelle ; d'autre part d'observations et de mesures effectuées de façon comparative sur une partie de la parcelle ayant subi le passage des engins, sur une zone voisine prise en dehors de l'emprise du chantier.

Avant de préciser la nature et la signification de ces observations et mesures dont la description détaillée figure en annexe, il convient d'indiquer brièvement les principaux types de déformation du sol susceptibles de se manifester et que l'analyse a cherché à caractériser. Ce faisant, nous rappellerons un certain nombre de définitions de base.

STRUCTURE ET TEXTURE DU SOL

Le matériau constitutif d'un sol ou d'une couche de sol est composé de particules élémentaires que l'on a coutume de classer par taille :

0 - 2 μ	argile
2 - 20 μ	limon fin
20 - 50 μ	limon grossier
50 - 200 μ	sable fin que l'on décompose en deux parties :
50 - 100 μ	
100 - 200 μ	

200 μ - 2 mm	sable grossier dans lequel on distingue
	200 - 500 μ
	500 - 1.000 μ
	1.000 - 2.000 μ
> 2 mm	graviers et cailloux

Ces particules sont, à l'échelle microscopique, disposées les unes par rapport aux autres en assemblages élémentaires dans lesquels les éléments $> 2 \mu$, sables et limons sont plus ou moins cimentés par les particules les plus fines ($< 2 \mu$) minérales (argile) ou organiques (humus).

SYSTEMES DE POROSITE

On peut admettre qu'à l'état naturel l'architecture de cet assemblage élémentaire et sa conséquence mesurable principale la porosité (% du volume apparent non occupé par les particules solides) sont essentiellement déterminées par sa composition granulométrique et par les propriétés des différentes fractions, ensemble de paramètres regroupés dans la notion de texture : cette dernière qui est une caractéristique de constitution commande donc la porosité de la maille élémentaire du matériau à une humidité donnée. Elle influe aussi considérablement sur un ensemble complexe de propriétés physiques et mécaniques.

La porosité totale du sol définie à une échelle microscopique comme la fraction d'un volume apparent unitaire de sol en place non occupé par du solide (mais par de l'eau et (ou) de l'air) comprend outre cette porosité texturale, des vides correspondant aux fissures entre les mottes ou agglomérats de terre, aux anciens trajets de racines, aux galeries de vers de terre, etc... Cette deuxième catégorie de pores dits structuraux n'est que très indirectement et partiellement déterminée par la constitution du sol : elle dépend surtout de l'action de facteurs extérieurs climatiques (gel, alternance d'humectation et dessiccation) mécaniques (travail du sol) et biologiques.

Remarque

La porosité se calcule avec les données de densité apparente et de densité réelle, mesurée. Dans le cadre de cette enquête, les valeurs des densités réelles du sol se sont révélées suffisamment proches les unes des autres pour permettre l'utilisation directe des valeurs de densités apparentes, sans aller jusqu'au calcul de la porosité totale.

DIFFERENTS TYPES DE DEFORMATION

Lorsqu'on applique des pressions croissantes à la surface d'un sol, il peut se produire successivement ou simultanément, et selon les caractéristiques du couple "constitution - humidité du matériau" les types de déformations suivantes :

- un tassement dit structural se traduisant par une diminution ou une disparition totale de la porosité structurale
- une coalescence, c'est à dire la soudure les unes aux autres des mottes initialement individualisées
- un tassement dit textural (ou compaction proprement dite) consécutif à une altération de l'assemblage élémentaire qui devient plus dense.

C'est l'existence et l'ampleur de ces trois types de déformations que les observations et mesures effectuées sur le terrain et au laboratoire ont pour but de mettre en évidence.

Par ailleurs, regardé en surface, le terrain porte, sous forme d'ornières de formes et de dimensions variables, des traces des déformations qu'il a subies. La caractérisation de ces traces est un autre objectif des mesures, effectuées sur le terrain.

EVALUATION DU COMPORTEMENT DES MATERIAUX

Enfin, d'autres mesures ont pour objet non plus de caractériser un état de déformation mais d'évaluer le comportement des différents matériaux vis à vis des actions mécaniques de dégradation et vis à

vis des actions climatiques ou mécaniques mises en oeuvre dans les techniques de remise en état.

CATALOGUE DES OBSERVATIONS ET MESURES EFFECTUEES

- (1) - Caractérisation de la constitution physique du matériau et ses conséquences directes
 - analyse granulométrique
 - dosage des matières organiques totales
 - calcaire
 - capacité d'échange en m. e. % (caractéristique des propriétés physicochimiques du complexe argile-humus).
 - humidité équivalente (évaluation de l'humidité d'équilibre du sol au champ : après la fin du drainage avant toute évaporation).
 - porosité texturale (correspondant à l'architecture normale de l'assemblage élémentaire d'un matériau donné).
- (2) - Etude des déformations au champ
 - Examen qualitatif du profil de sol pour, en particulier, déterminer les couches sur lesquelles doivent porter les mesures).
 - Mesure par aspérimétrie des déformations de la surface du terrain
 - Mesure du tassement global par densitométrie à membrane
 - Mesure du tassement textural par porosimétrie sur molettes
 - Evaluation de la coalescence par granulométrie des éléments structuraux.
- (3) - Etude du comportement des matériaux
 - Comportement structural : test de fissuration de TRI destiné à mettre en évidence les possibilités de régénération de la structure sous l'influence des facteurs climatiques.
 - Evaluation de la compactabilité texturale par test Proctor
 - Mesure des caractéristiques mécaniques de base du matériau, cohésion et angle de frottement interne par essais triaxiaux.

A. - CARACTERISATION DE L'ETAT PHYSIQUE

I. - Observation du profil cultural

1 - Choix des points d'observation

Dans l'ensemble des chantiers étudiés, les observations sont conduites à partir de tranchées ouvertes sur l'axe principal de circulation en plein champ, du pylone à la route, marqué par la présence d'ornières.

A chaque observation "chantier" est associée une observation témoin "hors chantier" effectuée dans une fosse ouverte à proximité.

Dans certains cas, des fosses sont également ouvertes sur l'anneau de circulation entourant le pylone, qui présente parfois l'aspect d'une piste plane sans ornière.

En ce qui concerne les chantiers "anciens" correspondant à des pylones mis en place, depuis plus de six mois, les indications de l'exploitant ont toujours permis de situer avec précision l'ancienne piste d'accès au pylone.

2 - Exemples de profils caractéristiques rencontrés

a) - Ornière récente

La photographie 1 illustre, dans le cas d'un limon argileux (chantier 20) un aspect typique de l'orientation des couches de sol consécutive à la création de l'ornière. On distingue ici dans l'axe de l'ornière, les zones à feuilletage fin puis grossier. Dans ce niveau, apparaissent fréquemment des éléments structuraux nuciformes à faces conchoïdales.

Ces zones reposent sur une couche de matériau d'aspect gâché à structure continue, glâysifié ou réoxydée. Cette couche, qui peut atteindre une vingtaine de centimètres d'épaisseur, paraît caractéristique des chantiers développés sur sols limoneux du Bassin Parisien.

Latéralement, le coeur du bourelet présente une structure massive à très grosses mottes.

L'ensemble passe progressivement en profondeur à un sous-sol d'aspect normal.



1 - Ornière dans un sol de limon-argileux.

b) - Tassement superficiel

La photographie 2 présente un autre aspect du même matériau, observé cette fois dans l'anneau de circulation (chantier 37).

A la couche de surface, se partageant en blocs compacts, fait suite un matériau à structure continue, noyant par place des éléments structuraux grossiers.

L'ensemble passe graduellement en profondeur à la structure mie de pain classique dans les sous-sols de ces terrains.



2 - Un aspect du même matériau sous l'anneau de circulation

c) - Tassement enfoui

Les photographies suivantes (chantier 32) permettent de confronter les profils chantier (3) et hors chantier (4) pour un pylône réalisé depuis dix mois, sur un sol de limon.

Il apparaît nettement en 3, sous les vingt centimètres de sol remis en état, un ensemble de couches compactes à feuilletage grossier, sur lesquelles s'étendent, sans les pénétrer les racines du blé mis en place.

Le témoin (4) présente au contraire sur l'ensemble du profil une structure polyédrique moyenne et un très bon enracinement.



3 - Chantier ancien remis en état superficiellement.



4 - Témoin

d) - Profil non perturbé

Les photographies 5 et 6 illustrent respectivement l'aspect des profils chantier et hors chantier dans le cas d'un pylone mis en place depuis plus d'un an sur un sol limono-argileux, donc plus riche en argile que les précédents.

Les profils sont ici peu différents. Les mesures feront apparaître un tassement structural sous chantier sans aucune compaction.

L'examen des différents profils a essentiellement permis de localiser les niveaux individualisés dans les sols sous chantier et les couches correspondantes dans les profils témoins. Sur ces différents niveaux ont été effectués les mesures et les prélèvements permettant de caractériser le matériau et de quantifier son état physique au moment de l'observation.

Par ailleurs, l'aspect superficiel du sol a fait en soi l'objet de mesures dont nous allons présenter maintenant le principe et les résultats.



5 - Chantier



6 - Hors chantier

II - Asperimétrie

1. - Principe de la mesure

La présence d'une ornière traduit de façon complexe les réactions du sol aux pressions développées par le passage des engins de chantier.

La mesure de cette déformation s'effectue avec un asperimètre (voir description en annexe).

Lors de la mesure, l'appareil est mis en place en partie sur l'ornière, en partie sur la zone hors chantier, la base des tiges reposant sur le sol.

Ainsi qu'on peut l'observer sur la photographie 7, les sommets de l'ensemble des tiges matérialisent d'une part le relief propre à l'ornière, d'autre part, le niveau du sol dans la partie hors chantier.

Une photographie du dispositif mis en place permet d'enregistrer simultanément l'ensemble des données.

Le traitement s'effectue sur agrandissement. Dans les parties hors chantier, la mesure des longueurs de chaque tige permet de définir la cote moyenne du sol. Par rapport à cette cote, des mesures de longueur ou de surface dans la partie chantier vont permettre d'établir les caractéristiques de l'ornière, ramenées en grandeurs vraies en tenant compte du rapport d'agrandissement.

2) - Caractéristiques de l'ornière

Nous avons tout d'abord défini deux caractéristiques de profondeurs qui correspondent en fait aux valeurs extrêmes qu'un observateur pourrait obtenir en utilisant le seul mètre sur le terrain. Ce sont :

- la profondeur réelle de l'ornière l_r , distance du fond de l'ornière au niveau moyen du sol
- la profondeur apparente de l'ornière l_a , distance du fond de l'ornière au sommet du bourelet le plus élevé.

Deux autres caractéristiques ont été encore élaborées pour rendre compte du résultat global de l'effort subi par le sol. Il s'agit du tassement T , et de la déformation).

Les données nécessaires à leur établissement sont obtenues en mesurant la surface S^+ de bourelet située au dessus du niveau moyen du sol, la surface S^- d'ornière, située au dessous du niveau moyen du sol et la longueur totale L , affectés par la déformation du sol (ornière et bourelet).

Le tassement résultant du sol est exprimé par la somme algébrique des rapports S^+ / L et S^- / L qui représentent respectivement une remontée et un abaissement de la cote du sol par

rapport à la cote moyenne déjà définie. L'expression de T est alors :

$$T = \frac{S^+ + S^-}{L}$$

Enfin, la déformation due au déplacement du matériau qu'il s'agisse de bouelet ou d'ornière est exprimée par la somme des valeurs absolues des rapports S^+ / L et S^- / L .

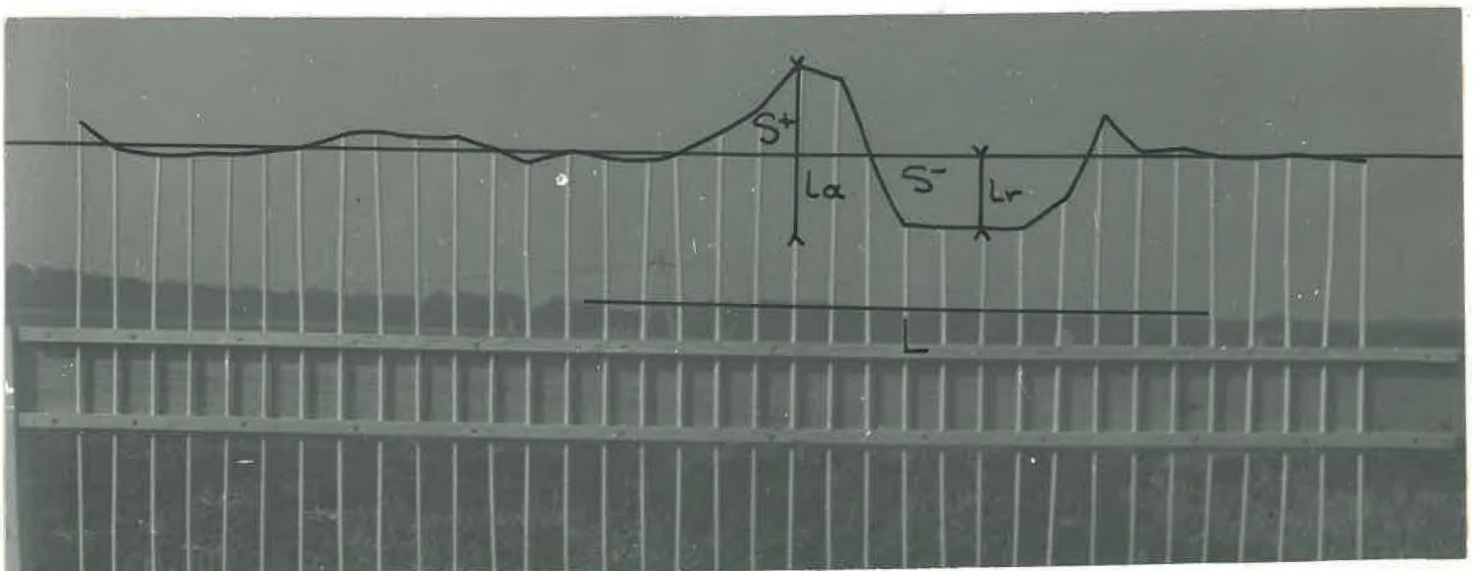
$$D = \frac{|S^+| + |S^-|}{L}$$

3) - Les classes d'ornières

Compte-tenu des données ainsi obtenues, les différentes ornières observées peuvent être regroupées en deux classes sur le critère d'absence ou de présence du tassement.

a) - Les ornières sans tassement.

Morphologiquement, il s'agit toujours d'ornières présentant des bouelels latéraux. Mais, les surfaces S^+ sont en valeur absolue égales aux surfaces S^- . Le tassement T est alors nul, la déformation D est importante, la profondeur apparente peut-être double de la profondeur réelle. Un exemple est fourni par la photographie 7.



7 - Chantier n° 12

$$T = 0,7 \text{ cm} \quad D = 4,8 \text{ cm} \quad L_r = 10,5 \text{ cm} \quad L_a = 21 \text{ cm}$$

Ces ornières peuvent se rencontrer sur les sols argileux humides, ou sur des chantiers établis pendant une période où le sol était saturé en eau.

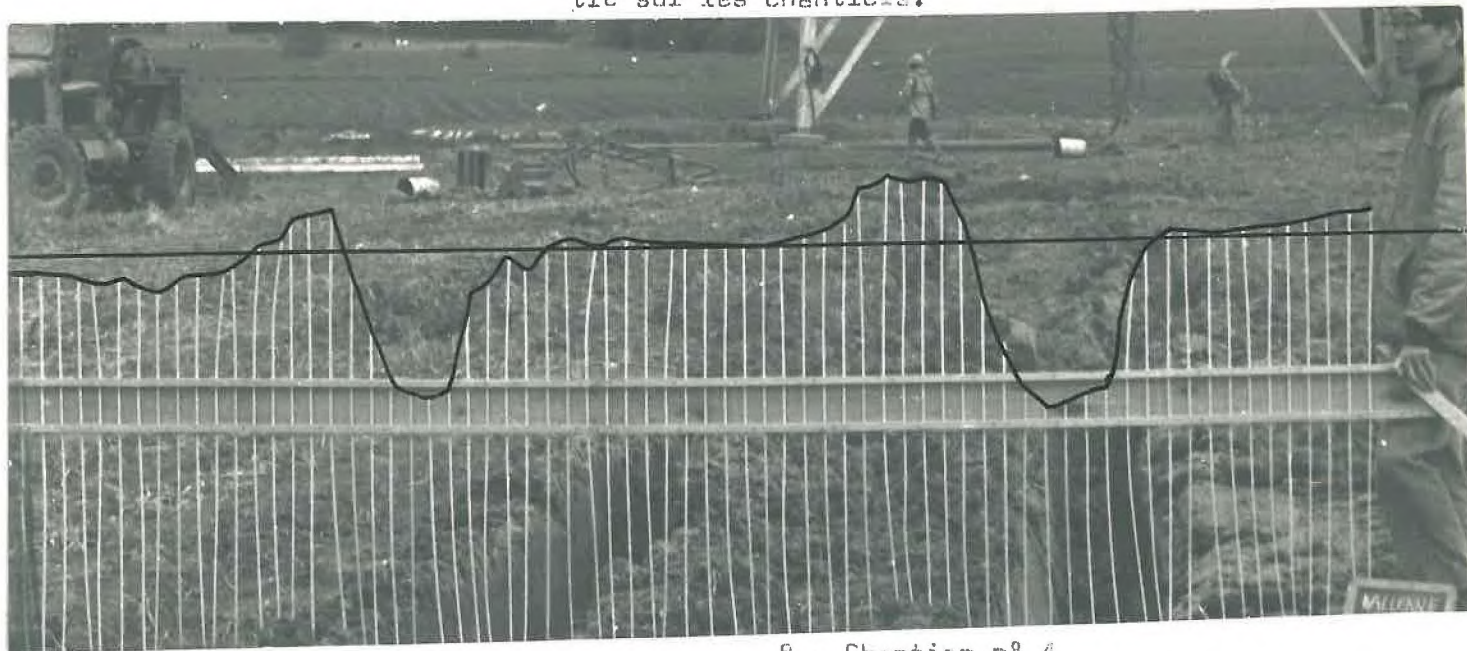
b) - Les ornières avec tassement

. Ornière avec bourelet

Dans le cas d'ornière présentant encore des bourelets, latéraux, il y aura tassement chaque fois que les valeurs S^+ seront, en valeurs absolues, inférieures aux valeurs S^- .

C'est le cas de l'ornière présentée sur la photographie 8 où tassement et déformation ont des valeurs importantes, la déformation restant supérieure au tassement. Les profondeurs apparentes sont sensiblement plus fortes que les profondeurs réelles.

Ce type d'ornière est, de fait, le plus souvent rencontré sur les chantiers.



8 - Chantier n° 4

$T = -9,4 \text{ cm}$ $D = 16,1 \text{ cm}$ $L_x = 42,5 \text{ cm}$ $l_a = 50 \text{ cm}$

. Ornière sans bourelet

Deux exemples en sont fournis avec les photographies 9 et 10.

Dans la première, la partie gauche, zone hors chantier présente un relief lié au passage d'un outil de travail du sol. Sur la partie droite, les mesures aboutissent à des valeurs de S^+ négligeables devant celles de S^- .



9 - Chantier n° 15

$$T = - 2,9 \text{ cm} \quad D = 3 \text{ cm} \quad l_x = 1,2 \text{ cm} \quad l_a = 1,6 \text{ cm}$$

La seconde montre qu'un même type d'ornière, très élargie, peut résulter du passage de plusieurs engins.



10 - Chantier n° 11

$$T = - 3,7 \text{ cm} \quad D = 3,7 \text{ cm} \quad l_x = 8 \text{ cm} \quad l_a = 8 \text{ cm}$$

Pour ces ornières, la déformation est peu différente du tassement, en valeur absolue, et la profondeur réelle se confond avec la profondeur apparente.

De telles ornières s'observent en condition d'humidité moyenne du sol, dans le cas de matériaux à tendance sableuse, pauvre en argile ou bien encore dans le cas de sols récemment travaillés.

4) - Etude des relations entre les caractéristiques d'ornière

a) - Relation déformation - tassement

L'ensemble des résultats obtenus, qui intéressent les seuls chantiers récents, sont présentés sur le graphique I.

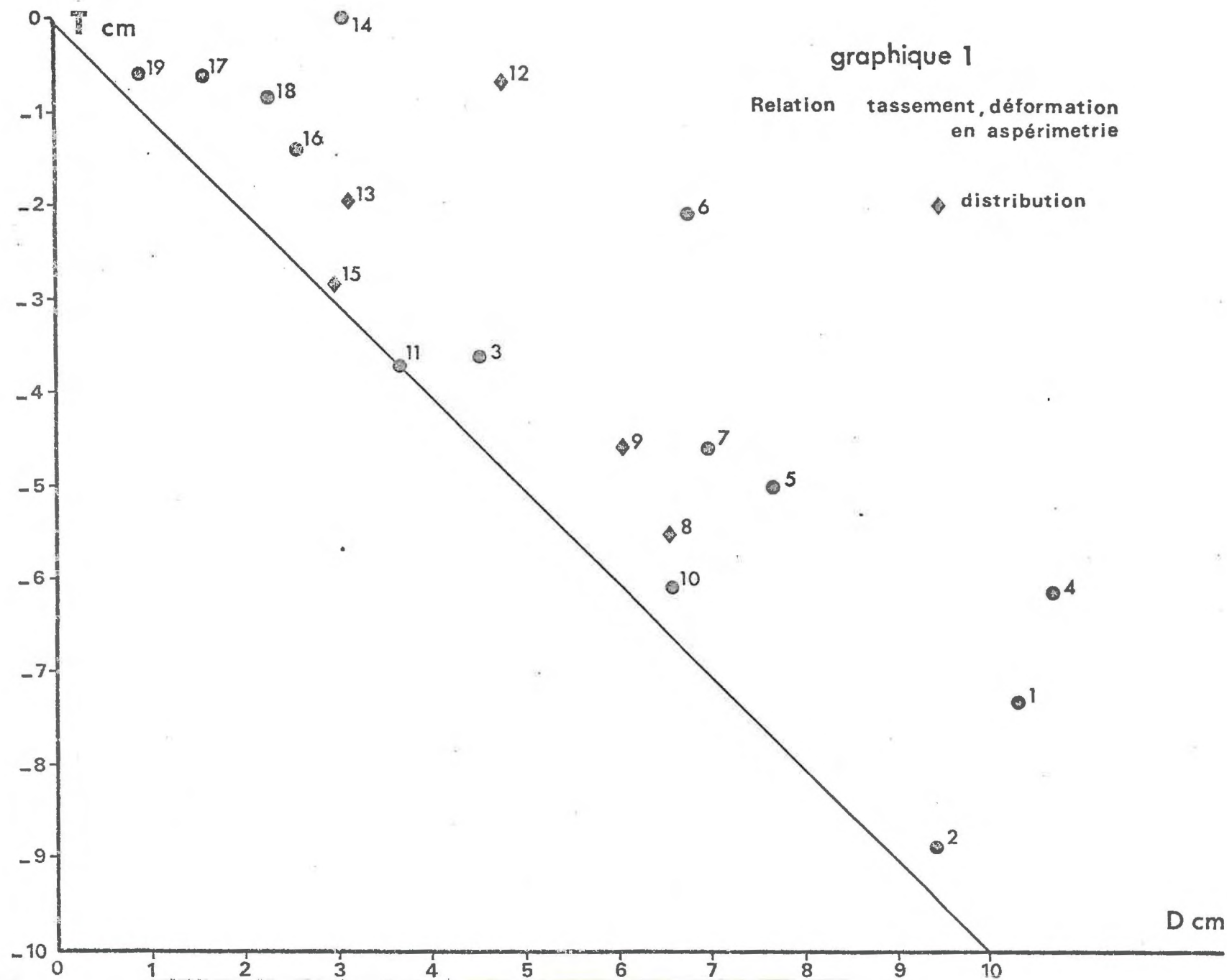
On constate qu'il n'y a pas indépendance entre les variables, déformation - tassement, les ornières sans tassement ne représentant que 10 % des cas observés.

Le calcul donne un coefficient de corrélation significatif $r = - 0,89$ pour 19 chantiers traités. Il apparaît de plus que le tassement en valeur absolue est dans le cas général inférieur à la déformation, les ornières à bourelot et tassement étant les plus fréquentes (plus de 60 % des cas).

Par ailleurs, les ornières de chantier de distribution ne se distinguent pas, à ce niveau d'analyse, des ornières de chantier de transport.

b) - Relation avec les profondeurs d'ornière

Le calcul du degré de liaison entre les différentes caractéristiques de l'ornière a donné les résultats suivants :



RELATION TESTEE	COEFFICIENT DE CORRELATION r
Déformation/Profondeur apparente	0,94 Significatif
Déformation/Profondeur réelle	0,94 Significatif
Tassement/ Profondeur réelle	- 0,75 Significatif
Tassement/ Profondeur apparente	- 0,73 Significatif

c) - Conclusions

En se plaçant tout d'abord du point de vue de la mesure de profondeur d'ornière, telle qu'elle pourrait être effectuée directement sur le terrain, il ressort de l'observation des résultats que c'est la déformation globale qui est de loin la mieux prise en compte par cette mesure.

Si la présence d'une ornière implique en général un tassement du sol décelable par aspérimétrie, il n'est pas possible, par contre, de prédire à partir des seules valeurs de T s'il s'agit d'un seul tassement structural ou s'il y a eu également tassement textural, aboutissant à un rapprochement des particules élémentaires constitutives du sol.

C'est la seconde hypothèse qui apparaît comme la plus dommageable pour le sol et seules les mesures de densités apparente permettent de résoudre le problème.

III - INTERPRETATION DES MESURES DE DENSITÉ APPARENTE : tassement global tassement textural.

L'état physique d'un sol peut être défini au moyen de la détermination de la densité apparente du matériau en place.

Cette densité peut-être appréciée à différents niveaux : agrégats, mottes, volume important de sol.

La confrontation des données chantier et hors chantier permet alors de définir les modifications relatives de densité apparente enregistrées par le sol sous chantier.

Nous allons envisager, dans un premier temps, les résultats obtenus sur des volumes importants de matériaux, qui intègrent des effets de tassement structural et textural à une échelle comparable à celle de l'aspérimétrie. L'appareil utilisé pour les mesures est un densitomètre à membrane dont le principe est exposé en annexe.

1) - Indice de tassement global T G

Considérons une même couche de matériau sous chantier et hors chantier. Les densités apparentes mesurées sont représentées respectivement par γ_c et γ_h .

La variation relative de densité apparente est représentée par le rapport :

$$\frac{\gamma_h - \gamma_c}{\gamma_h}$$

La densité apparente hors chantier étant prise comme référence.

Cette variation intéresse une couche de matériau dont l'épaisseur observée sous chantier est de e . Quand il y a tassement, cette épaisseur est inférieure à l'épaisseur e' présente par la même couche avant le chantier.

Nous appellerons T G la différence entre ces deux grandeurs que nous prendrons comme indice de tassement global :

$$T G = e' - e$$

Si l'on admet que le déplacement latéral du matériau sous l'effet d'une charge est négligeable au delà de la longueur L définie par aspérimétrie, T G s'exprime par la relation qui suit :

$$T G = e \frac{\gamma_c - \gamma_h}{\gamma_h}$$

Pour n couches d'épaisseurs e_1 ; e_2 ; e_n , l'expression de l'indice de tassement global est alors :

$$T G = e_1 \frac{\gamma_{c1} - \gamma_{h1}}{\gamma_{h1}} + e_2 \frac{\gamma_{c2} - \gamma_{h2}}{\gamma_{h2}} + \dots + e_n \frac{\gamma_{cn} - \gamma_{hn}}{\gamma_{hn}}$$

Cet indice T G a donc la même signification que l'indice T calculé par aspérinètrie et s'exprime dans les mêmes unités, soit le centimètre.

Le tableau 1 rassemble ces résultats, groupés par grandes classes de chantiers.

On constate tout d'abord qu'il y a en général tassement (96 % des cas). Il ressort également que les valeurs les plus élevées de T G se rencontrent dans les chantiers de transport, qui se différencient ici nettement des chantiers de distribution.

Par rapport aux autres chantiers, les chantiers anciens de transport montrent une gamme beaucoup plus étendue de valeurs de T.G.

CHANTIERS RECENTS				CHANTIERS ANCIENS		
DISTRIBUTION		TRANSPORT		TRANSPORT		
Chantier n°	T G cm	Chantier n°	T G cm	Chantier n°	T G cm	
12	0,20	6	2,67	27	2,98	
15	0,60	5	1,77	32	4,79	
13	1,81	4	6,08	33	4,83	
22	1,80	20	3,86	34	1,70	
23	1,72	2	1,63	35	4,27	
9	1,09	7	3,89	25	0,37	
		10	4,25	16	0,90	
		3	1,43	36	14,88	
		1	3,39			
		17	2,32			
MOYENNES	1,20		3,12		4,25	

TABIEAU 1 - Tassement global déduit des valeurs de densité apparente de terrain mesurées au densitomètre.

2) - Epaisseur totale déformée : E

Considérons maintenant compte non tenu des réactions différentes des terres au cours des passages de véhicules, l'épaisseur totale des couches déformées.

Il s'agit sous chantier, de l'épaisseur totale de matériau pour lequel par rapport au ^{terrain} ~~terrain~~, un effet de tassement est mis en évidence au niveau des densités apparentes mesurées au densitomètre. Le graphique II où les densités sont regroupées par classe d'épaisseur ne fait pas ressortir de différence entre les chantiers de distribution et les chantiers de transport.

Nous noterons toutefois que les chantiers de transport, présentent des niveaux ayant subi un tassement sur 30 cm à 50 cm dans une proportion plus forte que les chantiers de distribution.

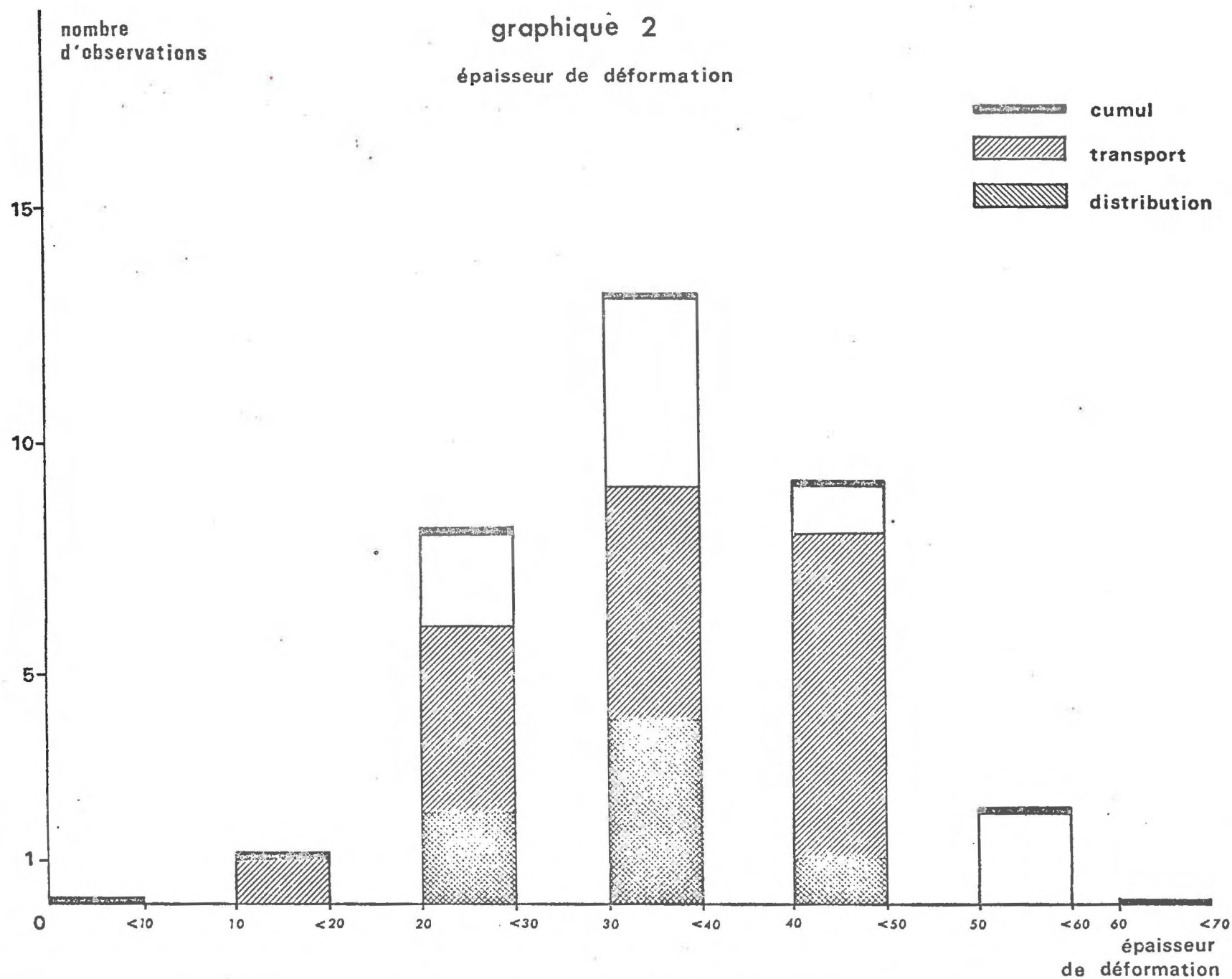
3) - Relation entre les caractéristiques d'ornières et l'indice de tassement global T G

a) - Relation T G / T

Le graphique III où sont comparés les indices de tassement T G et T, l'un étant obtenu par aspérimétrie, l'autre par densitométrie, montre qu'il existe une relation entre ces deux indices et ceci bien qu'ils aient été obtenus par la mise en oeuvre de méthodes et de techniques tout à fait différentes.

Pour 14 chantiers, dont 4 de distribution, la corrélation entre T G et T est significative, le coefficient étant de $r = 0,63$

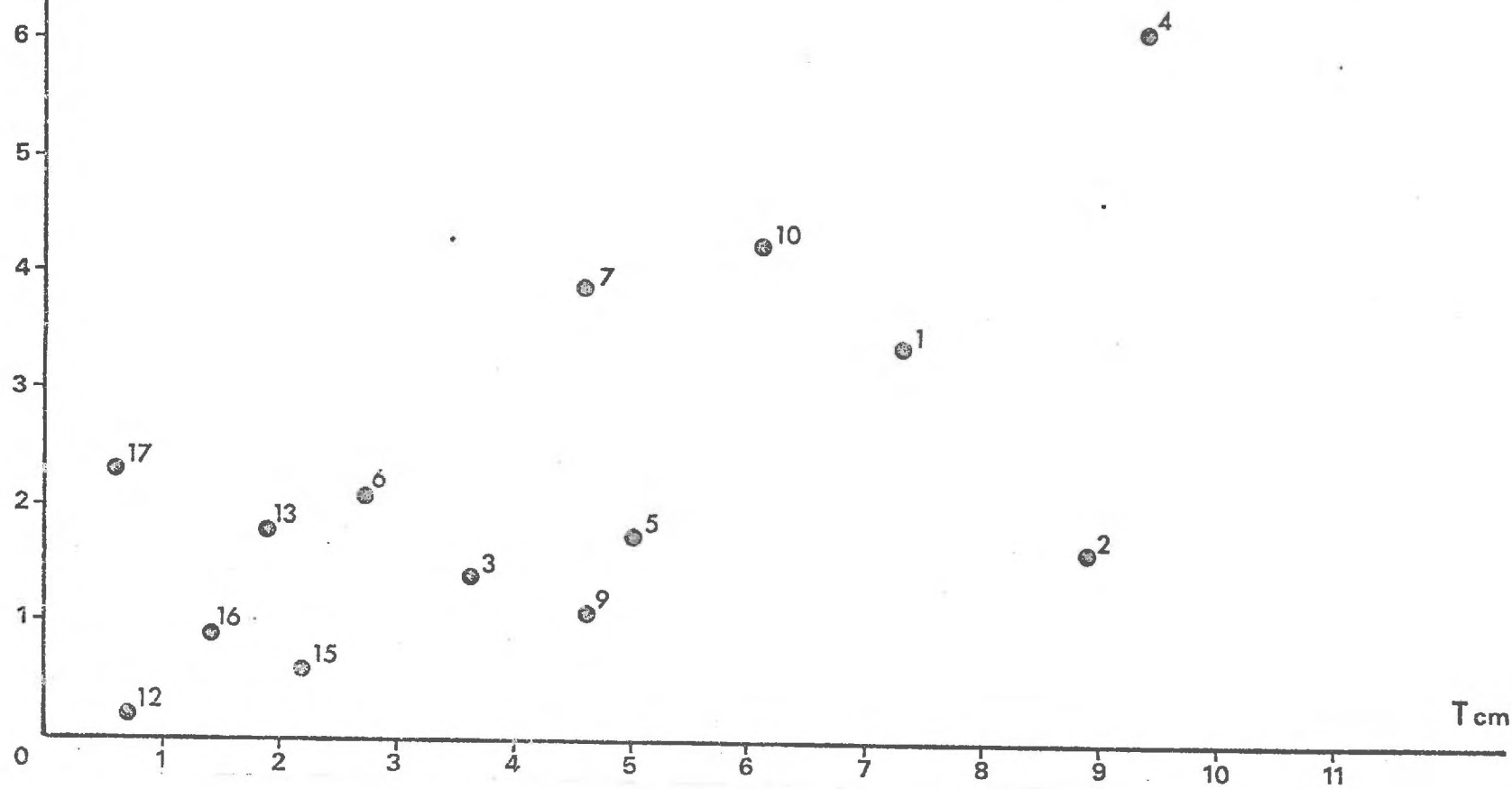
On constate encore sur ce graphique que les valeurs de T sont très généralement supérieures à celles de T G, cet écart étant vraisemblablement lié à la spécificité de chacune des méthodes de mesure.



TG cm

graphique 3

Relation tassement densitomètre TG , tassement aspérimétrie T



b) - Autres relations

Les autres relations testées ont fourni les résultats suivants :

RELATION TESTEE	COEFFICIENT DE CORRELATION r
T G / Déformation D	0,73 Significatif
E / Déformation D	0,62 Significatif
T G / E	0,53 Non significatif

L'absence de liaison statistiquement significative entre T G et E, a priori étonnante, fait bien ressortir le caractère non univoque de l'indice de tassement global, une valeur élevée de T G pouvant être aussi bien le fait du compactage d'une mince couche de terre ou du tassement uniquement structural d'une couche épaisse de même matériau.

On constate enfin que la liaison T G / D est encore meilleure que la liaison T G / T et qu'il y a d'autre part une liaison lâche mais significative cette fois-ci entre D et E.

4) - Etude du tassement textural

Le chapitre qui suit traite des données concernant la densité apparente de petits volumes de terre constituant sur le terrain des ensembles cohérents (mottes) prélevés dans les différents niveaux dont nous venons d'étudier le tassement global.

Ces mottes peuvent elles mêmes comprendre ou non un réseau de fissures qui sont révélées physiquement lors du test de TRI. Cet aspect particulier qui concerne la potentialité de récupération du matériau sera abordé ultérieurement.

Nous rappelons à nouveau qu'il y a tassement textural quand les éléments constitutifs du matériau sont eux-mêmes

rapprochés les uns des autres. L'évaluation d'un tel tassement textural implique l'existence d'une donnée de référence, la densité texturale, qui ne dépend que de la distribution granulométrique du matériau et dont la mesure est présentée en annexe.

a) -- Définition des indices de tassement textural

Le tassement textural sous chantier, T_{ec} , est défini par la relation suivante :

$$T_{ec} = \left(1 - \frac{\gamma_t}{\gamma_{cm}}\right) 100 \dots\dots\dots(a)$$

où γ_t représente la densité texturale, γ_{cm} la densité apparente mottière sous chantier pour un même niveau et un même état d'hydratation.

Cet indice ne tient pas compte de l'état physique du matériau hors chantier. Or, il est possible et nous l'avons souvent constaté, que l'ensemble des travaux culturaux effectués par l'agriculteur induise un certain état de compacité du sol, avant même la mise en place du pylône. Nous avons donc également défini un indice de tassement textural hors chantier, T_{eh} , qui s'exprime comme le précédent :

$$T_{eh} = \left(1 - \frac{\gamma_t}{\gamma_{hm}}\right) 100$$

La densité des mottes hors chantier étant représentée ici par γ_{hm} .

TABLEAU II - Indices de tesséments texturaux

Le tableau II permet de comparer les valeurs de T_{ac} et de T_{ch} .

On constate tout d'abord que sur 36 chantiers, 4 présentent une valeur de T_{ec} nulle. Pour les autres, les valeurs sont toujours positives, ce qui traduit donc un état de compaction.

Par contre, les valeurs de T_{eh} présentent une plus grande variété de cas. Pour l'ensemble de 36 zones hors chantier, 3 présentent une densité nette égale à la densité texturale ($T_{eh} = 0$), 12 présentent un T_{eh} négatif, qui traduit la pré-

sence de fissures intra-mottières, 21 présentent des Teh positifs, donc un certain état de compacité plus ou moins poussé.

Pour tenir compte d'un effet de compaction indépendant des conditions de chantier et qui intervient dans trois cas sur 5 nous avons défini un indice de tassement textural corrigé, dont le calcul obéit à la règle suivante : chaque fois que la valeur de γ_{hm} est telle que: $\gamma_{hm} > \gamma_t$

on remplace dans la relation (a) γ_t par la valeur mesurée de γ_{hm} .

On obtient alors :

$$\text{Tec corrigé} = \left(1 - \frac{\gamma_{hm}}{\gamma_c}\right) 100 \dots (a')$$

Les valeurs ainsi obtenues (tableau III) restent encore dans leur grande majorité positives, et varient entre 0 et 15 %.

Il y a disparition de la compaction imputable au chantier dans 4 cas sur les 21 où la correction est nécessaire.

On constate encore que les valeurs de Tec les plus élevées se rencontrent sur les chantiers de transport avec une tendance à une compacité plus forte sur les chantiers récents.

A nouveau, les chantiers de distribution se distinguent de l'ensemble par une compaction généralement moins importante.

c) - Relation tassement - compaction

La recherche de liaisons entre Tec d'une part, T G, T et D d'autre part, conduit aux résultats suivants :

RELATION TESTEE	COEFFICIENT DE CORRELATION r
Tec / T	- 0,20 non significatif
Tec / T G	0,27 non significatif
Tec / D	0,32 non significatif

Les coefficients de corrélation sont à la fois faibles et non significatifs. Ceci démontre la grande indépendance entre un tassement et le résultat de ce tassement au niveau de la compaction du matériau.

d) - Conclusion

Une mesure de tassement, conduite par aspérimétrie ou densitométrie ne saurait permettre la prévision du degré de tassement textural du sol.

Les résultats obtenus soulignent les limites à l'utilisation de l'aspérimétrie dans cette étude et démontrent que la seule prise en compte des caractéristiques d'origine ne saurait à elle seule constituer une base suffisante pour juger des véritables dégâts causés au sol sous les chantiers.

B. - ETUDE DU COMPORTEMENT DES MATERIAUX EN CONDITION STANDART DE LABORATOIRE.

Pour cette étude, nous avons sélectionné sur chaque chantier à partir des observations de profils, la couche ayant subi le dégât apparent maximal.

Cette restriction nous était dictée tout d'abord par le souci de prendre en compte le risque de dégât le plus élevé sous chantier, ensuite par l'impossibilité pratique de traiter au laboratoire avec un ensemble de méthodes laborieuses un trop grand nombre d'échantillons.

I - Essai Proctor

a) - Principe de l'essai

Pour étudier en laboratoire l'aptitude au compactage des sols naturels, la méthode de Proctor est la plus fréquemment utilisée. On trouvera en annexe une description de cette méthode.

Le principe de l'essai consiste à soumettre un matériau placé dans un moule étanche à un compactage dynamique standard, et ceci à différents états d'humidité (W) du matériau. On évalue alors la densité apparente γ_d atteinte.

$$\gamma_d = \frac{\text{poids du matériau}}{\text{volume apparent.}}$$

En général, la variation de la densité en fonction de la teneur en eau au moment du compactage est du type de celle présentée en annexe sur la figure XVII

La densité apparente passe donc par un maximum pour une certaine humidité appelée W optimum.

C'est la valeur du maximum de densité apparente que nous avons prise comme référence pour évaluer les valeurs de densité apparente enregistrées sur le terrain.

b)- Résultats

Le tableau III rassemble les données concernant 32 chantiers. Ce sont les densités apparentes γ_d à l'optimum Proctor, la teneur en eau W correspondante et la densité apparente à l'optimum Proctor γ'_d , des mêmes échantillons après séchage.

$$\gamma'_d = \frac{\text{poids sec de matériau}}{\text{volume apparent sec}}$$

Par ailleurs, sont encore portées sur le même tableau les valeurs de l'humidité équivalente H_e % obtenues après centrifugation à 1.000 g.

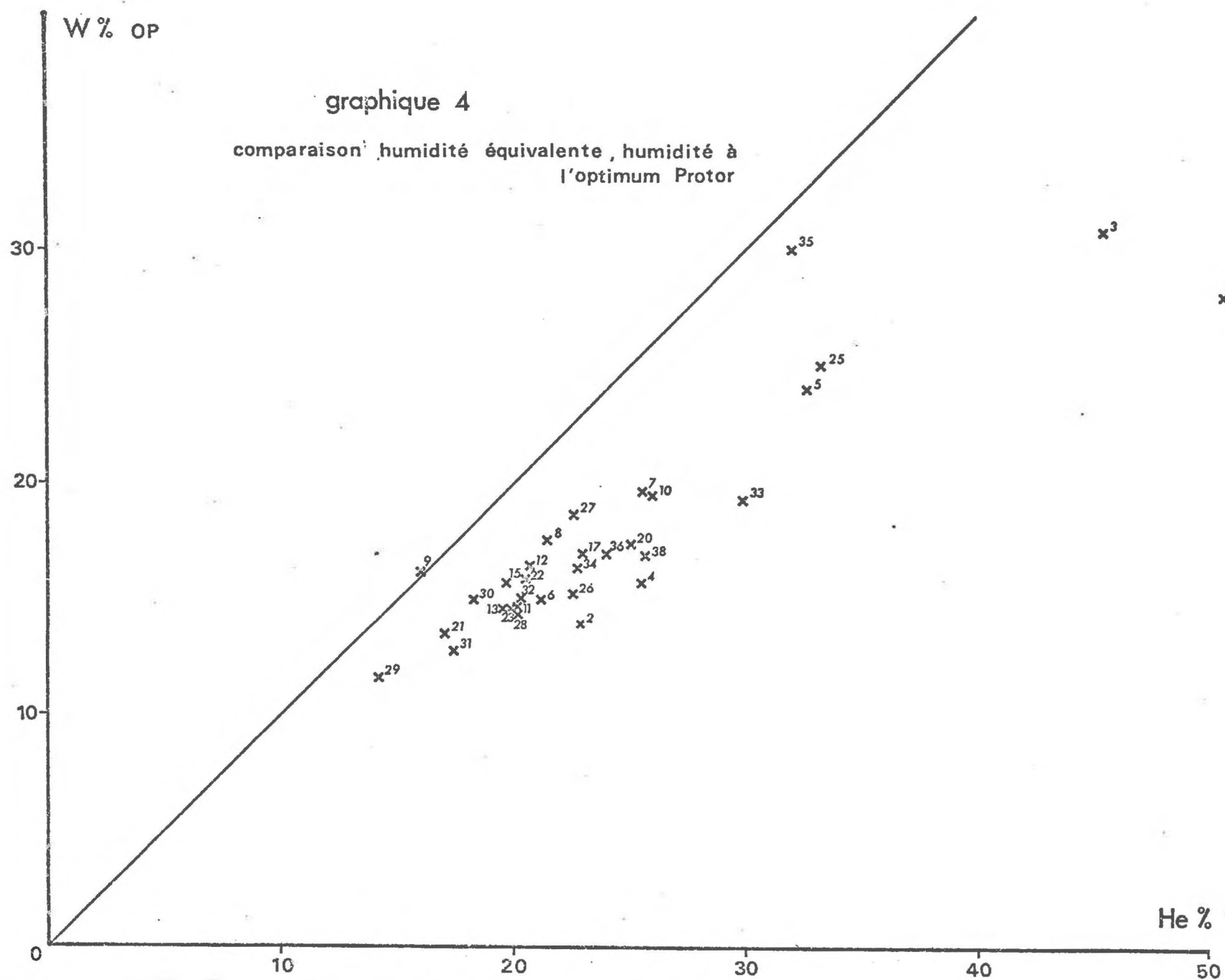
Ces données peuvent sembler concerner d'assez loin les conditions qui ont prévalu sur les chantiers. Les densités apparentes sont en effet mesurées sur un matériau qui est fretté latéralement par les parois du moule au cours de l'essai, et l'effort dynamique est appliqué sur le matériau sans que le système soit drainé.

Cependant, on peut constater sur le graphique IV qu'il n'y a pas indépendance entre l'humidité W optimum et les valeurs de l'humidité équivalente. Cette dernière, rappelons-le, étant retenue en première approximation, comme l'humidité la plus probable à laquelle se trouve le sol dans les différents chantiers.

Le coefficient de corrélation entre ces deux variables est significatif et atteint la valeur de $r = 0,87$. De plus, le choix même de ce test où est mis en jeu une énergie standard fixée à priori paraît largement justifié par le fait que, comme nous le verrons plus loin, le compactage à l'optimum proctor représente de fait un état moyen par rapport à la gamme des compactations enregistrées sous chantier (tableau IV).

n°	χ_d op	W op	He %	χ' dop	n°	χ_d op	W op	He %	χ' dop
25	1,46	25,0	33,3	1,75	2	1,74	13,9	22,9	1,77
17	1,71	17,0	23,0	1,79	6	1,75	15,0	21,2	1,77
36	1,71	17,0	24,0	1,73	8	1,66	17,6	21,5	1,69
38	1,69	16,9	25,7	1,77	22	1,68	15,9	20,5	1,70
34	1,70	16,4	22,8	1,79	13	1,71	14,5	19,6	1,72
32	1,71	15,1	20,3	1,76	9	1,66	18,2	18,0	1,71
33	1,62	19,2	29,9	1,72	15	1,70	15,7	19,7	1,72
27	1,65	18,7	22,7	1,79	12	1,72	16,5	20,7	1,75
25	1,30	30,0	32,1	1,39	23	1,71	14,5	19,6	1,73
24	1,38	28,6	50,7	1,83	26	1,67	15,2	22,6	1,69
28	1,77	14,3	20,2	1,80	29	1,84	11,6	14,3	1,85
31	1,81	12,8	17,5	1,83	30	1,72	15,0	18,3	1,73
3	1,26	30,8	45,5	1,49	10	1,62	19,5	26,0	1,73
7	1,67	19,7	25,6	1,76	21	1,74	13,5	16,1	1,75
5	1,60	24,0	32,7	1,82	11	1,79	14,7	20,2	1,82
20	1,04	17,5	25,1	1,69	4	1,71	15,7	25,5	1,82

TABLEAU III



c) - Discussion

Nous avons comparé, sur le graphique V, les densités apparentes à l'optimum Proctor, aux densités texturales obtenues sur les mêmes échantillons : ces dernières étant mesurées après séchage à 105° C nous avons donc retenu ici les valeurs de γ'_d .

On remarque qu'il existe toute une famille de matériaux (30 % des cas) pour lesquels la densité à l'optimum Proctor est égale ou inférieure à la densité texturale.

Pour ces matériaux, tout se passe comme s'ils étaient, soit non compactables dans les conditions du test, soit, du fait de leur composition granulométrique, capables de développer à la suite d'une dessiccation un réseau de fissures qui abaisse encore leur densité apparente.

(d) - Relation entre la sensibilité au compactage à l'optimum Proctor et la teneur en argile

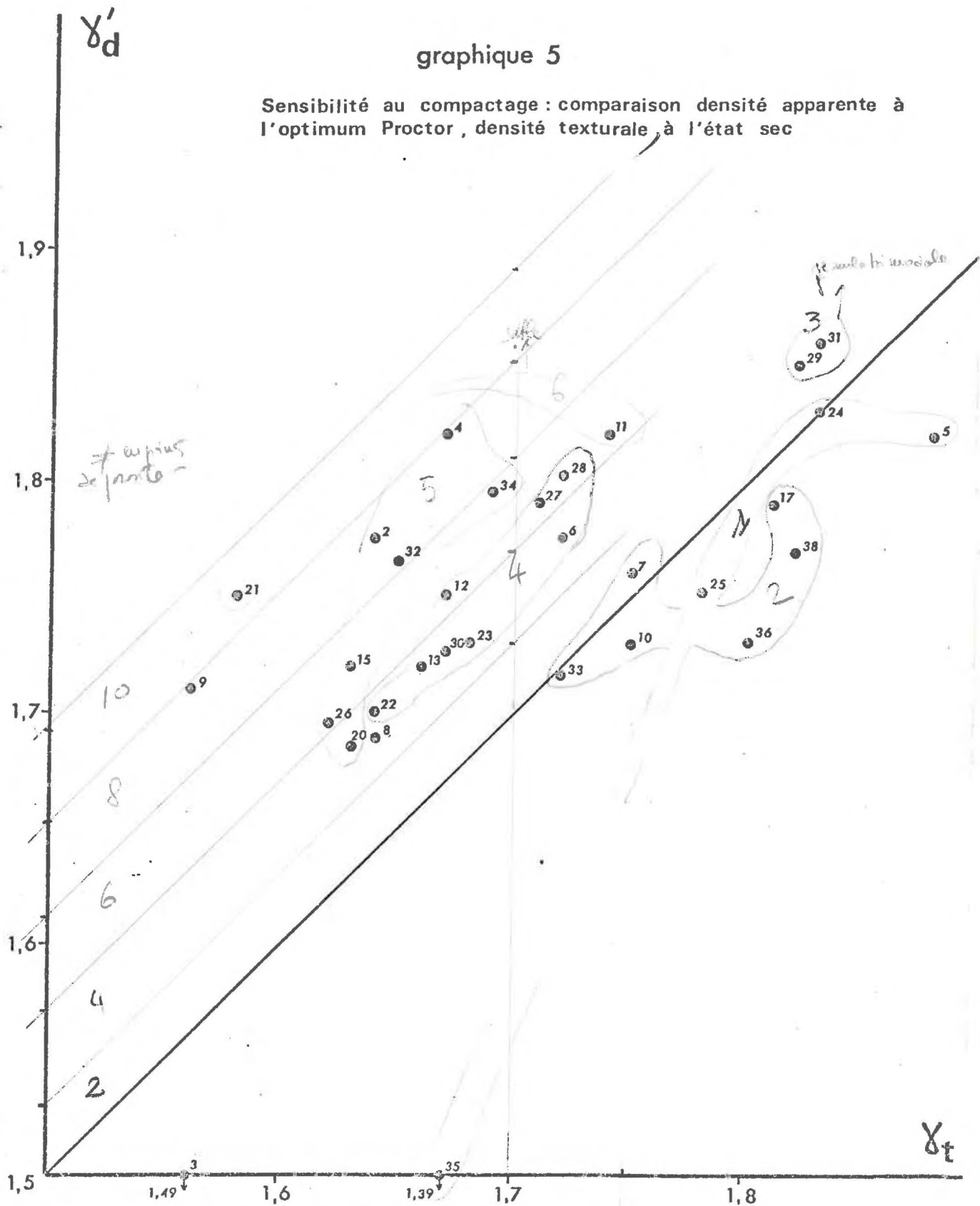
Nous avons défini comme dans les cas précédents un indice de compactage à l'optimum Proctor, Top, par rapport à la densité texturale. Sa définition est la suivante :

$$Top = (1 - \frac{\gamma'_t}{\gamma'_d}) 100$$

Nous avons porté sur le graphique 6 les variations de Top, en fonction de la teneur en argile des matériaux.

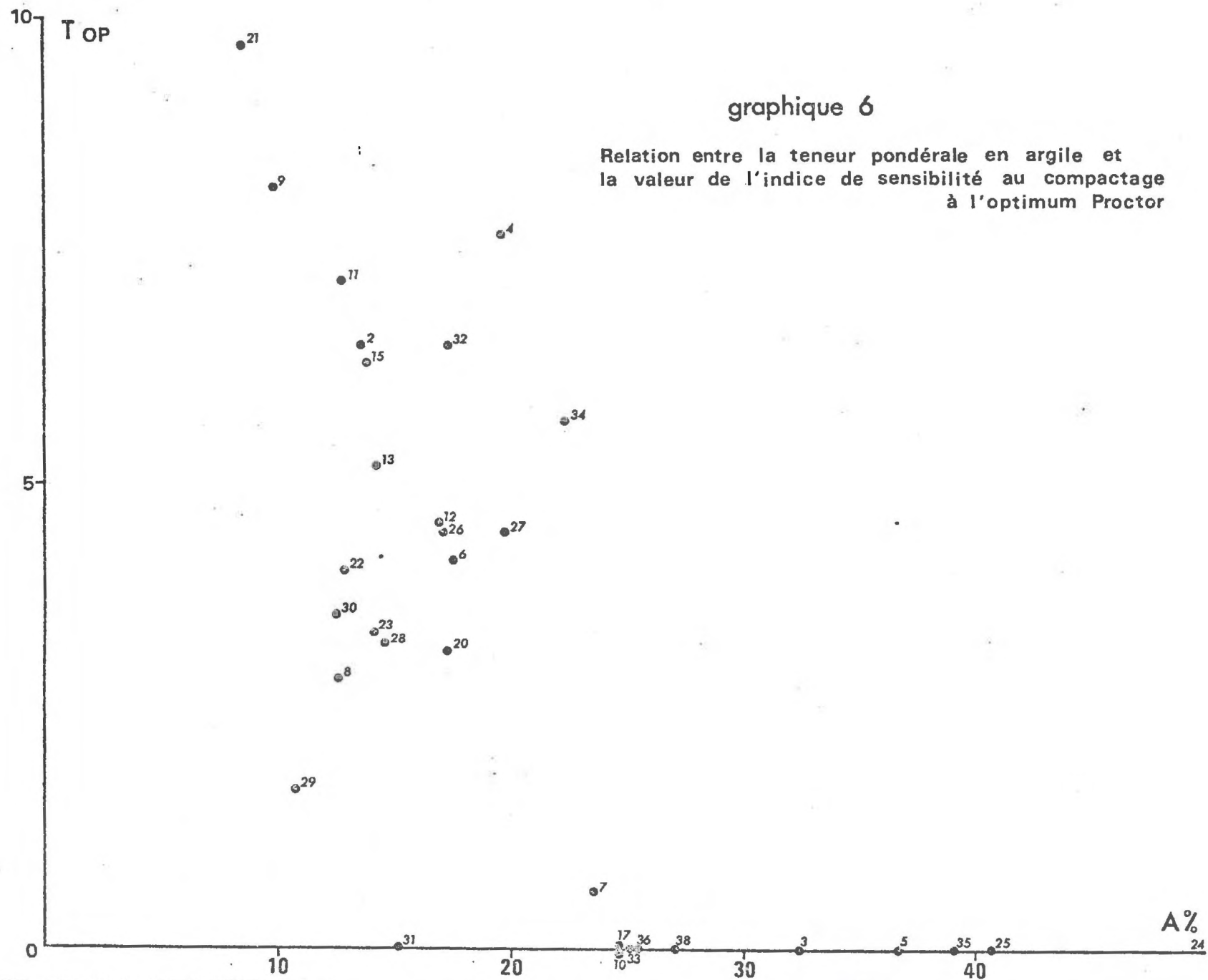
Ce faisant, nous avons considéré que l'indice Top était nul, non seulement pour les valeurs de γ'_d égales à celles de γ'_t mais aussi pour toutes les valeurs de γ'_d inférieures à γ'_t , le problème du foisonnement du matériau n'étant pas pris en compte ici.

Il ressort de l'observation de ce graphique que deux classes de comportement peuvent être mises en évidence sur la seule base de la teneur en argile. Ce sont :



graphique 6

Relation entre la teneur pondérale en argile et
la valeur de l'indice de sensibilité au compactage
à l'optimum Proctor



- Les sols non sensibles au compactage, où la teneur en argile est égale ou supérieure à 25 %
- Les sols sensibles au compactage où la teneur en argile est inférieure à 25 %. A l'intérieur de cette classe, les degrés de sensibilité apparaissent très variés et la seule teneur en argile ne rend pas compte de ces variations. Top varie ici de 0 à 10 % la valeur moyenne étant de l'ordre de 5 %.

(β). - Relation entre la sensibilité au compactage à l'optimum Proctor et les données de l'analyse granulométrique

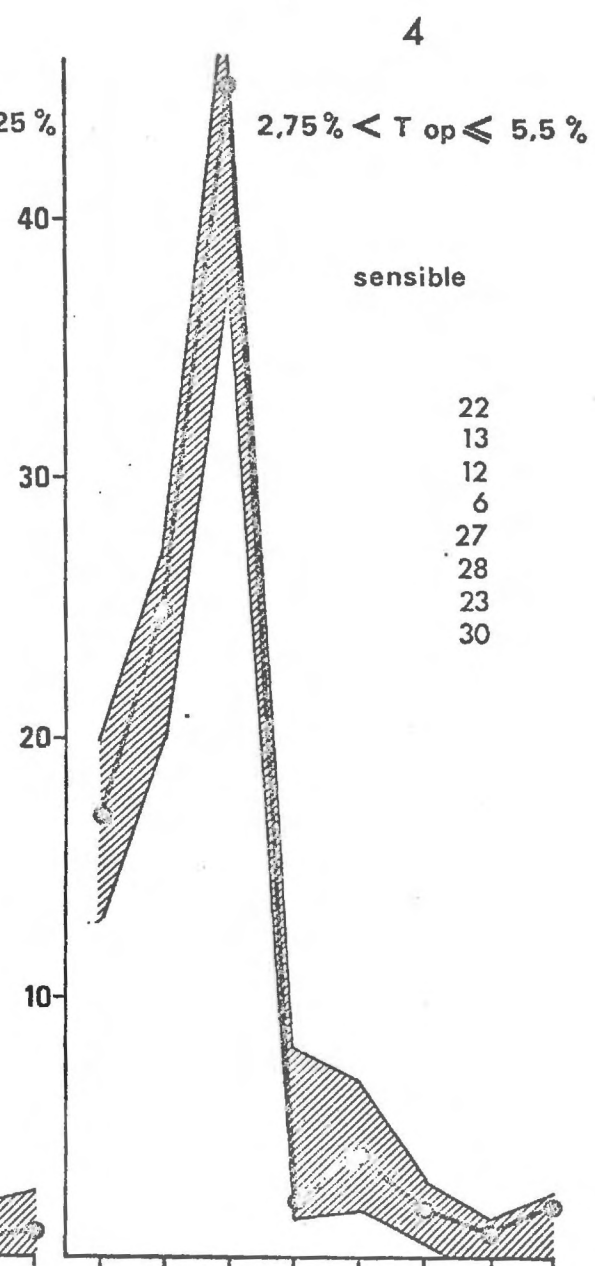
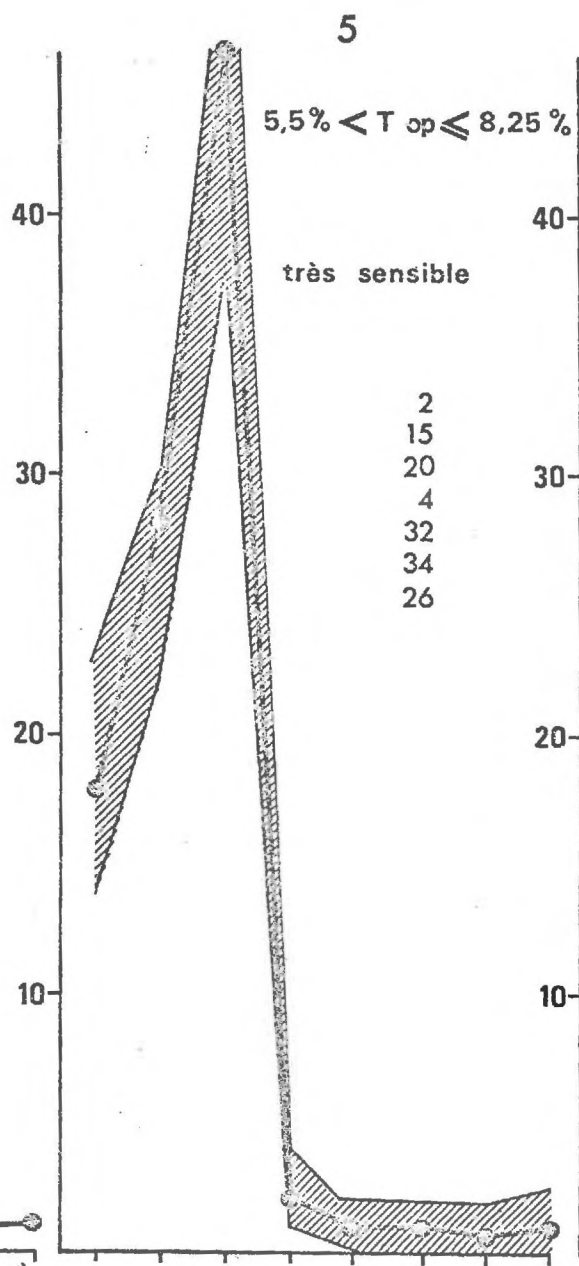
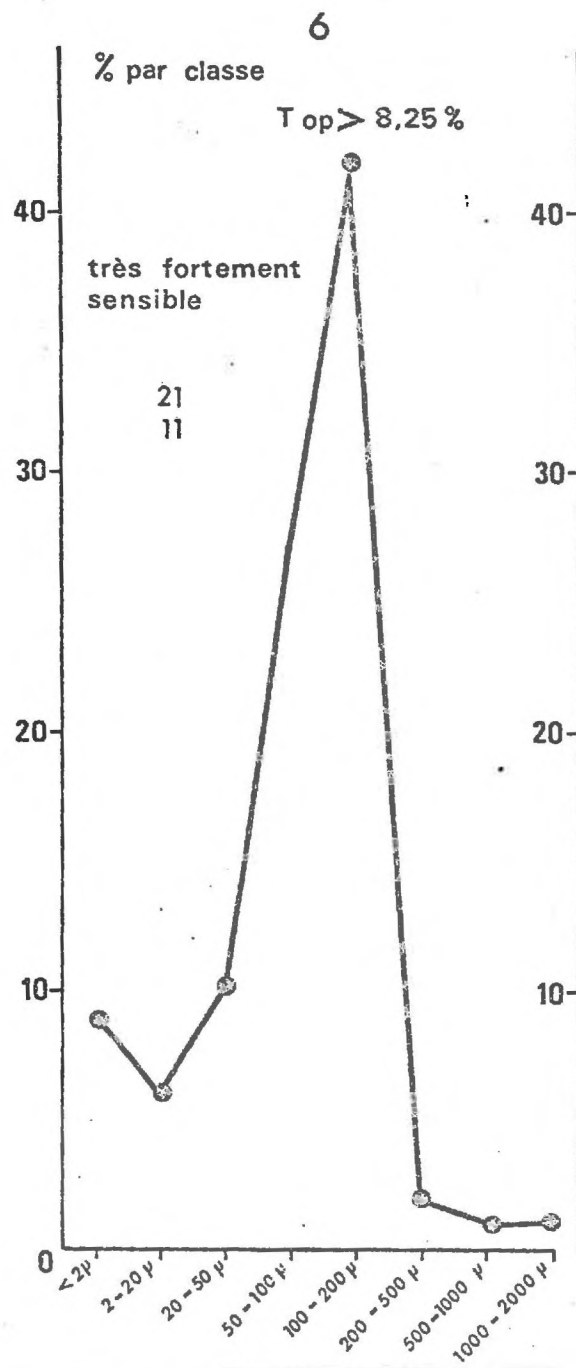
Pour chaque échantillon, nous disposons de huit chiffres caractérisant les teneurs pondérales en éléments classés par taille entre 0 et 2.000 μ .

Les données peuvent être présentées sous forme de diagrammes semblables à ceux rassemblés sur le graphique 7.

Ce type de représentation a permis de caractériser, bien plus aisément que sur des courbes cumulatives, six classes de distribution granulométrique.

On a constaté qu'à chacune de ces classes, il était possible de faire correspondre dans 80 à 100 % des cas, une gamme de sensibilité au compactage à l'optimum Proctor, bornée par deux valeurs de Top.

L'ensemble de ces données sont rassemblées sur le graphique 7. Sur chaque diagramme sont également indiquées les courbes granulométriques types, les variations extrêmes enregistrées au sein de chaque classe, pour les échantillons traités et les numéros de chantier. Les sols présentant un maximum marqué pour une teneur en constituants d'une taille supérieure à 2 μ sont tous sensibles à très fortement sensibles au compactage : classe 4 à 6.



La seule exception est représentée par les sols de la classe 2 qui se caractérisent par une teneur en argile très proche de la teneur en limon fin 2 - 20 μ . Ces sols se classent non sensibles. Les sols à population bimodale, classe 3, présentent une faible sensibilité au compactage.

Enfin, les sols de la classe 1, où la teneur en argile, supérieure ou égale à 25 % dépasse toujours la teneur en constituants définie entre 2 μ et 2000 μ ne sont pas sensibles au compactage.

Nous avons maintenu la distinction entre les classes 1 et 2 car, bien que non sensibles au compactage, les sols des deux classes présentent sur le terrain des comportements très opposés.

Nous allons maintenant pouvoir confronter les taux de compactation observés sur le terrain aux classes de sensibilité au compactage que nous venons de décrire.

(7) - Comparaison Top / Tec

Nous avons utilisé dans les comparaisons entre les valeurs de Top à l'optimum proctor et le Tec de chantier, les valeurs de Tec corrigé, chaque fois que cela était justifié par les valeurs de γ_h m.

Pour rendre cette comparaison plus aisée, nous avons également défini cinq classes de tassement textural sur les chantiers :

Nul $Tec \leq 0$

Faible $0 < Tec \leq \frac{1}{2} Top$

Assez fort $Tec = Top$ Le matériau a subi le même compactage qu'à l'optimum Proctor.

Fort $Top < Tec \leq 2 Top$

Très fort $Tec > 2 Top$

Le tableau 4 permet de faire une première synthèse des résultats.

Les entrées sont constituées par les classes de compaction sur les chantiers d'une part, les classes de sensibilité à la compaction d'autre part.

À l'intersection de chaque classe, sont portés les numéros caractérisant chaque chantier.

Une relation entre le degré de compaction observé et la sensibilité au compactage mesurée est observée pour 13 chantiers sur 32, ces chantiers se distribuant sur la diagonale allant de l'intersection non sensible degré de compaction nul, à l'intersection très fortement sensible degré de compactage très fort. Deux cas d'exception à cette relation apparaissent qui soulignent le caractère très contingent des valeurs de Tec sous chantier.

- La première exception est illustrée par les chantiers où la compaction observée est inférieure à celle que pouvait laisser prévoir leur sensibilité au compactage. Entrent dans cette catégorie pour 6 sur 7 observés, les chantiers de distribution où l'on sait que les énergies mises en jeu pour l'édification des pylones était bien moins importantes que celles développées sur les chantiers de transport.

Faute d'avoir pu disposer de données chiffrées, le cas des chantiers de transport qui vérifient cette première exception ne peut être tranché.

L'hypothèse la plus vraisemblable est qu'il s'agit de chantiers établis dans des conditions d'humidité de sol supérieure à l'humidité W optimum pour laquelle le sol ne peut être compacté comme à l'optimum Proctor (Figure XVII).

- Le deuxième type d'exception est illustré de façon paradoxale par le cas des sols peu sensibles à non sensibles au compactage, qui sur le terrain se révèlent très fortement compactés (Tec > Top) et ceci pour sept chantiers.

○ chantiers anciens de transport

◇ chantiers de distribution

□ chantiers récents de transport

degré de compaction sur le chantier, par rapport à l'optimum proctor					sensibilité au compactage par rapport à l'optimum proctor
nul	moyen	assez fort (de même ordre que OP)	fort	très fort	
	◇ 9	□ 21			très fortement sensible
	○ 34 ◇ 15 □ 2	□ 4	○ 32 □ 11		très sensible
◇ 13 ◇ 23 ◇ 8	○ 28 ◇ 12 □ 20	○ 27 ◇ 22 □ 6 ○ 30 ○ 26			sensible
				○ 29 ○ 31	peu sensible
○ 24 ○ 33 ○ 35 ○ 38 ○ 25	□ 5			○ 36 □ 7 ○ 17 □ 10 □ 3	non sensible

tableau 4

Du point de vue de leur granulométrie, ces sols se situent sans exception dans les classes 2 et 3 précédemment définies (graphique 7).

D'après les données recueillies par enquête, deux de ces chantiers ont eu à subir un passage double de matériel roulant lourd (cas d'ouvrages effondrés et reconstruits à proximité immédiate).

Pour les cinq autres cas, on peut retenir comme hypothèse la possibilité d'écoulement de l'eau au fur et à mesure de l'application des contraintes, ce qui correspond au laboratoire à un essai Proctor drainé. On sait que dans de telles conditions, la densité apparente au maximum dépasse la valeur de l'optimum Proctor.

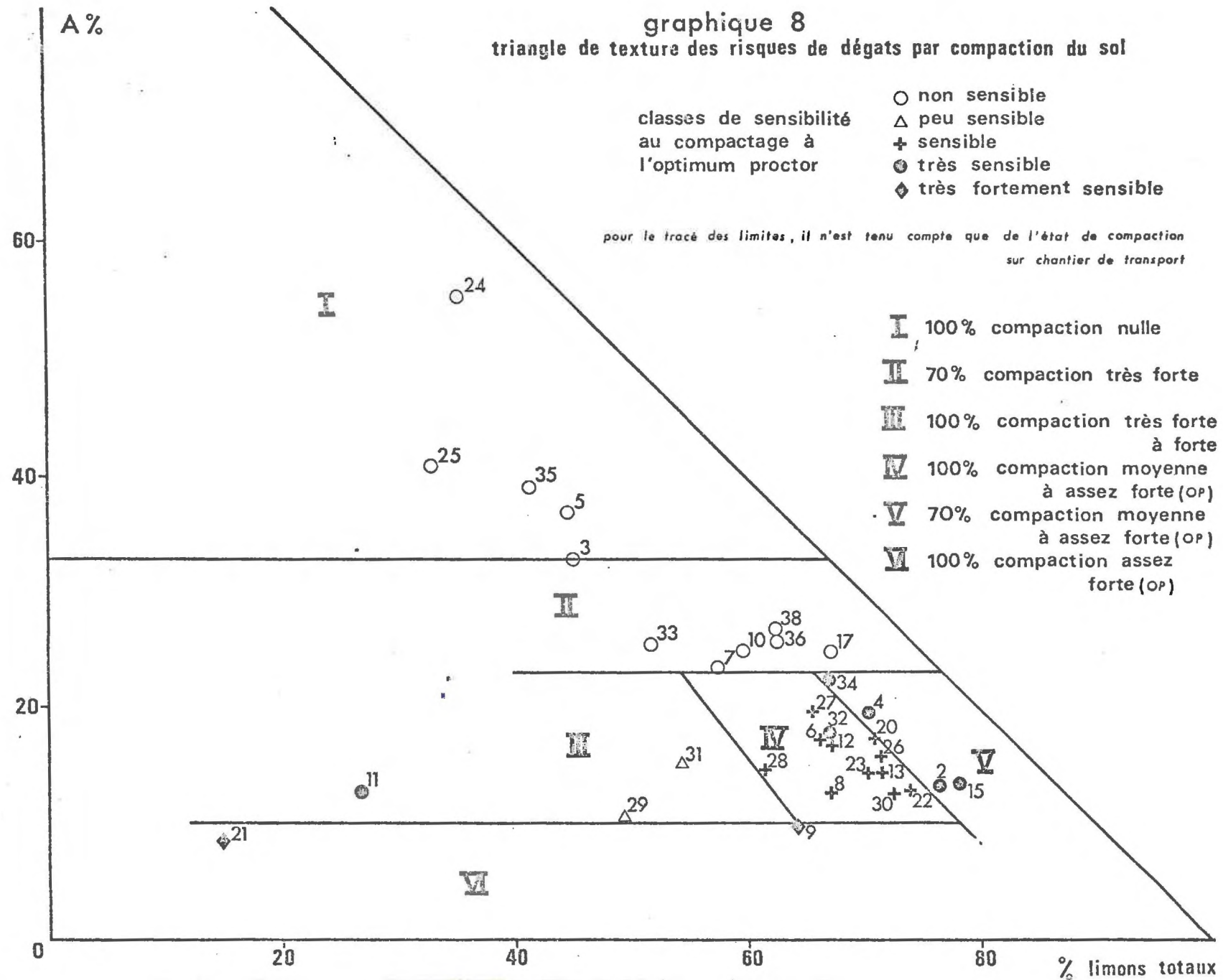
(3) - Conclusions

- Pour les chantiers de distribution, les dégâts observés se situent en majorité dans la gamme des tassements texturaux faibles à nuls.
- L'ensemble des chantiers de transport montre une grande variété de situations, allant d'un tassement textural nul à très fort, les cas extrêmes étant aussi bien représentés que les cas moyens.
- Aucune distribution marquée n'apparaît entre les chantiers anciens ou récents de transport.
- L'influence des conditions particulières de chantier, type de matériel, durée d'utilisation, conditions réelles d'humidité, conditions de drainage naturel, est prépondérante et rend très difficile une prévision précise.

(4) - Essai de synthèse au niveau d'un triangle de texture

Nous présentons avec le graphique 8, un essai de synthèse au niveau d'un triangle de texture, où la granulométrie des matériaux est ramenée à trois constituants :

graphique 8
triangle de texture des risques de dégats par compaction du sol



- l'argile = $< 2 \mu$
- le limon total = $2 - 20 \mu + 20 - 50 \mu$
- le sable total = $50 - 2.000 \mu$

En ne tenant compte que du risque maximal sur chantier, c'est à dire en ne retenant que le cas des chantiers de transport, nous avons mis en place un certain nombre de limites définissant des classes de risques de tassement textural.

Dans la classe I, où la teneur en argile est supérieure à 33 %; ce risque est nul, à 100 %.

En classe VI, où les sols ont moins de 10 % d'argile, il y a tassement textural assez fort, à 100 %.

Les classes III, IV, V, où les teneurs en argile sont comprises entre 10 % et moins de 23 %, les risques de tassement textural moyen à assez fort sont élevés : 100 % pour la classe IV, 70 % pour la classe V, les tassements texturaux forts à très forts sont observés à 100 % dans la classe III.

Enfin, la classe II, qui correspond aux matériaux où la teneur en argile varie de 23 % à 32 % groupe les sols où le risque de tassement texturaux très fort est de 70 %, les 30 % restant correspondant au cas d'absence totale de compactage.

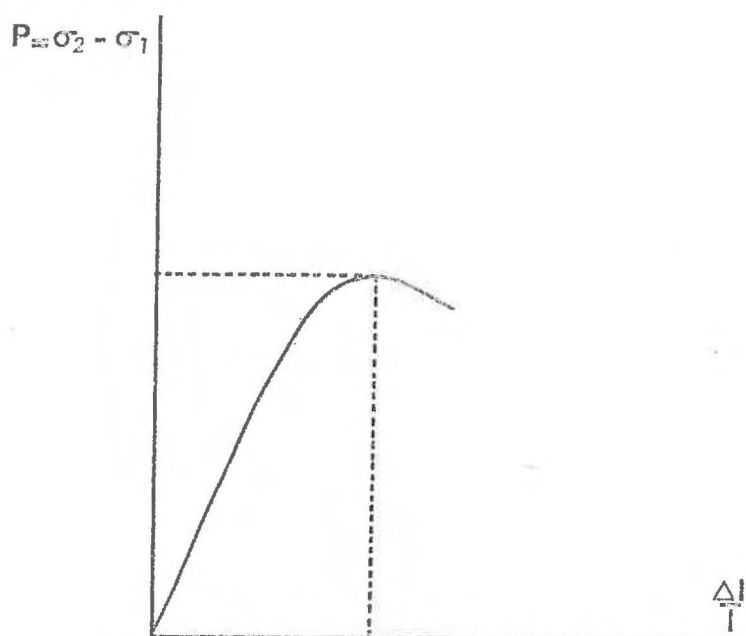
II - DETERMINATION DES CARACTERISTIQUES MECANQUES

1) - Présentation de l'essai triaxial

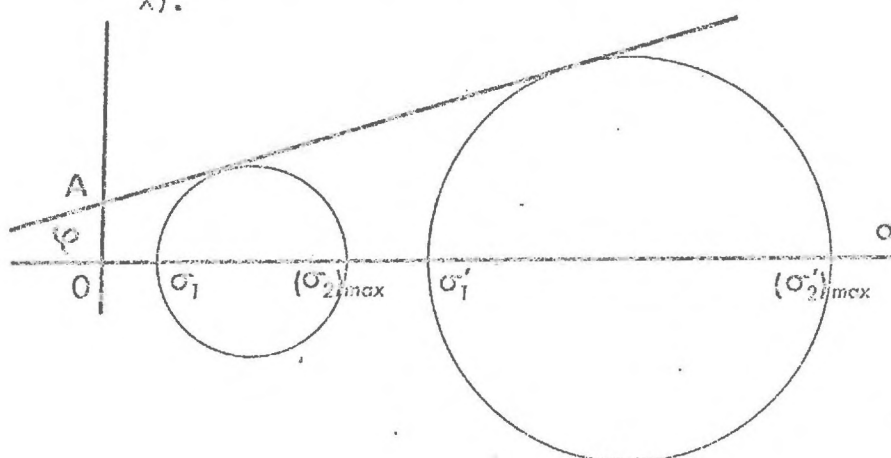
L'échantillon du sol à étudier, de longueur l étant au préalable amené à une humidité w et une densité apparente γ_d (cf. annexe) et posé sur la plaque poreuse de la cellule de l'appareil, est soumis à une pression hydrostatique σ_1 arbitrairement choisie. Cette éprouvette est alors soumise à une pression verticale croissante P qui, dans cette direction, s'ajoute à la pression hydrostatique de telle sorte que, à chaque instant au cours de l'essai, l'éprouvette est soumise latéralement à la pression choisie et verticalement à la pression $\sigma_2 = \sigma_1 + P$ continuellement croissante. La pression P

est mesurée à chaque variation Δl de un millimètre. Il y a écrasement lorsqu'apparaissent dans l'échantillon des fissures entraînant ainsi un passage par une valeur maximale de la pression P . La pression $(\sigma_2)_{\max}, \sigma_1 + p_{\max}$ est appelée résistance à l'écrasement pour une pression latérale σ_1 choisie.

La courbe obtenue (fig. IX) traduit qualitativement les variations du "déviateur de contraintes" $\sigma_2 - \sigma_1 = P$ en fonction du tassement.



Il est bien évident que si la pression hydrostatique est différente et devient σ_1' , la valeur du déviateur p , donc de la pression verticale, provoquant la rupture est également modifiée et devient σ_2' . Les théories de la mécanique des fluides (donc des sols) conduisent à la représentation suivante (fig. X).



Les sols obéissent, à la rupture, au critère de Coulomb qui traduit le fait que tous les cercles, d'extrémités σ_1 et $(\sigma_2)_{\max}$ sont tangents à une même droite d'ordonnée à l'origine $OA = c$ et faisant un angle φ avec l'axe des abscisses.

c est appelé cohésion du matériau dans les conditions de l'essai. φ est appelé angle de frottement interne dans les conditions de l'essai.

Remarque Il est important de préciser les "conditions d'essai" car les valeurs de ces caractéristiques mécaniques dépendent :

- de l'état physique et hydrique des échantillons : densités - humidités - homogénéité
- du mode d'écrasement avec ou sans drainage et de la vitesse d'écrasement.

a) - Résultats

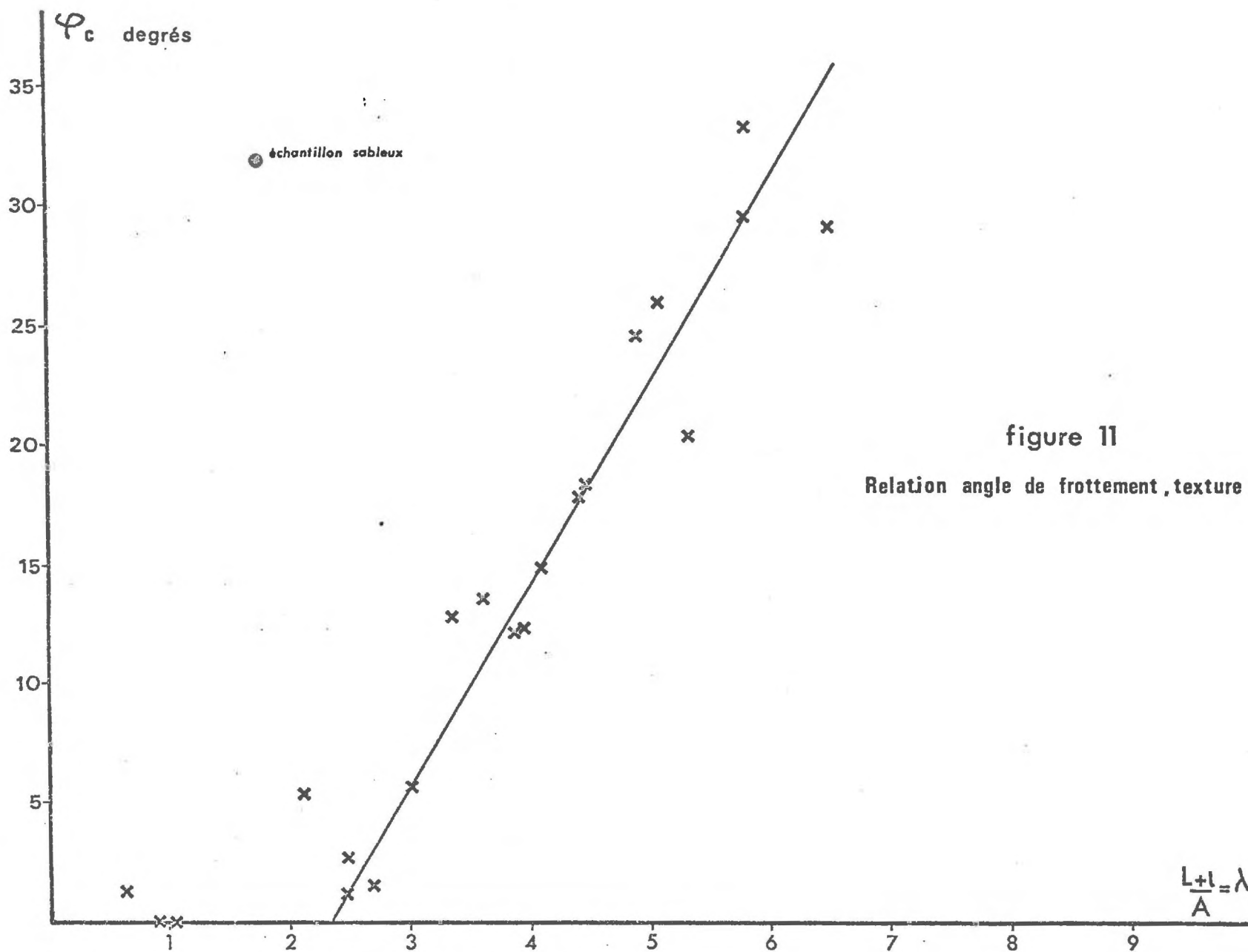
Les essais de compression triaxiale effectués selon le protocole développé en annexe ont montré :

- 1) - Que la valeur de la cohésion c pour tous les sols est en moyenne de l'ordre de 400 g/cm². Cette cohésion ne peut être reliée de façon simple et significative à un quelconque critère textural.
- 2) - Que la valeur de l'angle de frottement interne φ peut être relié à un critère textural simple (fig.

$$XI) \quad \lambda = \frac{L + 1}{A}$$

Grâce à ce critère trois catégories de sols sont ainsi mises en évidence : les sols argileux : appelés ainsi selon le triangle de texture du GEPPA et ici caractérisés par λ inférieur à 2,2 pour lesquels l'angle de frottement interne est voisin de zéro.

les sols sableux : caractérisés sur le triangle de texture par la double condition



$A \leq 10 \%$ et $S + s \geq 65 \%$ pour lesquels l'angle de frottement interne est constamment de l'ordre de 32° à 35° .

tous les autres sols pour lesquels φ semble être une fonction linéaire du coefficient λ . Pour les 18 échantillons de cette catégorie, une étude statistique a donné un coefficient de corrélation de 0,95.

b) - Conclusion

Ces résultats aussi réconfortants soient-ils et aussi conformes aux études intuitives antérieures soient-ils n'ont cependant pas permis de retrouver l'une des classifications établies au cours des observations et mesures in situ. Les corrélations calculées entre l'angle de frottement interne et les diverses grandeurs mesurées ou observées sur le terrain sont loin d'être satisfaisantes. Aussi a-t-il fallu analyser plus profondément les résultats donnant les caractéristiques mécaniques des sols.

2) - Déformabilité des échantillons

Si la détermination des caractéristiques mécaniques des échantillons n'a pu permettre une liaison immédiate avec les observations sur terrain, l'analyse des courbes "effort - déformation" présentées sur la fig. 9 a donné des résultats plus satisfaisants dans cette recherche.

Nous appellerons "coefficient de déformabilité à un bar" D le module d'Young au maximum des courbes d'effort - déformation obtenues avec une pression latérale de un bar. Ainsi il vient :

$$D = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{\max}}{\left(\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}\right)_{\max}}$$

- a) - Remarque - Pour un déviateur de contraintes $p = (\sigma_2 - \sigma_1)$ max. donné un sol très déformable arrive à la rupture après avoir subi une déformation relative $\frac{\Delta \epsilon}{\epsilon}$ supérieure à celle d'un sol peu déformable. Un sol très déformable a donc un coefficient de déformabilité D inférieur à celui d'un sol peu déformable.

Il est évident que d'une façon ou d'une autre, ce coefficient de déformabilité dépend de la valeur de l'angle de frottement interne φ mais la recherche de cette relation est hors de propos dans le cadre de cette étude. Nous savons seulement que la corrélation entre D et φ n'est pas simple et nécessiterait des études plus approfondies.

b) - Résultats

La comparaison des valeurs de D obtenues en laboratoire sur 13 échantillons (chantiers de transports) ayant subi une pression latérale de un bar, à celles de l'épaisseur concernée par la déformation E in situ (fig.12) conduit à une étude statistique donnant un coefficient de corrélation très satisfaisant de 0,77. Il semble donc possible par une mesure en laboratoire de prévoir in situ l'épaisseur qui sera concernée par la déformation lors du passage des engins.

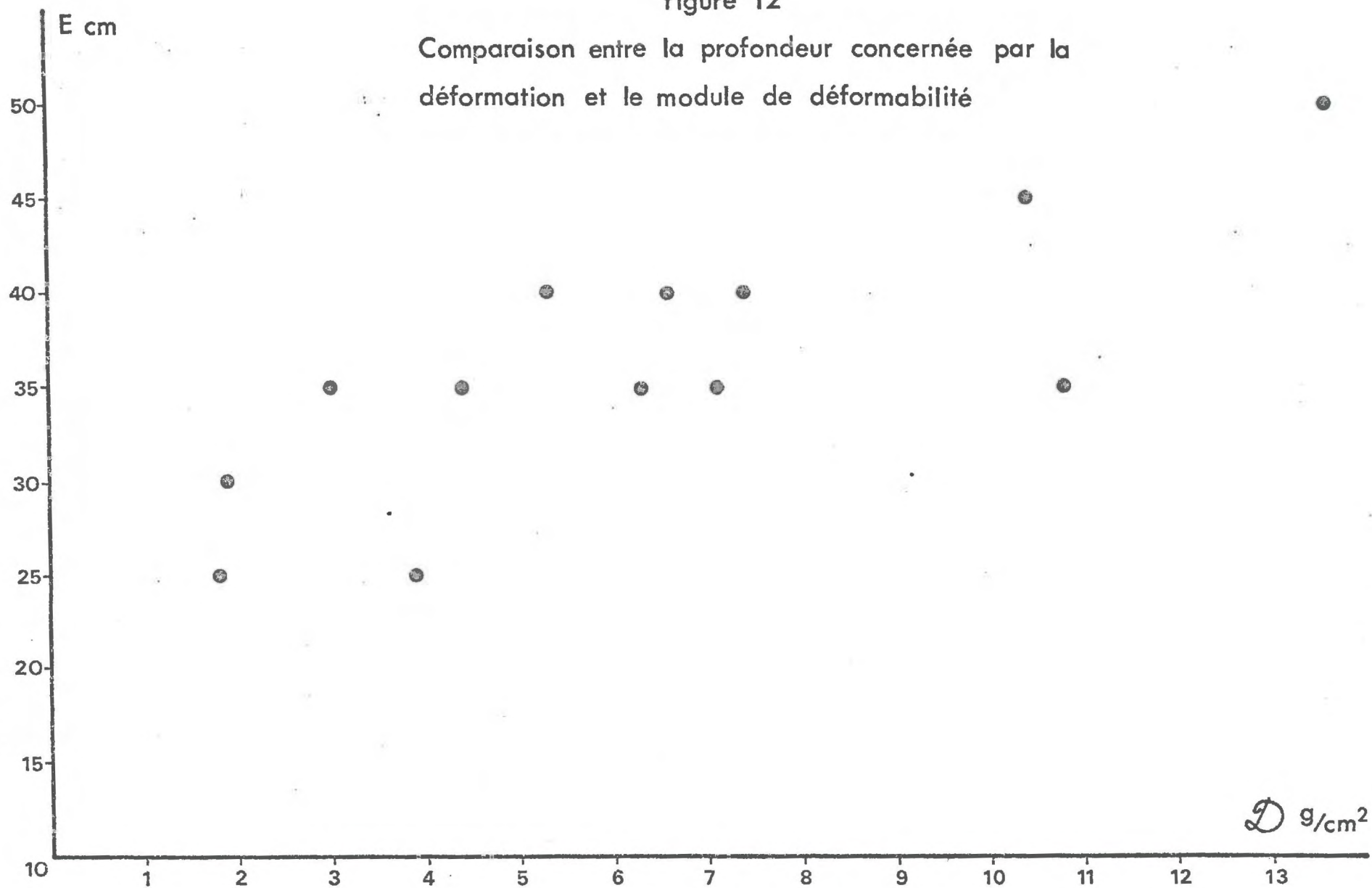
III - ETUDE DE LA TRACE

1.) - Rappel sur les comportements mécaniques des véhicules

La trace sur le sol faite par le passage des engins est le résultat de la réaction du sol aux pressions qu'il subit. Cette trace est schématiquement la traduction de deux comportements différents.

figure 12

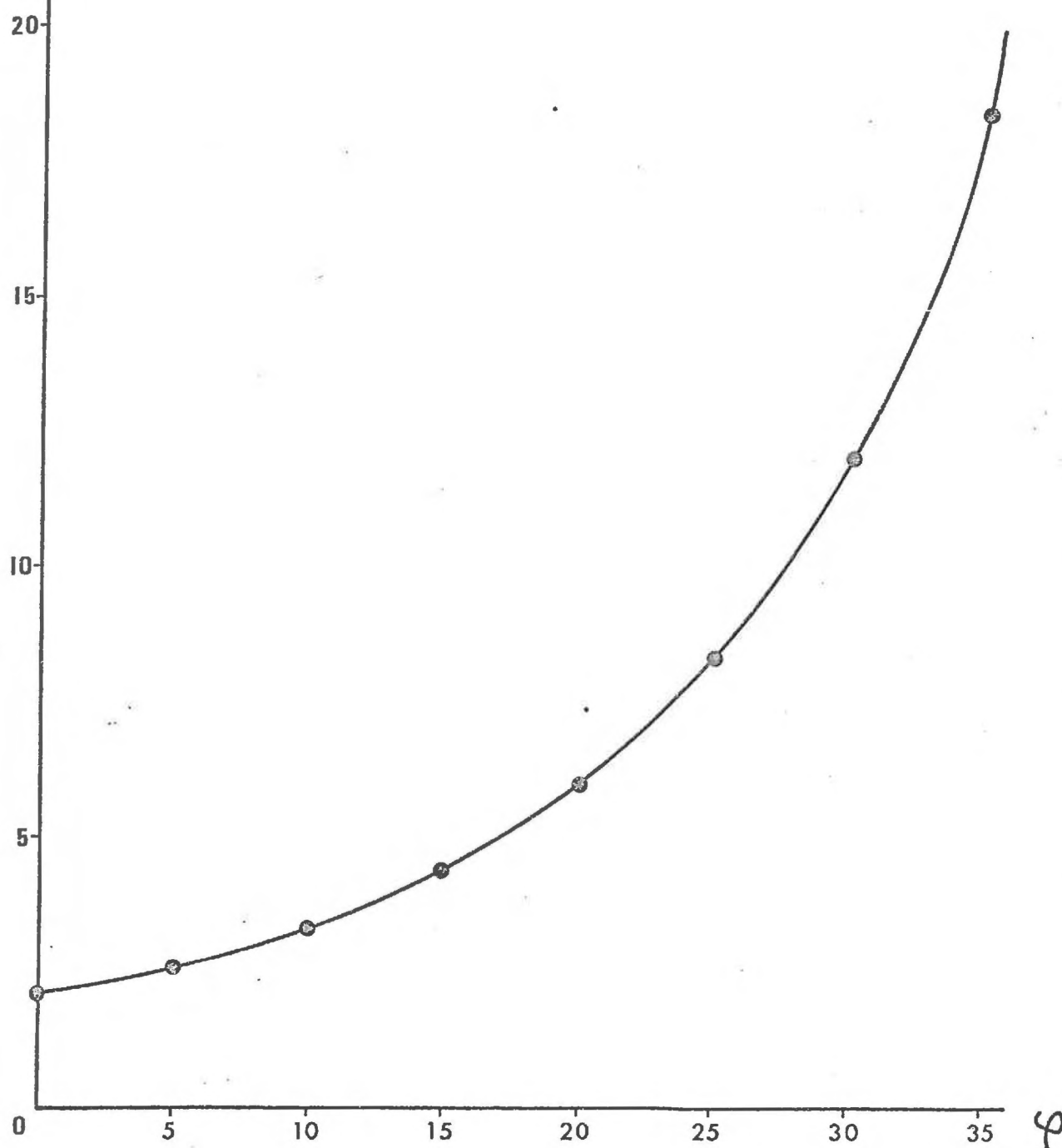
Comparaison entre la profondeur concernée par la
déformation et le module de déformabilité



Pression limite
 Kg/cm^2

figure 12^{bis}

pression de portance en fonction
de l'angle de frottement



a) - Premier comportement

La pression verticale subie par le matériau est de faible grandeur. Le matériau reste dans la phase élastique. Son comportement est en fait pseudoélastique : son état final est différent de son état initial, car il conserve une petite déformation rémanente dont l'amplitude dépend à la fois de son état physique et des conditions d'application de la charge. Cette déformation rémanente fait appel aux théories de l'élasticité ou plus précisément aux théories de la consolidation dont l'étude, sous "charges de courtes durées" est longue et délicate.

b) - Deuxième comportement

La contrainte verticale subie par le matériau est telle qu'il y a rupture. Le sol a alors un comportement élastoplastique et ses déformations sont irréversibles et de grande intensité. La charge limite, ou "portance du sol" est calculable en utilisant, par exemple, la formule de L. CAQUOT :

$$P_{\text{Lim}} = \frac{c}{\tan \varphi} \left[e^{\pi \tan \varphi} \cdot \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\varphi}{2} \right) - 1 \right]$$

où c et φ sont les caractéristiques du matériau au moment de l'application de la charge.

Nous avons supposé que les conditions de travail les plus probables sur les chantiers étaient telles que les matériaux se trouvaient à une humidité voisine de H_e à la densité correspondante. L'appareil triaxial nous a permis de relier φ à la texture (fig. XI) et d'estimer en première approximation que c conserve une valeur à peu près constante voisine de 0,4 Kg/cm². La figure 12 nous permet donc de déterminer par simple lecture la valeur de la force portante (pression limite) d'un sol pour un angle φ donné par l'analyse granulométrique (fig. XI).

2). - Détermination du type de comportement

L'abaque de la fig. XIII permet de déterminer la pression de contact des pneus sur le sol connaissant la pression de gonflage et la charge par roue.

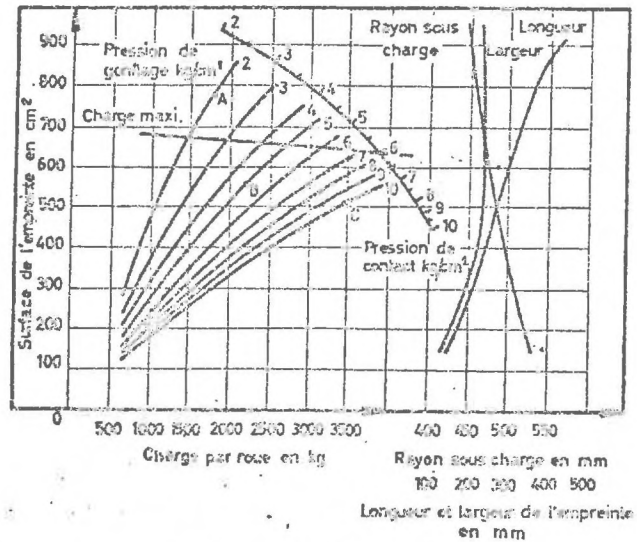


Fig. XIII

Chaque point de ce graphique (points A, B ou C par exemple) correspond à une pression de contact $p = \frac{P}{S}$ coefficient directeur de la droite qui joint l'origine au point considéré. Pour A nous avons comme pression de gonflage 2 Kg/cm² et une pression de contact de 2,3 Kg/cm² alors que pour le point C nous avons respectivement 10 et 7 Kg/cm². La pression de contact étant ainsi déterminée deux cas peuvent donc se présenter.

a) - Premier cas

Si la pression de contact P_c est inférieure à la pression limite caractérisant la portance du sol, le sol reste dans l'état pseudoélastique et la "trace" ne sera que la traduction de sa déformation rémanente d'amplitude relativement faible (fig. XIV).

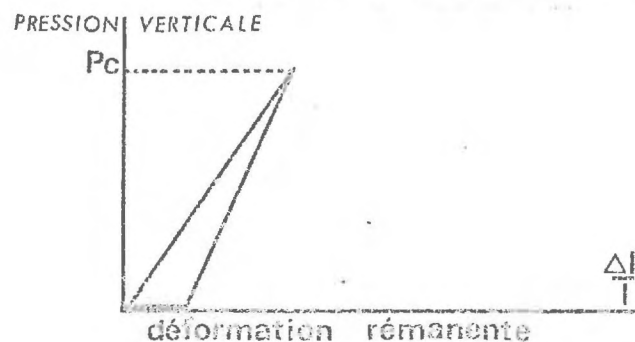


Fig. XIV

Comportement pseudo-élastique

b) - Deuxième cas

Si la pression de contact P_c des pneus est supérieure à la pression limite le sol est entré en plasticité : il est en théorie infiniment déformable pour une pression donnée et la trace sur le terrain est une véritable "ornière" dont la profondeur est relativement importante. Comme en fait le sol n'est pas parfaitement plastique mais élastoplastique (Fig. XV) sa déformation totale est la somme de sa déformation à la limite de l'élasticité et de sa déformation plastique "pure".

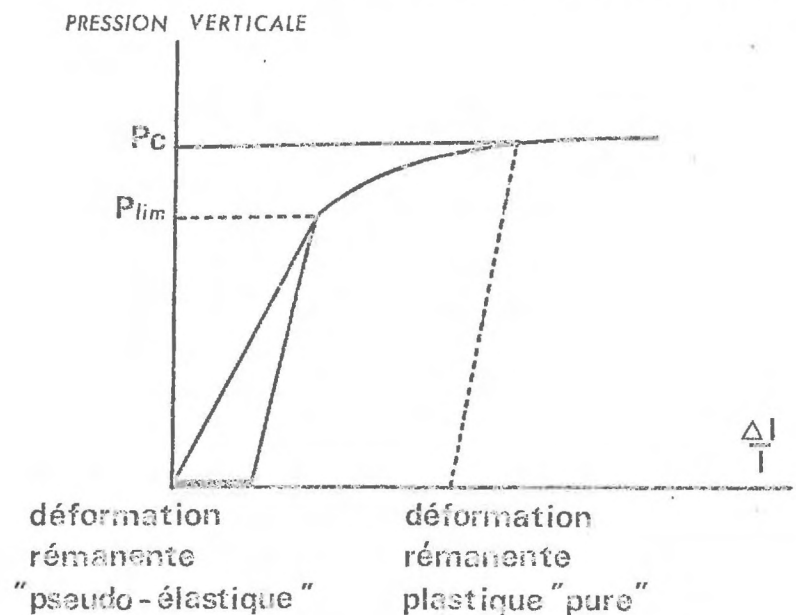


Fig. XV Comportement élastoplastique

c) - Remarque

Dans tout ce qui précède nous n'avons fait que mentionner les cas où il y a "trace" et les cas où il y a "ornière" est important de noter que dans le cas de formation d'une trace il y a variation de volume donc il y a tassement, alors que la déformation "plastique pure" s'effectue sans variation de volume. Sur le terrain la présence d'une ornière est un fait plus spectaculaire que

celle d'une trace mais il est nécessaire de remarquer qu'il peut y avoir "trace" avec un tassement considérable et "ornière" avec un faible tassement selon la nature et l'état du matériau. Ainsi apparaît le danger de ne se fier qu'à la seule mesure de la profondeur des marques laissées par les engins sur le sol, le tassement étant en fait le point le plus important quant aux répercussions agronomiques.

3) - Écrouissage

Jusqu'à présent le comportement des sols n'a été étudié que pour l'application d'une et une seule charge. Or les engins utilisés ont été amenés à passer plusieurs fois aux mêmes endroits créant ainsi une répétition des charges appliquées pendant un temps donné. Cette répétition des applications des charges entraîne un écrouissage qui se traduit par des déformations plus importantes. Les comportements des matériaux dans les deux cas (pseudoélasticité et élastoplasticité) sont représentés par les figures XVI suivantes dans lesquelles les points a, b, c, d, ... représentant les états de déformation rémenentes en pseudoélasticité et les points a', b', c', d' ... les états de déformations en élastoplasticité.

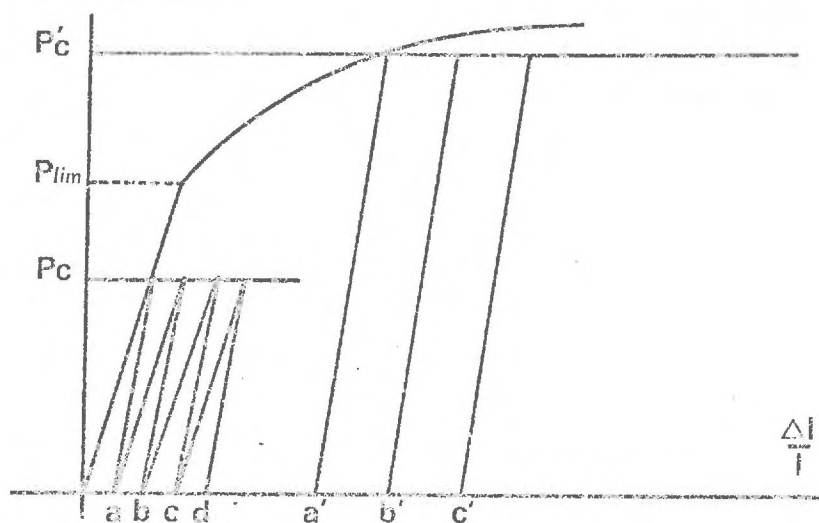


Fig. XVI - Comportement des sols soumis à l'écrouissage.

Il est évident que dans ce cas il est impossible de lier la profondeur mesurée sur le terrain avec un quelconque critère simple caractérisant les sols.

Pour ces diverses raisons, la recherche d'une corrélation entre les profondeurs d'ornières observées et les valeurs de l'angle de frottement interne mesurées dans un essai nécessairement standardisé n'a fait apparaître qu'une indépendance totale entre ces deux grandeurs.

CONCLUSION

Comparer des profondeurs d'ornières mesurées sur le terrain sans tenir compte de ces différents comportements risque d'imputer à un sol ayant une faible déformation pseudoélastique mais entré en plasticité une même "responsabilité" aux dégâts qu'un sol non entré en plasticité mais ayant une grande déformation pseudoélastique. Nous avons montré cependant que seule la déformation pseudoélastique est la cause des tassements qui, moins spectaculaires sur le terrain, sont pourtant la cause des diminutions de porosités du sol, avec toutes les conséquences que nous examinerons ultérieurement.

C. - IMPORTANCE AGRONOMIQUES DES DEGATS OBSERVES

Nous avons vu que les déformations subies par le sol peuvent se situer à différents niveaux :

- la surface du terrain peut-être creusée d'ornières, plus ou moins profondes, et plus ou moins complexes.
- sous l'emprise de la piste qui ne déborde le plus souvent que très faiblement la limite des bourrelets extérieurs lorsqu'ils existent la structure du profil peut être altérée de façon plus

ou moins intense et sur une épaisseur de sol très variable. Cette altération peut se borner à une diminution du volume des fissures ou pores de grandes dimensions, c'est à dire à un tassement structural. Elle peut être accompagnée d'une coalescence des mottes et lorsque les conditions de roulage (pression exercée par les engins, texture et humidité du sol) sont suffisamment défavorables, on voit apparaître le type de déformation le plus fondamental que nous avons qualifié de tassement textural. Celui-ci, comme le précédent peut être plus ou moins intense, et également affecter une épaisseur de sol variable.

Les conséquences de ces différents effets sur le fonctionnement du sol considéré comme le support des végétaux cultivés peuvent être regroupées en catégories principales.

1°) - Modification du régime de l'eau

- La perméabilité du sol à l'état saturé qui reflète les possibilités de drainage de pluies excessives est pour une grande part, assurée par la porosité de fissures.

Elle diminue donc fortement après un tassement structural, accroissant ainsi les risques d'asphyxie du sol et retardant les possibilités d'interventions culturales.

- La circulation de l'eau non saturante qui permet l'utilisation des réserves du sol par les racines des végétaux au cours des périodes de sécheresse, dépend essentiellement de la structure au niveau de l'assemblage élémentaire ; elle peut être affectée par le tassement textural (parfois appelé compaction) mais dans un sens dont il n'est pas possible de prévoir de façon rigoureuse les conséquences dans l'état actuel de nos connaissances. On peut toutefois admettre, d'après les derniers travaux français, que pour l'ensemble des terres limoneuses, la mobilité de l'eau sera diminuée, cette conséquence risquant d'être particulièrement marquée pour les limons argileux.

La conséquence d'une telle diminution de mobilité de l'eau serait un accroissement du risque d'interruption d'alimentation hydrique au cours de l'été (périodes à la fois sèches et chaudes).

2°) - Modification des possibilités d'enracinement

Les racines au cours de leur croissance utilisent les fissures lorsqu'il en existe et aussi, lorsque la plasticité du sol est suffisante, la porosité interne des mottes., qui peut alors se déformer, autorisant ainsi la progression de l'apex racinaire et la croissance radiale de l'organe. Un tassement structural limite donc considérablement les possibilités d'enracinement surtout en conditions non plastiques (sol relativement sec et (ou) sableux).

De ce fait, l'alimentation hydrique et minérale de la culture peut-être limitée dans des proportions dont on conçoit aisément qu'elles sont variables en fonction de l'épaisseur des couches de sol tassées, de leur localisation, de la texture et de l'humidité au moment de l'installation des racines dans le sol.

3°) - Modifications du comportement mécanique du terrain

Les tassements structural et surtout textural accroissent considérablement la cohésion du sol principalement à l'état sec. En dehors de ces cas extrêmes, rencontrés surtout dans les sols fortement compacts, où le travail d'un outil normal (charrue, ou appareil à dents) devient impossible, cet accroissement de la cohésion a deux conséquences principales :

- augmentation de la puissance nécessaire pour effectuer un travail donné
- difficultés considérables rencontrées dans la fabrication de terre fine (formation de mottes difficilement réduites).

D. - POSSIBILITES CLIMATIQUES ET TECHNIQUES DE REMISE EN ETAT DES
TERRAINS APRES ROULAGE

1^o) - Nivellement des traces de roues

Cette opération qui s'avère parfois indispensable même en cours de culture, ne serait-ce que pour permettre le passage de matériel d'entretien du sol, de traitement phytosanitaire ou de récolte, ne pose pas en soi de problèmes particuliers sauf peut-être pour des profondeurs réelles d'ornières supérieures à 40 cm. Il convient toutefois de noter que le simple comblement des ornières avec de la terre meuble ne suffit pas à supprimer les risques d'accumulation d'eau par climat très humide, si le fond du terrain était tassé et l'est resté.

2^o) - Correction du tassement structural

(diminution du volume des fissures et prise en masse du terrain par coalescence des rottes).

1) - Fissuration naturelle du terrain sous l'influence du gel et des alternances d'humectation et de dessiccation

Une telle évolution très favorable et en définitive gratuite peut intervenir si un ensemble de conditions assez bien connues sont simultanément remplies :

- succession de périodes de gel et dégel ou d'humectation et de dessiccation du sol dans la couche considérée. Cette première condition rend problématique la remise en état spontanée des couches profondes tassées et prises en masse. Elle a plus de chance d'être remplie en climat continental (Centre et Est de la France) qu'en climat océanique (façade atlantique) ou méditerranéen, où les gels sont rares et peu importants et où les périodes à la fois chaudes et humides sont rares.

- La texture du sol doit être suffisamment argileuse (25 à 30 % d'argile pour les sols limono-argileux ; 20 % d'argile pour les sols argilo-sableux). Ce point déjà mis en évidence, a été dans ses grandes lignes confirmé par les observations et test effectués au cours du travail présenté ici, en particulier sur les chantiers remis en culture depuis six à dix huit mois au moment des observations, seules les trois terres argileuses avaient récupéré alors une structure comparable à celle du reste de la parcelle.
- La présence d'une prairie pour la couche superficielle ou d'une culture à enracinement fasciculé et profond pour le sous - sol est un moyen d'accélérer la fissionation par dessiccation et humectations alternées, mais non de la déclencher si la texture est trop sableuse ou surtout trop limoneuse.

2) - Le travail du sol

Des interventions mécaniques pratiquées avec des outils et à une humidité du sol convenables sont susceptibles de recréer un état structural normal. Les conditions soulignées sont aisément réalisables pour les couches de surface ; elles peuvent même l'être fréquemment dans un court délai.

Il n'en est pas de même dans les couches profondes (au delà de 30 à 40 cm).

Les seuls outils disponibles à ce niveau sont les sous soleuses, dont nous savons qu'elles n'ont une efficacité suffisante que dans un matériau brisant. C'est à dire suffisamment sec. Cette circonstance peut imposer une intervention en fin d'été et éventuellement conduire de ce fait à une modification de la rotation (impossibilité d'y planter un colza d'hiver ou une prairie le printemps d'automne). Elle impose de plus une consommation

importante d'énergie.

En définitive, nous constatons que les tassements structuraux dont la récupération naturelle est la plus rapide et la correction mécanique la plus facile, sont ceux qui affectent des terres plutôt argileuses et des couches superficielles.

Nous avons vu par ailleurs que sous les chantiers de transport, la profondeur tassée dépassait 30 cm dans une proportion importante pour des sols limoneux ou sableux. Ce type de dégâts est incontestablement celui qui pose le plus de problèmes car il ne peut être corrigé que par une intervention mécanique d'envergure (sous-solage en terrain sec).

3) -- Correction du tassement textural

Ce type de dégâts équivaut rappelons-le à une certaine dénaturation de la constitution physique du sol. Tout se passe comme si le sol était modifié dans le sens d'un accroissement de sa compacité naturelle. Si nous connaissons, sans toutefois être toujours capables de les apprécier les conséquences défavorables de cette altération de l'assemblage élémentaire sur les comportements hydrique et mécaniques du sol, nous devons reconnaître que nous ignorons le mécanisme et donc les conditions d'un retour à l'assemblage élémentaire naturelle est lié à la constitution du sol.

Le seul point qui paraît acquis à partir d'observations antérieures est qu'il s'agit d'un phénomène qui n'est que lentement réversible. Il est évident que, par rapport au problème qui nous était posé, il s'agit là d'une question très importante ; d'autant plus que les dégâts correspondants ne sont pas prévisibles, au vu des données et que les études que nous avons effectuées, si elles permettent d'indiquer pour quelques

textures ils sont improbables, n'ont pas conduit à définir de façon sûre les textures les plus sensibles.

Ce point sera donc mis à notre programme dès que possible, mais il ne pouvait être envisagé d'entreprendre les recherches correspondantes dans le cadre (délais et moyens) de la convention de recherche I.N.R.A. / E.D.F. qui fait l'objet de ce rapport.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Sans reprendre dans le détail les conclusions des différents paragraphes de ce rapport, nous pensons qu'il peut être utile de rappeler les principaux renseignements qu'il présente.

1^o) - D'un point de vue méthodologique, l'analyse d'un échantillon de situations que nous avons effectuée a permis une approche convenable des questions posées, une évaluation de leur pertinence et dans l'ensemble a conduit à des éléments de réponses, qui nous paraissent utilisables. Toutefois, les difficultés attachées à de telles méthodes et leurs limites bien connues de ceux qui les ont mis en oeuvre sont apparues clairement :

- Les difficultés se situent au niveau de la collecte des informations (et de leur sûreté) dans tous les cas où elles ne nous étaient pas directement accessibles sur place, et au moment même du travail : nature des engins, conditions générales de réalisation du chantier.
- Les limites sont bien sûr que une telle méthode ne permet de déterminer que des tendances statistiquement vérifiées.

Il reste que l'expérimentation demande une somme de connaissances préalable, dont nous étions loin de disposer. C'est seulement maintenant que dans une deuxième étape, nous pourrions choisir les facteurs à tester et les conditions de leur mise à l'épreuve.

2^o) - En ce qui concerne les réponses aux questions précises posées

et qui ont été rappelées en introduction, différents points peuvent être soulignés.

Toute une série de déformations entrant dans la notion de dégâts que nous avons à évaluer, et en particulier le tassement total (structural + textural) et la profondeur déformée sont en corrélation assez étroite avec les critères possibles pour la caractérisation des ornières. Les critères apparaissent tous plus ou moins utilisables : déformation totale et tassement global par aspérimétrie, profondeur apparente ou réelle des ornières. Toutefois, on aurait intérêt à choisir pour chaque type de dégât celui qui s'avère la meilleure variable explicative.

En tout état de cause, au niveau du tassement total sur l'ensemble du profil, le critère "ornière" actuellement utilisé pour être considéré comme relativement satisfaisant, ce qui compte-tenu de son évidente simplicité est un résultat intéressant.

Par contre, ce critère ne permet en aucune mesure de prévoir le tassement textural seul alors qu'il paraît indispensable de pouvoir isoler ce type de déformation dont les conséquences sont graves et la reversibilité plus incertaine. On peut alors chercher à lui substituer un autre critère ou un test facile à mettre en oeuvre.

L'interprétation de l'analyse granulométrique du sol fournit des éléments très importants d'appréciation sur le risque encouru en ce domaine. Toutefois, une large plage du triangle de texture (zone des terres "franches") regroupe des matériaux dont le comportement varie d'un extrême à l'autre. En plus de l'incertitude déjà mentionnée sur certaines conditions de réalisation des chantiers, le nombre nécessairement limité des chantiers observés n'a pas permis d'exploiter complètement certaines tendances qui se sont manifestées lors des comparaisons des courbes de distribution granulométriques, selon des classes de taille étroites.

Les tests de mécanique des sols (essais Proctor et compression triaxiale) ont confirmé cette importance déterminante de la texture sur le comportement des sols au compactage. Toutefois, là encore la liaison ornière - tassement textural n'a pu être mise en évidence. On peut donc considérer qu'elle n'existe pas ou du moins qu'elle est très lâche.

Au niveau de la remise en état (aptitude à la fissuration comportement mécanique), la texture est le critère de base des possibilités de la facilité et de la rapidité d'une évolution favorable naturelle (action du climat) ou provoquée (travail du sol).

En définitive, il semble actuellement que les critères caractéristiques des ornières d'un chantier de catégorie donnée complétés par une interprétation simple d'une analyse granulométrique (voire d'une appréciation texturale directe sur le terrain) permette de porter un jugement d'une sûreté et d'une précision suffisante à la fois sur la nature des dégâts instaurés sur leur ampleur et sur l'évolution probable du terrain après remise en culture.

A N N E X E 1ASPENIMETRE

Cet appareil est destiné à relever simultanément et sur une même ligne les cotes du micro-relief observé en plein champ après diverses façons culturales ou passages d'engins.

L'appareil est constitué d'un support horizontal de 4 mètres de long, sur lequel coulisant verticalement des tiges rigides longues de 1 mètre, espacées les unes des autres de 5 centimètres. Le support, maintenu par deux pieds est placé parallèlement à la surface du sol et les tiges sont mises en place, leur base reposant sur le sol. Le sommet des tiges donne une image, obtenue par translation, du micro-relief du sol.

Une photographie de l'ensemble permet de recueillir les données et de les traiter par ailleurs.

DENSITOMETRE A MEMBRANE

Cet appareil permet de mesurer sur le terrain un volume apparent important de sol en place, de l'ordre de 2.000 à 3.000 centimètres cubes.

L'appareil est essentiellement constitué d'un piston mobile à l'intérieur d'un cylindre rempli d'eau. La base du cylindre est une membrane en latex. On creuse avec soin la couche de sol à étudier, de façon à délimiter une cavité régulière, de forme hémisphérique, dans tasser le matériau sur les bords. Le volume de cette cavité est mesuré au densitomètre, une poussée imprimée au piston assure le placage de la membrane sur les parois de la cavité. A l'équilibre, une échelle graduée sur l'axe du piston permet de lire directement le volume occupé par l'eau à l'intérieur de la membrane. Une mesure avant creusement permet de faire un point zéro qui tient compte notamment des irrégularités de surface de la couche. La différence entre les deux lectures donne le

volume apparent occupé par le matériau. La terre extraite est recueillie intégralement dans un récipient hermétique. Son poids sec et son humidité sont déterminés au laboratoire et permettent de calculer à 10 % près la densité apparente du matériau à l'humidité du terrain au moment de la mesure.

DENSITE DE MOTTE

Les mottes prélevées dans chaque niveau sont enfermées avec soin dans des boîtes hermétiques. Leur volume apparent est déterminé au laboratoire par immersion dans le pétrole après saturation en pétrole, en appliquant le principe d'Archimède. Le choix du pétrole est motivé par le fait qu'il ne produit aucun gonflement du matériau et ne modifie pas sa cohésion.

Lors de la manipulation, les mottes sont préparées, passées puis immergées quelques heures dans le pétrole pour assurer leur quasi-saturation. Elles sont ensuite rapidement essuyées au papier absorbant. Chaque motte, suspendue dans une nacelle, est alors introduite dans un bécher placé sur le plateau d'une balance. Le poids de pétrole déplacé est lu directement sur la balance. La densité du pétrole étant connue par ailleurs, on calcule le volume apparent de la motte. Cette dernière est ensuite séchée à l'étuve 105° et pesée.

L'ensemble des données permet de définir à 4 % près la densité apparente de la motte à une humidité déterminée.

DENSITE TEXTURALE

Le matériau tout venant recueilli sur le terrain est séché à l'air puis tamisé à 2 mm.

Une aliquote d'une centaine de grammes est prélevée. Par apport d'eau, le matériau est alors amené à une humidité dite humidité de malaxage H_m ; définie empiriquement et telle que :

$$H_m = 1,9 \cdot H_s$$

He étant l'humidité équivalente calculée par la formule suivante (GRAS 1957)

$$He = 0,59 A + 0,16 l + 5,47$$

Où A = teneur pondérale en argile pour cent

l = teneur pondérale en limon 2.20 u pour cent.

Après malaxage, d'une dizaine de minutes dans une coupelle, l'ensemble est enfermé dans un sac plastique pour éviter l'évaporation et abandonné 24 Heures afin d'assurer l'humectation de tous les éléments constitutifs.

Le mélange est ensuite introduit dans un buchner de 100 centimètres cubes et soumis pendant 5 heures à une succion correspondant à une dépression de 60 cm de mercure.

Pendant cette opération, le buchner est protégé de l'évaporation par un film plastique.

Le gâteau obtenu est ensuite séché à l'étuve à 105° C. Après séchage, sa densité apparente est déterminée comme pour une motte. La valeur obtenue ainsi, avec une précision de l'ordre de 1 pour cent est par définition la densité apparente texturale.

TEST DE TRI

Ce test a pour objet de révéler dans un échantillon de sol l'existence de plans de moindre résistance délimitant des éléments structuraux.

Les travaux de TRI et CHIER ont montré que le traitement par immersion dans l'alcool éthylique 95° était le plus adapté à la révélation des éléments structuraux du sol.

Un tamisage dans l'alcool éthylique permet de séparer les éléments et de préciser leur distribution. Un échantillon est prélevé sur le terrain avec précaution pour éviter le tassement et compression. Il est ensuite séché à l'air tel quel. L'essai est conduit sur 100 g. de ce matériau. Après une immersion de une heure dans l'alcool 95°, le

matériau est passé avec ménagement sur une batterie de tamis de 10, 5, 3, 2, 1, et 0,5 mm d'ouverture de maille. On tamise avec l'appareil de FEODOROFF sous alcool 95° de façon standard (30 tours en 30 secondes). Les éléments structuraux qui restent sur chaque tamis sont recueillis séparément séchés à 105° C et pesés.

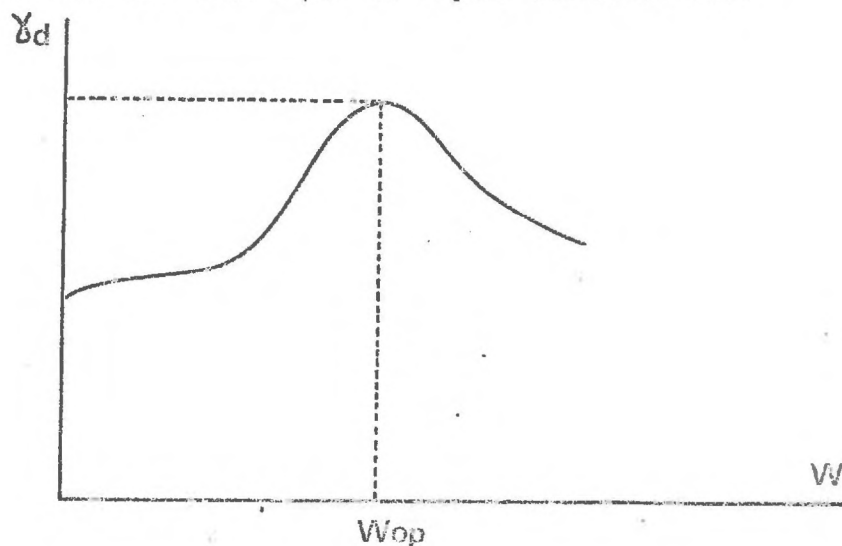
Pour présenter les résultats, on a choisi de porter le pourcentage, cumulé d'éléments inférieurs à une taille donnée en fonction de cette taille.

ESSAI PROCTOR

Cet essai a pour but de déterminer au laboratoire l'aptitude au compactage des matériaux du sol.

Nous avons utilisé ici un moule cylindrique de 300 centimètres cubes (hauteur 7,8 cm diamètre 7 cm). L'échantillon séché à l'air et tamisé à 2 mm est amené à l'humidité choisie puis compactée en trois couches avec une dame de compactage de 1 Kg. Cette dame tombe d'une hauteur de 20 cm à raison de 30 coups par couches pour conserver la même énergie que dans l'essai PROCTOR normal (6 Kgc/cm³).

La carotte obtenue est ensuite extraite, pesée puis séchée à 105° C. On mesure son poids sec, on calcule sa teneur en eau W et sa densité apparente sèche γ_d avec précision de 1 à 2 %. La variation de γ_d en fonction de W passe généralement par un maximum, γ_d optimum, auquel correspond une teneur en eau W optimum. L'allure d'une telle courbe est donnée par la figure suivante XVII.



ESSAI TRIAXIAL

Un échantillon du matériau à étudier est humidifié à $1,9 H_e$. Après homogénéisation, il est placé dans un moule sur une base poreuse (moule de diamètre 7 cm et de hauteur 20 cm) et isolé de ce moule par une enveloppe plastique. Après ressuyage prolongé, tant par la base que par la tête de l'échantillon, le matériau est ramené à son humidité H_e . Démoulée et équipée pour être isolée, l'éprouvette obtenue est soumise à une pression hydrostatique G_1 choisie et constante. Elle est alors soumise à une pression verticale (P) dont les variations sont liées au tassement ΔL de l'éprouvette. A la rupture, l'éprouvette se trouve alors soumise verticalement à une contrainte verticale $G_2 = P_{max} + G_1$.

La présentation graphique de l'état de contraintes à la rupture est un cercle (Fig. X). Deux ou trois essais à des pressions hydrostatiques différentes permettent de tracer la droite de COULOMB caractéristique du matériau dans l'état physique où il a été amené pour les essais.

Une simple lecture du graphique donne alors c et φ , cohésion et angle de frottement interne du matériau.

A N N E X E 2

ANALYSE GRANULOMETRIQUE

A = % inférieur à 2 μ

l = % 2 - 20 μ

L = % 20 - 50 μ

Puis, dans l'ordre, les pourcentages de :

50 - 100 μ ; 100 - 200 μ ; 200 - 500 μ ; 500 - 1.000

1.000 - 2.000 μ

H = % d'eau dans l'échantillon

N = % matière organique

! n° !	! A !	! l !	! L !	! 50 !	! 100 !	! 200 !	! 500 !	! 1000 !	! H !	! N !
! Chant. !	! !	! !	! !	! 100 !	! 200 !	! 500 !	! 1000 !	! 2000 !	! !	! !
! 1 !	! 14,4 !	! 11,7 !	! 25,4 !	! 30,9 !	! 6,8 !	! 1,2 !	! 0,4 !	! 0,4 !	! 2,3 !	! 2,09 !
! 2 !	! 13,6 !	! 23,1 !	! 53,0 !	! 3,6 !	! 1,1 !	! 1,4 !	! 0,6 !	! 0,7 !	! 2,1 !	! 2,33 !
! 3 !	! 32,4 !	! 21,4 !	! 23,5 !	! 5,2 !	! 1,4 !	! 0,9 !	! 0,2 !	! 0,2 !	! 6,9 !	! 7,29 !
! 4 !	! 19,1 !	! 23,4 !	! 44,0 !	! 2,1 !	! 0,5 !	! 0,7 !	! 0,4 !	! 0,6 !	! 2,8 !	! 2,44 !
! 5 !	! 36,6 !	! 24,7 !	! 19,6 !	! 7,9 !	! 5,8 !	! 0,7 !	! 0,1 !	! 0,1 !	! 4,6 !	! 1,46 !
! 6 !	! 17,2 !	! 19,0 !	! 41,4 !	! 11,6 !	! 2,3 !	! 1,4 !	! 0 !	! 0,1 !	! 2,3 !	! 1,01 !
! 7 !	! 23,6 !	! 25,3 !	! 32,4 !	! 6,2 !	! 2,7 !	! 1,1 !	! 0,2 !	! 0,2 !	! 3,1 !	! 2,67 !
! 8 !	! 12,6 !	! 29,7 !	! 37,2 !	! 2,0 !	! 4,0 !	! 3,3 !	! 1,8 !	! 2,7 !	! 1,5 !	! 2,75 !
! 9 !	! 9,9 !	! 21,3 !	! 43,2 !	! 3,2 !	! 5,9 !	! 5,1 !	! 2,2 !	! 3,6 !	! 1,2 !	! 2,52 !
! 10 !	! 25,0 !	! 25,3 !	! 34,1 !	! 5,4 !	! 2,7 !	! 1,1 !	! 0,2 !	! 0,1 !	! 3,9 !	! 2,56 !
! 11 !	! 12,7 !	! 8,6 !	! 18,1 !	! 28,6 !	! 13,8 !	! 8,2 !	! 0,4 !	! 0,3 !	! 2,0 !	! 2,40 !
! 12 !	! 16,9 !	! 21,6 !	! 45,0 !	! 1,8 !	! 4,0 !	! 1,7 !	! 0,6 !	! 0,8 !	! 1,8 !	! 1,85 !
! 13 !	! 14,2 !	! 24,8 !	! 46,7 !	! 2,0 !	! 3,1 !	! 1,3 !	! 0,4 !	! 0,4 !	! 1,5 !	! 1,77 !
! 14 !	! 25,1 !	! 24,8 !	! 37,7 !	! 1,9 !	! 0,0 !	! 0,7 !	! 0,3 !	! 0,3 !	! 3,0 !	! 1,63 !
! 15 !	! 13,8 !	! 28,3 !	! 49,5 !	! 1,7 !	! 2,3 !	! 0,9 !	! 0,2 !	! 0,3 !	! 1,4 !	! 1,54 !
! 16 !	! 25,5 !	! 24,3 !	! 38,0 !	! 2,2 !	! 1,2 !	! 0,8 !	! 0,4 !	! 0,3 !	! 4,1 !	! 1,87 !
! 17 !	! 24,6 !	! 24,8 !	! 42,0 !	! 2,6 !	! 1,2 !	! 0,7 !	! 0,3 !	! 0,4 !	! 2,6 !	! 1,86 !

n° chant.	A	L	L	50 100	100 200	200 500	500 1000	1000 2000	H	M
18	13,9	8,8	16,8	36,1	12,3	1,3	0,5	0,6	2,3	2,04
19	8,4	5,0	9,7	31,4	37,3	0,8	0,3	0,3	1,6	1,99
20	17,3	22,9	48,2	3,2	0,5	0,6	0,5	0,9	2,6	2,42
21	8,4	4,6	10,1	26,8	41,4	2,1	0,2	0,2	1,5	2,16
22	12,8	26,9	46,9	2,3	3,5	1,9	1,1	1,1	1,4	2,04
23	14,1	22,6	49,0	2,0	3,5	1,7	0,9	1,0	1,4	1,59
24	52,8	23,9	13,9	1,8	1,1	0,5	0,4	1,1	5,6	3,26
25	40,7	18,0	14,7	2,8	1,9	1,5	2,0	6,9	6,2	2,88
26	17,9	21,9	47,6	1,6	0,4	0,3	0,3	6,5	1,5	1,67
27	19,7	26,2	39,4	2,6	1,2	0,5	0,3	0,3	2,6	1,64
28	14,8	23,3	38,2	2,7	6,8	3,5	1,9	3,3	1,2	0,79
29	10,7	18,6	28,4	8,9	21,4	5,4	1,2	1,3	0,8	1,13
30	12,5	27,1	45,5	2,1	4,9	1,4	0,4	0,3	0,9	1,65
31	15,1	24,4	29,9	3,5	12,5	4,7	2,1	2,6	1,2	1,29
32	17,3	27,9	38,9	3,9	1,4	0,8	0,7	1,9	2,0	1,06
33	25,2	21,9	29,7	5,3	2,8	1,2	1,5	3,4	3,6	3,21
34	22,3	26,3	38,6	2,1	1,6	0,7	0,4	0,6	3,2	2,06
35	39,1	22,2	19,6	2,3	2,9	1,4	0,6	0,7	6,1	4,74
36	22,8	24,8	37,7	2,4	1,5	1,5	0,7	0,3	3,6	1,70
37	24,6	24,8	42,0	2,6	1,2	0,7	0,3	0,4	2,6	1,36
38	27,1	26,9	35,4	1,7	1,0	0,5	0,3	0,6	3,7	0,84