HAL
open science

Utilisation de la sonde gamma dans l'étude du comportement d'un sol agricole soumis au roulage

Thérèse Perrin

To cite this version:

Thérèse Perrin. Utilisation de la sonde gamma dans l'étude du comportement d'un sol agricole soumis au roulage. [Stage] Université Pierre Mendès-France (Grenoble 2), Grenoble, FRA. 1978, 78 p. hal-02859311

HAL Id: hal-02859311

https://hal.inrae.fr/hal-02859311

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.

CENTRE DE RECHERCHE AGRONOMIQUE

STATION DE SCIENCE DU SOL

AVIGNON

UNIVERSITE SCIENTIFIQUE ET MEDICALE

MAITRISE SCIENCE ET TECHNIQUE

GRENOBLE

TH-1140

TH-BD4

UTILISATION DE LA SONDE GAMMA DANS L'ÉTUDE DU COMPORTEMENT D'UN SOL AGRICOLE SOUMIS AU ROULAGE

INRA
STATION DE SCIENCE DU SOL
12 JUIL 1991
Domaine St-Paul - B.P. 91
84140 MONTFAVET

Rapport de stage

THÉRÈSE PERRIN

1978

ERRATA.

Pages

III : lire W_s au lieu de N_s comme symbole du poids de solide.

6 : définition de la densité sèche ; lire "rapport du poids volumique sec de l'échantillon au poids volumique de l'eau, le poids volumique sec de l'échantillon étant lui-même le rapport du poids sec à 105° au volume total humide".

38 : inveser les numéros I et 3 désignant les différents profils d'ornières.

50 : légende de la figure X 5

——————— à 18 cm de l'axe

—— —— —— zone non perturbée

---------- sous la roue

69 : figure XV ; position des points A, B, C, D, E, F.

SOMMAIRE

	Pages
INTRODUCTION.	1
CHAPITRE I.	3
Bibliographies - Notions nouvelles	
I.1. Définitions diverses	3
I.2. Courbe Proctor	6
I.3. Influence de la matière organique sur les propriétés mécaniques des sols.	7
I.4. Différents profils d'ornière.	7
CHAPITRE II.	
Présentation des essais.	9
II.1. Caractéristiques du terrain.	9
II.1.1. Situation des parcelles	9
II.1.2. Analyse granulo-dosage en matière organique	9
II.1.3. Essai Proctor	10
II.2. Descriptions des essais et mesures in situ	11
II.2.1. Préparation du terrain	11
2.1.1. Travail du sol	11
2.1.2. Humidification	11
2.1.3. Aspérimétrie	12
2.1.4. Passage de la remorque	12
II.2.2. Mesures	12
2.2.1. Localisation des mesures	12
2.2.2. Mesures de densité	13
2.2.3. Mesures de teneurs en eau	14
2.2.4. Difficultés rencontrées	15
2.2.5. Possibilités et limites de la sonde à rayons gamma.	16

Pages

CHAPITRE III.

Analyse des résultats. 18

III.1. Teneurs en eau 18

III.2. Aspérimétrie 19

III.2.1. Fond de travail 19

III.2.2. Corrections de profondeur 20

III.2.3. Appréciation du tassement par aspérimétrie 20

2.3.1. Première hypothèse : tassement vertical sous la roue 20

2.3.2. Deuxième hypothèse : augmentation moyenne de densité. 22

III.3. Mesures de densité à la sonde à rayons gamma 23

III.3.1. Courbes densité sèche-profondeur 23

III.3.2. Répartition des densités dans le sol 25

3.2.1. Hypothèse 2.3.1. : Tassement vertical dans l'axe. 25

3.2.2. Hypothèse 2.3.2. : Augmentation moyenne de densité. 26

3.2.3. Commentaires. 27

CONCLUSION. 30

ANNEXES. 33

FIGURES I à XV 37

TABLEAUX I à V 70

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 78

SYMBOLES UTILISES

A	:	Teneur en argile (%)
$\bar{\gamma}$	:	Densité humide
$\bar{\gamma}_d$	:	Densité sèche
$\bar{\gamma}_{d_{opt}}$	:	Densité sèche optimale
$\bar{\gamma}_s$	:	Densité de la phase solide
E_c	:	Energie de compactage (Proctor) (J/m^3)
hi	:	Cote du fond de travail (cm)
hg	:	Distance du fond de travail au creux de l'ornière (cm)
L	:	Longueur de la trace visible de la déformation (cm)
M.O.	:	Teneur en Matière Organique (%)
S	:	Surface du creux de l'ornière (cm^2)
w	:	Teneur en eau (%)
w_c	:	Teneur en eau au seuil hydrique de sensibilité au compactage (%)
w_{opt}	:	Teneur en eau optimale (%)
N_s	:	Poids de solide (N)

FIGURES - TABLEAUX

Figure I : Courbe Proctor - allure générale.
Figure II : Profils des principaux cas d'ornières.
Figure III : Courbes Proctor des matériaux A.T. et S.T.
Figure IV : Aspérimétrie - principe.
Figure V et VI : Sonde à rayons Gamma.
Figure VIII : Fuseau d'émission des rayons Gamma.
Figure IX : Mesures à la sonde dans un bi-couche.
Figure X : Profils hydriques du sol.
Figure XI : Profils des ornières des matériaux S.T. et A.T.
Figure XII : Aspérimétrie du fond de travail.
Figure XIII : Densité du sol avant et après roulage.
Figure XIV : Cartes de la compacité.
Figure XV : Représentation de l'état critique dans les axes (v.R.P.)

Tableau I : Analyse granulométrique - Dosage en matière organique.
Tableau II : Valeurs caractéristiques des courbes Proctor.
Tableau III : Valeurs relatives de l'augmentation de compacité sous la roue - hypothèse d'un tassement vertical.
Tableau IV : Mesures de densité sèche à la sonde.
Tableau V : Valeurs relatives de l'augmentation de compacité sous la roue calculées par mesure à la sonde - Hypothèse d'un tassement vertical.

INTRODUCTION

Ce stage a été effectué au Centre de Recherches Agronomiques du Sud-Est de Montfavet (Vaucluse), à la Station de Science du Sol et je remercie l'I.N.R.A. pour l'accueil que j'y ai reçu.

La croissance et le développement d'une plante sont tributaires de nombreux éléments extérieurs, caractéristiques de son environnement : produits nutritifs, qualités du sol, conditions météorologiques, éventuellement interventions de l'agriculteur. Les deux fonctions principales du sol -stockage des éléments nutritifs, support de la plante et des engins agricoles- ont été définies par A. FAURE (1978) :

" - La première fonction, finalité même de l'Agriculture, est d'assurer une bonne croissance de ce qui est cultivé. Par les différentes façons de préparer le sol et en tenant compte du jeu des saisons, l'agriculteur tente d'obtenir les meilleurs rendements, mais ses interventions sont commandées par la nature du sol et par les besoins intrinsèques de la plante.

- La deuxième fonction est déjà plus proche des préoccupations des géotechniciens : le sol est aussi le support des outils et il doit assurer une portance suffisante pendant toute l'année. Or les pressions sont variables, les passages peuvent être répétés et cette fonction support ne doit pas entraîner des tassements nuisant au bon développement de la plante".

Ce problème est d'autant plus préoccupant que la puissance de plus en plus grande des tracteurs entraine une augmentation des poids et des pressions au sol des tracteurs eux-mêmes et des véhicules tractés, (remorques, outils de travail).

Aussi est-il intéressant de tenter de quantifier cette variation de compacité due au passage des engins agricoles. Elle dépend de beaucoup de paramètres : pression subie par le sol, nature du terrain (granulométrie, présence de matière organique et de calcaire...), préparation préalable du terrain... C'est pourquoi une étude complète faisant varier ces

différents paramètres successivement et portant sur un nombre de cas représentatifs, permettrait d'avoir une vision assez précise du comportement d'un sol soumis au roulage.

Aussi l'optique dans laquelle a été fait ce stage a plutôt été celle d'une étude préliminaire, qui définirait les difficultés qui seront rencontrées et mettrait en évidence les moyens d'y remédier quand ils existent.

C'est ainsi qu'après une prise de contact avec certaines notions propres à l'étude des sols agricoles et les résultats déjà acquis (Chapitre I), nous étudierons les appareils et méthodes de mesures adoptés, notamment la sonde à rayons gamma, ses possibilités et ses limites (Chapitre II). Au chapitre III, nous analyserons les cas étudiés.

De cette analyse nous tâcherons alors d'étudier quels peuvent être les moyens de réduire les aléas et difficultés dûs aux conditions de travail in-situ de ce genre d'essais.

CHAPITRE I

BIBLIOGRAPHIES - NOTIONS NOUVELLES

La lecture d'ouvrages précédemment écrits sur le sujet nous a permis de prendre connaissance de certaines notions propres à l'étude des sols agricoles. Il existe en effet des différences de conceptions assez fondamentales entre les agronomes et les mécaniciens du sol Génie Civil, chacun étudiant le sol selon ses préoccupations et les buts à atteindre. Par exemple, les agronomes travaillent sur une profondeur de l'ordre du mètre, s'occupant principalement de la terre végétale, alors que celle-ci est toujours décapée en Génie Civil, et que les sondages peuvent atteindre plusieurs dizaines de mètres.

1. DEFINITIONS DIVERSES.

- Agrégats : "le tamisage à sec nécessite un broyage du matériau. Toutefois ce broyage doit être conduit avec précaution pour ne pas casser les grains de sable, de graviers, cailloux, etc... Il est convenu d'appeler agrégats les éléments passés à travers les mailles du tamis. Dans le cadre de cette étude, ces agrégats ont ainsi une taille maximale de 2 mm. Un agrégat est donc un assemblage plus ou moins résistant de grains de sable, et limons éventuellement et de particules d'argile. Il a donc nécessairement son propre indice des vides". (A. FAURE, 1978).

- Texture : c'est une caractéristique de la constitution des sols. Ceux-ci sont composés de grains dont l'arrangement détermine des vides définissant la porosité texturale.

- Structure : le sol peut également, selon son histoire, être fissuré, ou composé de mottes. Les espaces entre les mottes, ou laissés par les fissures définissent la porosité structurale. Rappelons pour mémoire que la méthode la plus classique permettant de calculer la porosité totale est celle du densitomètre à membrane et qu'une méthode de mesure de la porosité texturale a été déterminée par J.C. FIES, G. MONNIER, P. STENGEL (1973) ; celle-ci consiste en l'immersion d'agglomérats non fissurés et détermination de la poussée hydrostatique. Leur différence sur un volume unitaire donne la porosité texturale.

Au cours de ce stage, nous avons utilisé la sonde à rayons gamma, méthode plus récente que nous étudierons plus loin (Chapitre II). Cette sonde mesure une densité humide d'où possibilité de calculer la densité sèche et la porosité totale.

- travail du sol : les différents types de travail du sol sont les labours (charrues à soc et versoir, charrues à disque), les sous-solages et drainages-taupe (sous-soleuse, charrues-taupe), les quasi labours (extirpateur, scarificateur, cultivateur, fraises, rotavators, bèches rotatives).

Ces travaux du sol s'expliquent par une volonté d'amélioration du sol cultivé. Il existe en effet des facteurs naturels agissant sur la structure du sol de façon favorable ou défavorable pour la plante, en particulier en divisant la masse de celui-ci en éléments de plus petites dimensions.

"Cette action peut être très efficace ; elle est malheureusement variable suivant les conditions climatiques et l'utilisation du sol ; elle s'avère souvent insuffisante. C'est pourquoi, depuis longtemps, l'homme a utilisé des actions mécaniques exercées par diverses catégories d'engins pour amener le sol à l'état physique qu'il souhaite (...) (En travaillant le sol) l'agriculteur vise divers buts qui peuvent être regroupés sous les rubriques suivantes :

- destruction de la végétation adventice (indésirable) et, dans une certaine mesure, lutte contre le maintien ou la prolifération des parasites.

- enfouissement et mélange à la masse de terre des résidus de récoltes, des amendements et des engrais organiques ou minéraux.

- contrôle de la circulation d'eau dans le sol et en particulier accroissement de l'infiltration des pluies et de l'écoulement de l'eau saturante.

- création d'un état structural favorable à la germination des graines, à l'installation et au bon fonctionnement du système racinaire des végétaux cultivés" (S. HENIN, R. GRAS et G. MONNIER, 1969).

- Fond de travail : appelé également semelle de labour ou semelle de quasi labour, c'est la limite entre le sol non travaillé et le sol dont la structure a été modifiée par l'engin.

- Tassement : ce terme désigne une augmentation de compacité. "Quand la terre vient d'être travaillée, elle présente une porosité élevée due en grande partie aux espaces existants entre les mottes. Or il est indispensable pour assurer l'humectation de la graine, une activité suffisante des racines, et pour éviter certains accidents, comme la destruction des céréales par effet mécanique du gel, qu'il y ait un bon contact entre les mottes. Il faut, pour employer l'expression consacrée que la terre soit "rassise". On distinguera de ce point de vue, la terre compacte et la terre tassée. La terre compacte ne présente qu'une faible porosité ; non seulement les grains de terre sont au contact, mais il n'y a pas de vides entre eux. Au contraire, dans la terre tassée, bien que les différents éléments structuraux soient bien appliqués les uns sur les autres, ils laissent entre eux de nombreux petits vides permettant la circulation de l'air et de l'eau. Pour obtenir cet effet, il faut opérer sur une terre relativement sèche de manière qu'elle puisse supporter une certaine pression sans s'écraser et se ressouder à elle-même. D'autre part, les opérations agricoles impliquent le passage de charges parfois assez lourdes (récoltes, appareils de traitement, tracteurs). Les effets sont souvent très défavorables ; c'est pourquoi il faut aussi les considérer". (S. HENIN et al., 1969).

Comme ce texte a été écrit en 1969, on peut noter depuis lors une certaine évolution du vocabulaire. Notamment par l'expression "grains de terre", il faut vraisemblablement comprendre "agrégats" dont la définition a été donnée plus haut. Une terre compactée a donc perdu sa porosité structurale ; elle conserve néanmoins une porosité texturale.

- Tourbe (Encyclopédie) : faite d'un feutrage de fibres et de fragments végétaux noirs ou bruns, plus ou moins carbonisés par les bactéries, la tourbe est légère et poreuse (et d'autant plus combustible qu'elle est plus pure. Elle se forme dans les tourbières, espaces gorgés d'eau).

2. COURBE PROCTOR.

L'essai Proctor est un test de compactage dynamique permettant d'obtenir pour un niveau d'énergie donné, la valeur de la densité sèche (rapport du poids sec à 105°C de l'échantillon au volume total humide) en fonction de la teneur en eau (rapport du poids d'eau au poids sec à 105°C de l'échantillon). On trouvera décrits en annexe I les caractéristiques du moule ainsi que le mode opératoire.

La courbe Proctor complète (figure I) présente un profil caractéristique. Le début de cette courbe est peu étudié en Génie Civil, car l'utilité de cet essai dans cette discipline est de déterminer l'aptitude au compactage des sols. Pour l'agronomie, au contraire, ce tassement -rappelons que ce terme définit dans ce sens une augmentation de compacité- est à limiter.

La courbe Proctor se divise en trois phases définies de la manière suivante (A. FAURE, 1978) :

- Zone I : L'effet du gonflement de l'argile par apport d'eau est compensé par le concassage des agrégats qui sont à l'état fragile, donc par le réarrangement des grains. La conséquence en est une valeur approximativement constante de la densité sèche notée $\bar{\gamma}_d$, pour toute valeur de la teneur en eau inférieure au seuil hydrique de sensibilité au compactage, point w_c dépendant du matériau et de l'énergie appliquée.

- Zone II : A partir du seuil de sensibilité jusqu'au maximum Proctor le rôle lubrifiant de l'argile permet le réarrangement et la déformation des agrégats devenus plastiques ; aussi la densité sèche augmente avec la teneur en eau.

- Zone III : Après le maximum, le sol se liquéfie et la courbe, décroissante, tend vers la courbe de saturation d'équation

$$w = \frac{1}{\bar{\gamma}_d} - \frac{1}{\bar{\gamma}_s}$$ (où $\bar{\gamma}_s$ représente la densité de la phase solide).

Le rapport de la teneur en eau du seuil au pourcentage d'argile A dans le sol est constant à un niveau d'énergie donné et pour une argile donnée. Il est égal par exemple, à 0,32 pour les mélanges sable plus kaolinite calcique, compactés à l'énergie standard. Il a également été montré que cette constante est liée au taux de calcite et, surtout, au taux de matière organique.

3. INFLUENCE DE LA MATIERE ORGANIQUE SUR LES PROPRIETES MECANIQUES DES SOLS.

Les phénomènes relatifs à la matière organique sont actuellement étudiés par J. GUERIF. Il a pu cependant d'ores et déjà dégager certaines caractéristiques générales.

Il existe deux états de la matière organique. La matière organique libre est constituée par les débris végétaux d'origines diverses mélangés aux produits minéraux. La matière organique liée ne peut, elle, être décelée que par analyse chimique du sol. Elle résulte de la décomposition de la matière organique libre en molécules fixées à l'argile.

L'étude de l'influence de la matière organique est rendue difficile par la rapidité d'évolution de celle-ci. Néanmoins, on sait que la matière organique diminue généralement le risque de tassement des sols, en déplaçant le seuil hydrique de sensibilité au compactage et le maximum Proctor vers des valeurs de teneur en eau plus fortes, et en diminuant les compacités après compactage.

4. DIFFERENTS PROFILS D'ORNIERES.

"Une étude relativement récente a permis de montrer qu'il existe quatre types de comportement du sol soumis au passage d'un engin (fig. II).

Premier type.

L'engin ne laisse strictement aucune trace, c'est apparemment le cas le plus simple. Ce comportement est celui de tous les sols secs et quelle que soit leur granulométrie (...) Comme le sol n'a pas bougé, il n'y a aucune déformation ni aucun tassement.

Deuxième type.

La trace laissée par l'engin est celle représentée figure II.1. Ce comportement est celui des sols humides à faibles teneurs en argile. L'ornière, profonde de 4 cm environ, est souvent considérée comme négligeable, ce qui est une erreur : les mesures de poids volumique à différentes profondeurs en zone perturbée et en zone non perturbée ont montré que la compacité du matériau avait augmenté dans les 20 premiers centimètres environ, ainsi ce petit creux de 4 cm représente une perte de 20 points de porosité dans la couche considérée. Cette couche a donc subi

un tassement considérable, souvent difficile à récupérer car il affecte les niveaux textural et structural. Il est d'ailleurs d'autant plus dangereux qu'il n'est pas spectaculaire.

Troisième type.

La trace (figure II.2) présente des bourrelets peu élevés, montrant que le sol s'est déformé latéralement. Ce comportement est celui des sols humides à teneurs en argile comprises entre 25 et 40 %. L'ornière est plus profonde que précédemment. Une détermination des volumes par rapport à la surface initiale du sol montre que le volume du "creux" est supérieur à la somme des volumes des bourrelets, le bilan donnant un creux équivalent de l'ordre de 5 cm mais la profondeur apparente de l'ornière -haut du bourrelet au fond de l'ornière- est de l'ordre de 10 à 15 cm.

La mesure des poids volumiques à différentes profondeurs montre que la zone perturbée est plus profonde que précédemment, allant jusqu'à 40 cm, ainsi la perte globale de porosité dans cette couche est de 10 points seulement.

Le sol est plus perturbé que dans le cas précédent, tant en profondeur qu'en largeur, mais globalement le tassement est moins dangereux.

Quatrième type.

La trace est profonde (figure II.~~3~~1) et les bourrelets sont importants. La profondeur apparente est souvent de l'ordre du rayon des roues de l'engin, attestant que l'enfoncement n'a pu être plus profond parce que le chassis touchait le sol, diminuant la pression exercée au sol. Or le bilan des volumes déplacés est à peu près nul : le volume du "creux" par rapport à la surface initiale du sol est égal à la somme des volumes des bourrelets. La mesure des poids volumiques montre que la compacité est à peu près inchangée, il n'y a donc pas eu de tassement. Le sol a eu un comportement de matériau incompressible mais infiniment déformable. Ce type d'ornières est produit par les sols très argileux et très humides.

(...) Nous verrons que la limite entre "état humide" et "état sec" est (liée à la teneur en argile et) aussi liée à l'intensité de l'énergie développée pour tenter de tasser le sol". (A. FAURE, 1976).

Nous venons de rappeler quelques définitions de termes inhabituellement utilisés en Génie Civil et d'évoquer sommairement quelques conclusions d'études de l'action d'un véhicule à pneus sur les sols. Il nous est maintenant possible de présenter les essais que nous avons choisis et utilisés. Cette présentation est l'objet du Chapitre II.

CHAPITRE II

PRESENTATION DES ESSAIS

Il nous a été proposé d'étudier l'effet sur la compacité du passage d'un véhicule à pneus. Nous avions à notre disposition une remorque à un essieu et pneus lisses. Pour éviter la formation d'autres traces que celles de ces deux pneus, la remorque était tirée à l'aide d'un cable suffisamment long pour que le tracteur ne soit pas sur les parcelles étudiées.

1. CARACTERISTIQUES DU TERRAIN.

1.1. Situation des parcelles.

Les parcelles préparées pour ces essais se situent sur le domaine Saint Paul, appartenant à l'I.N.R.A.

Nous disposions d'un terrain divisé en deux parcelles, de même sol, l'une ayant été conservée dans son état naturel, (S.T.), l'autre ayant été enrichie en matières organiques par un apport de 2 % de tourbe (dosage souhaité) (A.T.).

1.2. Analyse granulométrique - dosage en matière organique.

Un prélèvement d'échantillons sur chacune des deux parcelles a permis d'en effectuer l'analyse granulométrique et le dosage en matière organique (tableau I).

Il est à noter que les deux parcelles contenaient de la matière organique libre autre que la tourbe (feuilles, racines, tiges, graines...) ainsi que de la matière organique liée, la teneur étant la même pour les deux sols.

1.3. Essai Proctor.

Afin de se donner une idée préalable du comportement du sol soumis au roulage, il a été effectué un test Proctor (on trouvera la description de la méthode propre au laboratoire d'Avignon en annexe I) sur un échantillon provenant de chacune des deux parcelles.

Nous avons donc obtenu les deux courbes de la figure III, où sont représentées en abscisse la teneur en eau w, en ordonnée la densité sèche $\bar{\gamma}_d$, le compactage se faisant à l'énergie standard de 588 KJ/m^3.

Les courbes présentent le profil caractéristique décrit chapitre I § 2 : zone de faible tassement, seuil hydrique de sensibilité w_c, zone de fort tassement, optimum Proctor, décroissance rapide en tendant vers la courbe de saturation. D'autre part, on voit très nettement l'influence du taux de matières organiques, qui se traduit par un décalage de la courbe A.T vers des valeurs de teneurs en eau plus élevées, et des compacités plus faibles. Ce décalage entraine une plage relative à la zone I très longue, et un accroissement après le seuil de sensibilité très rapide et très court (valeurs caractéristiques, tableau II).

L'analyse granulométrique ayant donné A = 33 % de teneur en argile et M.O. = 2,1 et 2,9 % de teneur en matières organiques, on peut calculer M.O./A et w_c/A. Une corrélation de coefficient r = 0,96 a été établie par A. FAURE et J. GUERIF (édition sous presse), reliant ces deux rapports dans le cas de sols naturels :

$w_c/A = 1,71\ M.O./A + 24,54$ où M.O./A est exprimé en %

Dans le cas des sols étudiés, on trouve :

ST : $w_c/A = 26,9$

AT : $w_c/A = 52$

ST : $1,71\ M.O./A + 24,54 = 35,8$

AT : $1,71\ M.O./A + 24,54 = 39,8$

Nos résultats ne sont pas compatibles avec les valeurs numériques déduites de la corrélation. Cet écart n'a pas manqué de nous surprendre, mais nous ne disposons d'aucun élément de réponse qui puisse nous guider dans la formulation de la plus élémentaire explication.

2. DESCRIPTION DES ESSAIS ET MESURES IN-SITU.

Le mode opératoire décrit ci-après a été effectué pour la remorque pleine ou vide, à plusieurs teneurs en eau, et sur chacune des deux parcelles AT et ST.

2.1. Préparation du terrain.

2.1.1. Travail du sol.

Le sol a été travaillé au rotavator, engin de quasi-labour donnant des mottes assez fines. De ce fait, après travail, la surface du sol est assez peu accidentée. La profondeur de travail de cet outil a été de 13 à 15 cm, mais il est apparu que cette profondeur n'a pas été suffisante pour détruire un fond de travail préexistant, légèrement plus profond et assez irrégulier.

2.1.2. Humidification.

Une aspersion contrôlée sur les deux parcelles ST et AT simultanément a permis d'amener le sol à la teneur en eau désirée. Le terrain a ensuite été bâché, et nous avons attendu trois jours avant d'effectuer les mesures afin que le sol se ressuie, c'est-à-dire que l'eau se répartisse de façon homogène. Vu l'importance de l'évaporation, la bâche a été remise le plus tôt possible après passage de la remorque, de façon à éviter des écarts trop importants de teneur en eau au cours d'un même essai, et enlevée progressivement.

Les faibles teneurs en eau ont été obtenues en laissant sécher le sol à l'air libre. Après un temps de séchage donné un deuxième bâchage a permis au matériau de rétablir une certaine homogénéisation de sa teneur en eau.

Lors de l'exploitation des résultats (chapitre III), nous observerons que l'allure des courbes de teneur en eau en fonction de la profondeur a contribué à la recherche du niveau du fond de travail, lorsque celui-ci n'apparaissait pas à l'observation directe ou aux mesures de densité ; en effet, l'eau semble se répartir entièrement entre la surface et le fond de travail, ce qui entraîne une teneur en eau sous la partie travaillée à la fois plus faible et plus constante.

2.1.3. Aspérimétrie.

Un relevé de l'aspect initial du sol était nécessaire pour deux raisons : se créer une ligne de cote d'origine permettant d'apprécier les variations de profondeurs avant et après passage de la remorque, et calculer les volumes déplacés.

Le procédé utilisé a été l'aspérimètrie (description en annexe II). Il permet un relevé de la surface par simple translation. La précision de l'appareil est directement liée à l'espacement des aiguilles, et dépend de la discontinuité de la structure du sol. Un cliché photographique, après correction des erreurs parallaxe à l'aggrandissement, en permet l'interprétation (figure IV).

2.1.4. Passage de la remorque.

Sur les parcelles, nous avons fait circuler une remorque (caractéristiques en annexe III) halée par un cable. Le relevé du profil des ornières ainsi créées s'est fait perpendiculairement à la direction de la remorque, aux endroits exacts où s'étaient faits les premiers relevés. Cett précaution élémentaire était nécessaire pour superposer les deux images.

Une étude préalable (D. BODDAERT, 1976) ayant montré que le sol ne se décomprimait pas de façon significative après passage, les mesures ont pu être étalées sur deux jours sans nuire à la validité des résultats.

2.2. Mesures.

2.2.1. Localisation des mesures.

Il a été effectué quatre séries de mesures pour chaque essai (schéma 1

- dans une zone très éloignée des ornières, figurant l'état initial du sol,
- à 25 cm de l'axe de la roue,
- à 12,5 cm ou 18 cm de l'axe de la roue selon la largeur de l'empreinte,
- sous la roue.

Les premiers essais ont montré que les résultats étaient identiques en zone éloignée et à 25 cm de l'axe ; nous avons donc regroupé ces mesures et nous les présenterons comme représentatives de la zone non perturbée.

Les mesures de teneurs en eau et de densité ont été effectuées sur une vingtaine de centimètres de profondeur, avec un pas de 2 cm.

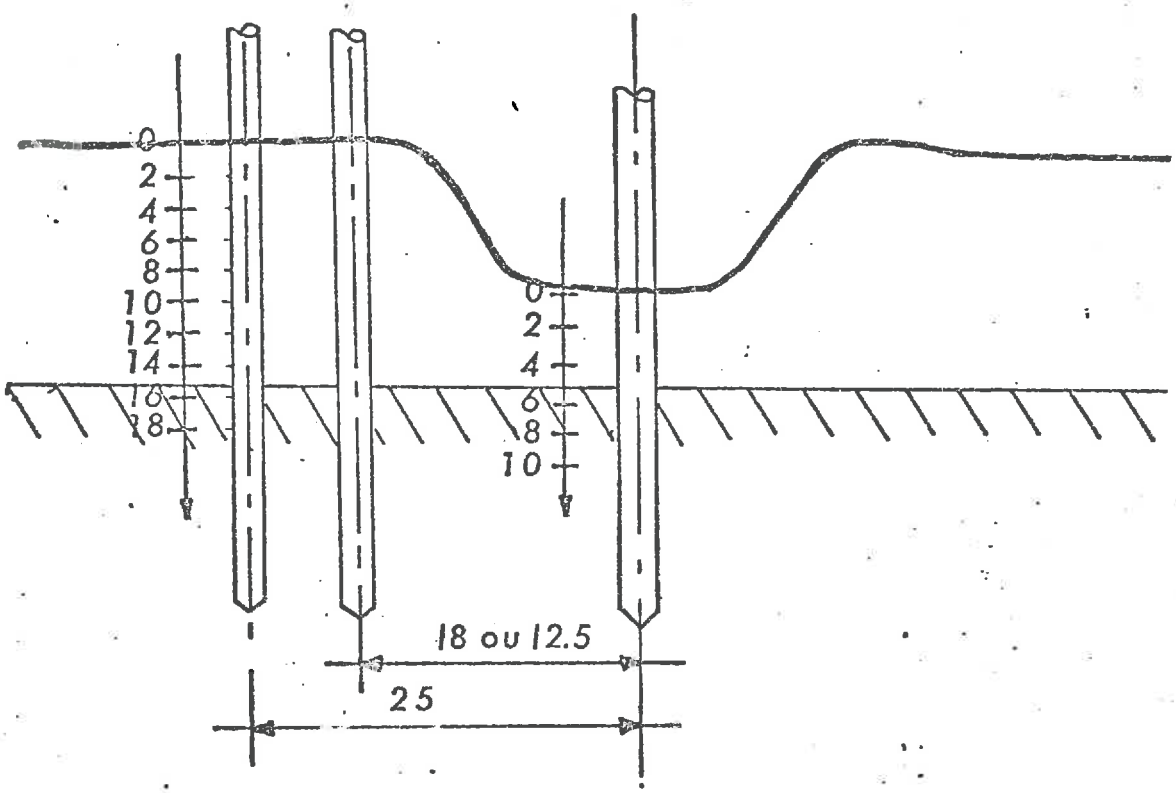


Schéma 1 situation des mesures

2.2.2. Mesures de densité.

L'appareil utilisé est une sonde à rayons γ, dont on trouvera une représentation figures V et VI.

Cette sonde mesure le temps nécessaire à un nombre prédéterminé de particules γ pour être reçues par le détecteur. La distance entre la source et le détecteur est fixée par le constructeur, ainsi ce temps est fonction de la quantité de matière rencontrée, solide ou liquide. A cause d'un

grand nombre de paramètres incontrôlables, il est nécessaire d'effectuer un test avant chaque série de mesures, la sonde étant placée dans un matériau de densité connue. Si T_o est la moyenne des temps enregistrés dans ce matériau connu et T le temps enregistré dans le sol à une profondeur donnée, la densité humide du matériau en place à cette profondeur est une fonction logarithmique du rapport de T à T_o, donnée par l'abaque de la figure VII.

Lors des mesures proches de la surface, une fraction des particules émises se disperse dans l'air et fausse les résultats. Pour éviter cette dispersion, une boite à sable d'une dizaine de centimètres et de densité proche de celle du sol est posée à la surface, simulant une hauteur de sol.

2.2.3. Mesures de teneurs en eau.

La détermination des valeurs de teneurs en eau était nécessaire pour deux raisons :

- sur le plan technologique, la teneur en eau nous permet de calculer la densité sèche $\bar{\gamma}_d$, la sonde ne mesurant que des densités humides $\bar{\gamma}$;

- sur le plan connaissance du sol, la teneur en eau est une des caractéristiques de l'état physique. C'est donc le couple ($\bar{\gamma}_d$, w) qui nous permettra de caractériser le sol, et de définir certaines grandeurs telles que le taux de saturation du sol et la porosité libre à l'air.

Deux procédés de prélèvement des échantillons ont été utilisés, selon les possibilités du sol :

- prélèvement à la tarière : l'enfoncement des deux branches de la sonde dans le sol sans perturbation a été assuré par deux "avant-trous" effectués à la tarière. Il a été possible lorsque le terrain était très humide de prélever l'échantillon directement sur cette tarière. Par exemple, pour avoir la teneur en eau à la profondeur 6, nous enfonçions la tarière du niveau 5 au niveau 7 et l'échantillon ramené était conservé dans une boite hermétique, jusqu'à la pesée et le passage à l'étuve.

- prélèvement direct : la méthode précédente n'est pas utilisable en terrain relativement sec et peu dense, car le sol ne "colle" pas à la tarière et retombe en grande partie au fond du trou. Aussi avons-nous dû opérer de manière légèrement plus primitive -mais surtout très destructrice- et procéder par décapage direct à la truelle avec prélèvement de matériaux tous les deux centimètres.

2.2.4. Difficultés rencontrées.

Au cours de ces différentes opérations, plusieurs difficultés se sont présentées.

Ainsi, pour respecter l'espacement et le parallélisme des trous, il était nécessaire d'utiliser un guide. Mais ce guide est constitué de deux trous percés dans une plaque assez lourde qui provoque toujours un enfoncement dans un sol travaillé, donc peu dense. Cet enfoncement difficilement évaluable dans certains cas est de l'ordre de 1 à 2 cm ; ceci nous a posé deux problèmes : celui de savoir si la mesure est suffisamment fine pour rendre ce tassement perceptible et jusqu'à quelle profondeur il se ressentirait, et celui de la correction de profondeur à faire par rapport au niveau donné par l'aspérimètre ; ce deuxième point a été résolu de façon arbitraire en prenant un enfoncement d'un centimètre.

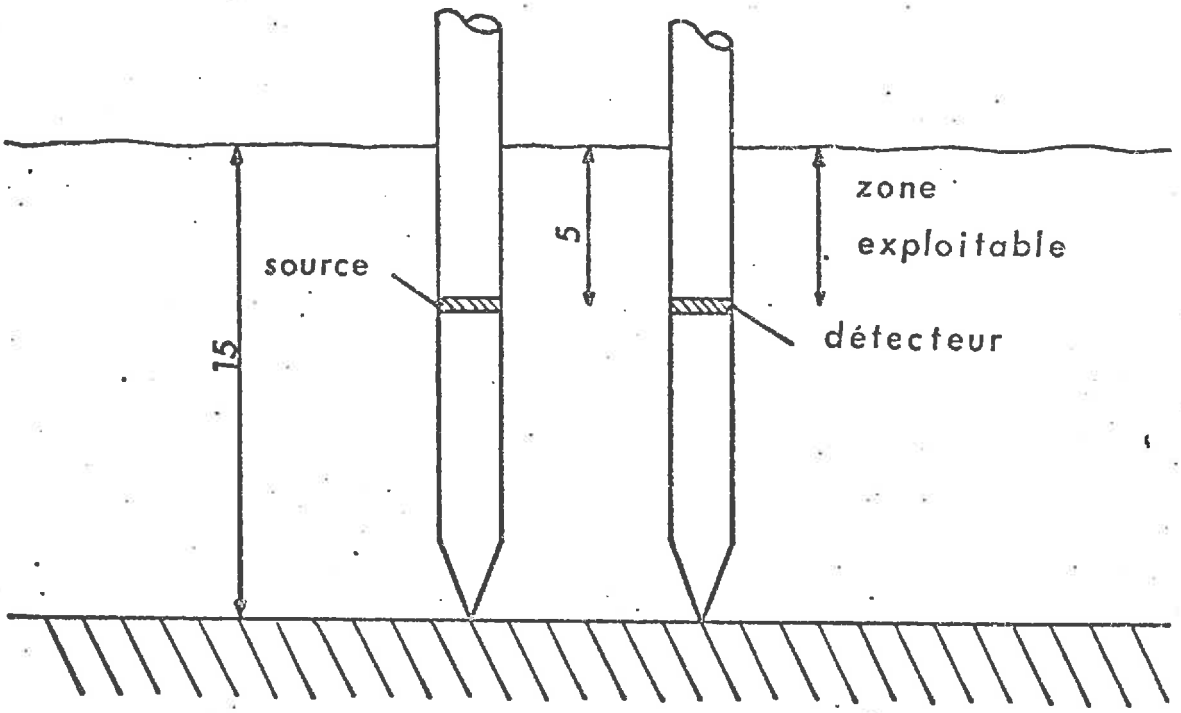


Schéma 2 : difficulté de pénétration en sol sec

Une difficulté plus importante est apparue en terrains secs. Nous disposions d'une troisième parcelle mise à l'abri de la pluie, sous serre depuis quatre mois. Ce matériau avait été travaillé de la même façon que les deux parcelles précédemment décrites (§ 2.1.1.). Ce travail lui a donné une structure motteuse, fine et friable. C'est ainsi qu'à chaque tentative de mesure, l'éboulement s'est avéré si considérable qu'il était impossible de creuser un trou à la tarière. Une solution avait été envisagée (cf. Conclusion), mais elle n'était pas réalisable dans le temps qu'il restait pour ce stage. Une autre possibilité aurait été d'enfoncer directement la sonde sans avant-trou, quitte à évaluer ensuite l'erreur commise due à un "bourrage" évèntuel entre les deux branches par comparaison avec des mesures au densitomètre à membrane ; par contre, cette méthode n'était pas réalisable dans le fond de travail, trop dense ; or, il nous fallait le pénétrer car émetteur et détecteur se trouvent à dix centimètres au dessus de la pointe de la sonde. Ainsi la zone mesurable se trouvait trop étroite pour que les résultats soient exploitables (schéma 2, page précédente).

2.2.5. Possibilités et limites de la sonde à rayons gamma.

Nous avons vu que les mesures à la sonde ont été faites avec un pas de deux centimètres. Or, lors de l'exploitation des résultats, le problème s'est posé de savoir si la sonde mesurait fidèlement la densité en un point, auquel cas une différence entre deux mesures serait toujours significative, ou si la précision de l'appareil ne permet d'obtenir qu'une allure générale de la courbe de la densité sèche en fonction de la profondeur

Afin de pouvoir exploiter convenablement les résultats de la sonde, il est bon d'examiner son fonctionnement de façon plus précise. Nous constatons tout d'abord que la source a une largeur de l'ordre de 2 à 3 mm, donc assez fine ; par contre, une étude de la sonde a montré que l'émission des particules ne se fait pas selon une direction rectiligne, mais se présente sous l'aspect d'un fuseau (cf figure VIII). On ne mesure donc pas la densité du sol en un point, mais sur une certaine largeur. Il est certain que la concentration des rayons est plus importante au centre du fuseau, mais la mesure à une profondeur donnée n'en reste pas moins influencé par le matériau situé au-dessus et au-dessous. Ce phénomène est particulièrement apparent lors de variations brusques de densité. Une étude avait

été faite dans un matériau bi-couche sable et baryte (figure IX). On voit très nettement le passage d'un matériau à l'autre ; cependant, il faut attendre 5 cm pour pouvoir estimer que la sonde mesure réellement la densité du sable sans être influencée par la densité plus forte de la baryte. Il semble évident que la zone d'influence est d'autant plus grande que la différence des densités est plus importante. Pour nos essais, cette particularité de la sonde n'entraine donc pas trop de risques d'erreurs à l'exploitation, puisqu'il ne se posera qu'au niveau du fond de travail, les variations de densité dans d'autres zones ne se faisant que de façon progressive.

Au niveau du comptage, nous avons constaté que deux enregistrements successifs dans des conditions rigoureusement identiques pouvaient parfois différer de deux secondes, pour une mesure de soixante dix secondes environ. Voici par exemple les dix mesures enregistrées successivement d'un test effectué dans du plomb, comme il a été décrit au chapitre 2.2.2 : 69.4 - 70.5 - 69.2 - 69.4 - 69.5 - 69.4 - 70.4 - 69.2 - 70 - 68.5 -. Cette difficulté a été réduite en prenant systématiquement la moyenne de deux enregistrements pour le calcul de la densité humide du sol, ou trois si l'écart entre les mesures dépasse une seconde. Il est malgré tout intéressant de savoir qu'une variation d'une seconde sur cinquante-cinq entraîne une variation de la densité de 0,03 et que la même variation pour un enregistrement de soixante dix secondes (valeurs courantes) entraîne une variation de 0,015 (ces calculs ont été faits pour une moyenne de test de 68,5).

La courbe de la figure IX présente à ce sujet un autre intérêt ; on trouve en effet, bien que le matériau soit relativement homogène, un écart extrême entre deux mesures de 0,04. Ce chiffre confirme les valeurs précédemment trouvées qui, bien que représentatives de variations assez faibles, seront à retenir pour l'exploitation des résultats.

Malgré les quelques inconvénients d'interprétation exposés plus haut, la sonde semble permettre des mesures, certainement plus précises que celles que l'on peut obtenir avec les méthodes classiques telles que le densitomètre à membrane. Elle présente comme deuxième avantage la possibilité de faire des mesures sur le profil avec un pas plus petit que ne le peut le densitomètre. Enfin, elle présente également l'avantage d'un matériel léger, maniable, très adapté au terrain. Il faut cependant rester prudents lors de l'analyse des résultats et toujours avoir en mémoire les limites de cet appareil inhérentes à son mode de fonctionnement.

CHAPITRE III

ANALYSE DES RESULTATS

Plusieurs essais ont été effectués, avec comme paramètres variables la teneur en eau, la pression au sol, et le taux de matière organique. Leur dénomination est la suivante (les teneurs en eau représentent des ordres de grandeur) :

Remorque vide :

- parcelle ST
  - $w = 16 - 20\ \%$: E_1
- parcelle AT
  - $w = 18 - 23\ \%$: E_2

Remorque pleine :

- parcelle ST
  - $w = 13 - 15\ \%$: E_3
  - $w = 18 - 21\ \%$: E_4
- parcelle AT
  - $w = 23 - 25\ \%$: E_5

1. TENEURS EN EAU.

On trouvera pour chaque essai le profil hydrique du terrain en zone non perturbée (figure X). Pour l'essai E_5, nous avons également tracé sur la même figure les courbes de teneur en eau sous la roue et à 18 cm de l'axe de l'ornière. Ces trois courbes montrent que la teneur en eau est restée la même après passage, donc que le tassement s'est produit uniquement par diminution des vides, sans consolidation. Cette constatation s'explique aisément par le très grand foisonnement initial dû au travail du rotavator.

Malgré une aspersion simultanée, les aléas dûs à la technique d'arrosage ne nous ont pas permis d'obtenir des teneurs en eau égales sur les deux parcelles AT et ST. Aussi ne pourrons-nous pas, contrairement à ce que nous aurions souhaité, faire apparaître l'influence de la seule matière organique sur le comportement de notre sol soumis au roulage.

2. ASPERIMETRIE.

Les photos d'aspérimétrie avant et après passage de la remorque ont permis d'obtenir les profils en travers, représentatifs des cinq essais précédemment décrits (figure XI).

On trouvera sur ces figures : une ligne représentant la cote zéro, le tracé exact du profil avant passage au niveau de l'ornière, et le profil après passage.

2.1. Fond de travail.

Le décapage du fond de travail nous a permis de constater visuellement l'irrégularité de celui-ci (figure XII). Pour plusieurs raisons, cette irrégularité nous a gêné lors de l'analyse des résultats ; par recoupement d'un certain nombre de données, nous avons pu retrouver la cote du fond de travail à chaque sondage ; il restait néanmoins que cette profondeur de travail fluctuante rendait difficile la comparaison des données, par exemple densité sous la roue et densité en zone non perturbée. Aussi avons-nous décidé pour les mesures de densité de considérer non pas la profondeur réelle, mais la profondeur rapportée à la cote du fond de travail; cet artifice de calcul ne compense pas le phénomène physique qui fait que le tassement n'est pas le même pour une profondeur travaillée de 15 ou de 17 cm ; il permet cependant de se ramener à un fond de travail considéré comme plan, ce qui facilite la comparaison des différentes mesures.

La figure XII nous permet de constater également que les aspérités du fond de travail ne sont absolument pas liées aux traces des ornières (le décapage avait été effectué après passage de la remorque, et perpendiculairement aux ornières). Le tassement n'a par conséquent affecté que la zone travaillée, sans conséquence pour le sol situé sous le fond de travail.

2.2. Corrections de profondeur.

Au cours des mesures effectuées sur le terrain, l'enfoncement de la sonde est repéré par rapport à la surface du sol, perturbé ou non (schéma § 2.2.1.) ; aussi la cote zéro nous donne-t-elle un repère absolu de ces mesures de profondeur, ce qui nous permettra de les comparer entre elles.

Pour avoir ces profondeurs absolues, il nous a fallu connaître la valeur du creux de l'ornière pour chaque essai. D'après les profils des figures XI, nous avons pu la mesurer, et nous avons pris la moyenne des quatre valeurs dont nous disposions par essai :

dénomination de l'essai	E_1	E_2	E_3	E_4	E_5
creux de l'ornière (cm)	4	4	6	6	9

2.3. Appréciation du tassement par aspérimétrie.

L'aspérimètre nous permet, pour des déformations planes ou axiales, de calculer des variations de surfaces, égales aux variations de volumes par unité de longueur. Compte tenu du fait que le poids du sol reste constant, nous pouvons déduire de ces mesures les valeurs des densités surfaciques. Mais il est nécessaire de connaître les limites du sol affecté par la déformation, ou la direction de celle-ci. L'aspérimètre ne nous donne qu'un bilan en déformation, et nous sommes conduits à émettre des hypothèses sur la zone tassée. Nous allons présenter aux § 2.3.1. et 2.3.2. deux de ces hypothèses, avec leur justification et les résultats auxquels elles conduisent.

Il est nécessaire tout d'abord de remarquer que dans notre cas, le profil de l'ornière ne présente pas de bourrelets latéraux. Il s'est donc produit un tassement entièrement appréciable par le volume du creux de l'ornière.

2.3.1. Première hypothèse : tassement vertical dans l'axe de l'ornière.

L'observation du pneu sur le terrain conduirait à penser qu'il s'est produit sous sa partie déformée une pression verticale sur le sol, créant dans cette zone un tassement vertical (schéma 3).

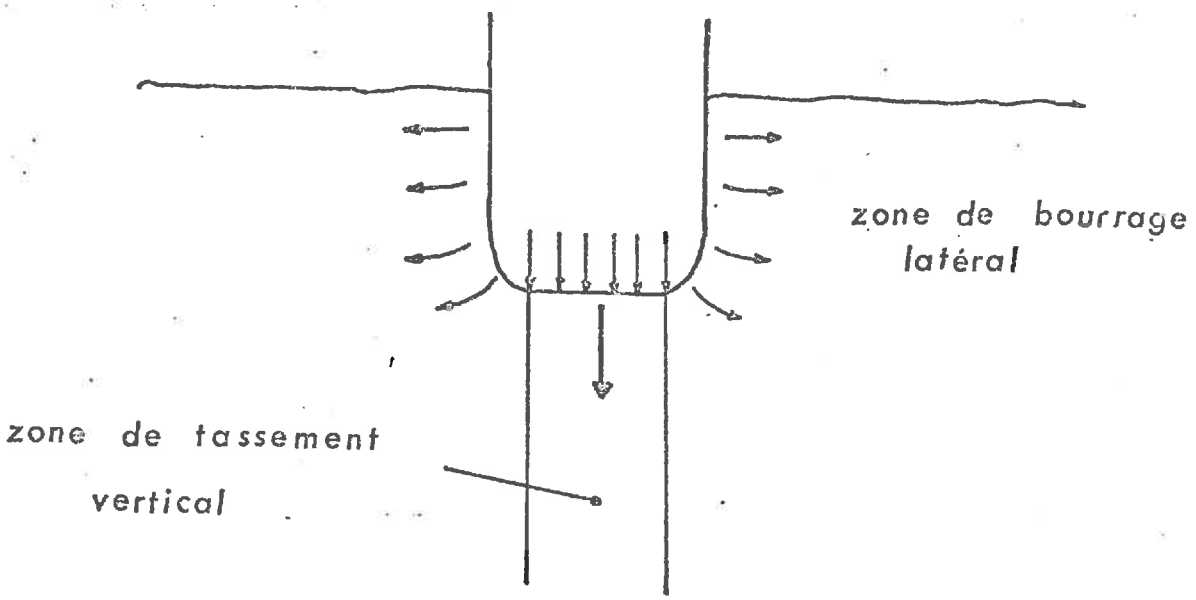


Schéma 3 : hypothèse du tassement vertical

On peut alors calculer dans l'axe de l'ornière l'augmentation de la densité moyenne de la couche travaillée, sachant (§2.1.) que la surface du fond de travail est la limite inférieure de la perturbation. Par comparaison avec l'augmentation de la densité moyenne sous l'axe calculée par les mesures à la sonde, nous verrons (§ 3) quelle peut être la validité de cette première hypothèse d'un tassement vertical.

Soit une colonne de sol, dans l'axe de l'ornière, de base dS et de hauteur h_i avant passage, et h_f après passage. La variation relative de densité sèche entre l'état initial et l'état final est :

$$\frac{\Delta \bar{\gamma}_d}{\bar{\gamma}_{d_i}} = \left(\frac{W_s}{h_f} - \frac{W_s}{h_i}\right) \cdot \frac{h_i}{W_s} = \frac{h_i - h_f}{h_f}$$

W_s représentant le poids de solide de la colonne.

Les résultats numériques calculés pour les essais E_1, E_2, E_4 et E_5 sont présentés dans le tableau III.

2.3.2. Deuxième hypothèse : augmentation moyenne de densité sous l'ornière.

La surface du creux de l'ornière nous permet d'évaluer une augmentation relative moyenne de densité, en prenant comme hypothèse que le sol n'est affecté que sous la trace visible de la déformation (schéma 4).

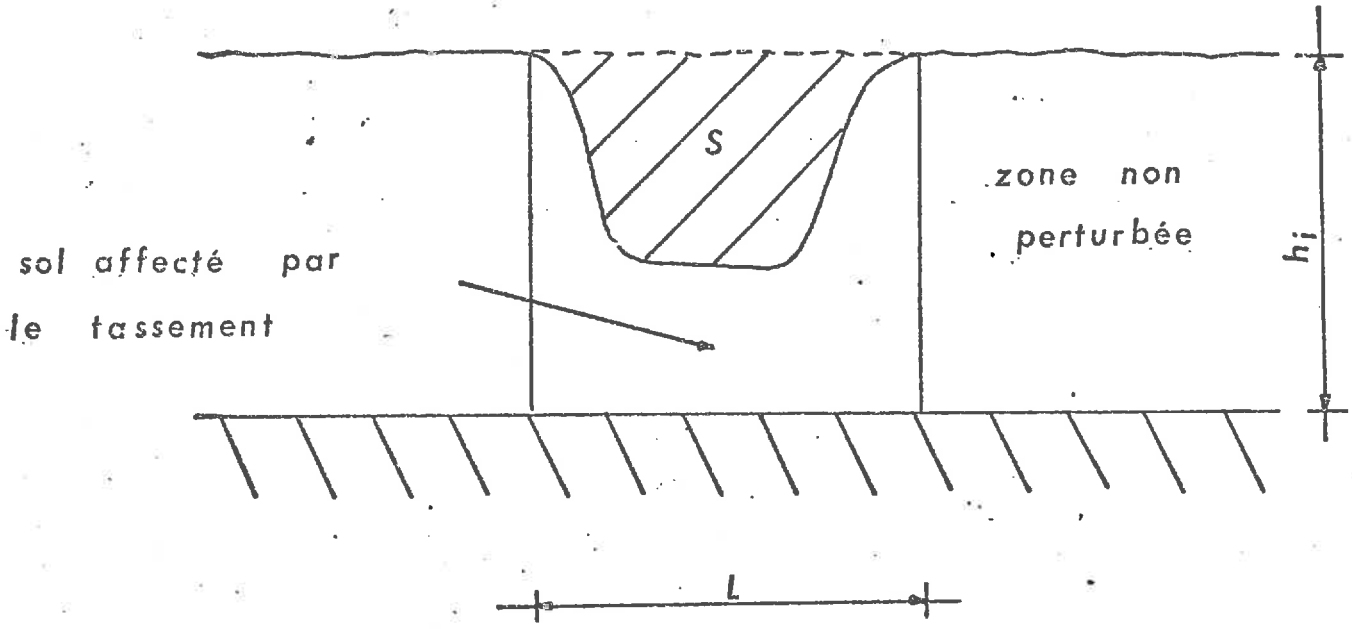


Schéma 4 : hypothèse du tassement sous l'ornière

Soit S la surface du creux de l'ornière, h_i la cote du fond de travail, et L la longueur de la trace visible de la déformation, on peut exprimer l'augmentation relative moyenne de densité dans le cas d'une ornière sans bourrelet :

$$\frac{\Delta \bar{\gamma}_d}{\bar{\gamma}_{d_i}} = \left(\frac{W_s}{L \cdot h_i - S} - \frac{W_s}{L \cdot h_i}\right) \times \frac{Lh_i}{W_s} = \frac{S}{L \cdot h_i - S}$$

Il nous a paru nécessaire d'évoquer cette hypothèse, car elle est souvent utilisée pour les calculs de tassement. Mais, il nous est apparu à l'analyse des mesures à la sonde qu'elle ne se vérifiait pas : le matériau s'écoule en effet hors de la trace visible de la déformation. Il aurait été intéressant de calculer ces résultats si nous avions pu les comparer à ceux obtenus par la sonde, et ainsi évaluer l'erreur commise en prenant cette hypothèse : cependant, nous ne disposions pas d'un nombre suffisant de points de mesure pour calculer une augmentation moyenne de densité à partir des résultats de la sonde.

3. MESURES DE DENSITE A LA SONDE A RAYONS GAMMA.

On trouvera (tableau IV) pour chaque essai et à chaque sondage les valeurs calculées des densités sèches en fonction de la profondeur. La dénomination "profondeur absolue" indique que les profondeurs citées dans ces tableaux sont toutes réfères à la cote zéro, compte tenu non seulement de l'ornière, mais aussi du tassement causé par la plaque ayant servi de guide à la tarière (1 cm). Nous avons également cité les profondeurs rapportées à la cote du fond de travail, abscisses des figures XIII. Après l'analyse de l'allure générale de ces courbes et de leurs particularités, les figures XIV nous permettront de mieux visualiser la répartition des densités dans le sol.

3.1. Courbes densité sèche-profondeur.

Un premier aperçu de l'ensemble des courbes nous permet de vérifier qu'il s'est effectivement produit un tassement dans tous les cas que nous avons étudiés ; ce résultat nous avait déjà été donné par l'aspérimétrie, puisque nous avions obtenu des ornières sans bourrelets latéraux. Nous

vérifions également que globalement, les phénomènes de tassement sont très nettement plus marqués dans le cas de sols humides ayant supporté de fortes charges : les creux des ornières sont plus profonds, et les courbes de densités plus régulières font apparaître des augmentations plus importantes.

Ces courbes confirment également une remarque qui avait déjà été faite par D. BODDAERT (1976) : dans le cas de sols humides, après passage de la remorque pleine, le tassement est tel que les valeurs de densités sous la roue sont sensiblement égales à celles du sol non travaillé ; l'effet de l'engin de travail se trouve ainsi annulé en certains endroits du champ par le passage de la remorque dont il faut noter la faible valeur de la pression au sol par rapport à celles couramment rencontrées. Il est donc important pour l'agriculteur de tenir compte de ce phénomène lors de l'organisation de ses interventions ; il pourra le faire dans une certaine mesure par le choix de la date de ses travaux, de la pression au sol exercée par ses engins, ou encore de la situation de leurs passages.

Particularités.

Une étude plus détaillée de ces mêmes courbes va maintenant nous permettre de dégager certains facteurs secondaires.

On remarque tout d'abord que pour la plupart des courbes, la première mesure, effectuée à deux centimètres de la surface du sol, indique une densité nettement plus faible que celle de l'ensemble de la courbe. Ce phénomène, qui pourrait s'expliquer dans le cas des fortes valeurs par une densité trop faible de la boite à sable (1.), ne peut être interprétée de cette façon dans le cas de faibles densités.

Il n'est pas impossible qu'il se soit produit une dispersion des particules dans l'atmosphère, due à une emprise trop faible de la boite à sable sur le sol. Ne pouvant pas corriger cette erreur systématique, nous avons été amenés à considérer ce premier point comme non représentatif. Néanmoins, cette faible valeur de la densité permet de constater que le léger enfoncement de la plaque lors du creusement des avant-trous n'a provoqué aucun tassement perceptible par la sonde.

Nous avons également remarqué sur un certain nombre de courbes une diminution brusque de la densité dans le tiers inférieur de la zone travaillée. Ce phénomène, qui se répète aussi bien en zone non perturbée que sous la roue ou en bordure de l'ornière, ne peut donc pas indiquer que le tassement ne se produit que sur les deux tiers supérieurs ; de plus,

d'autres courbes où ce phénomène n'apparaît pas nous montrent que le tassement affecte toute la zone comprise entre la surface et le fond de travail, aussi bien avec la remorque vide qu'avec la remorque pleine. Nous pensons donc, qu'il s'est produit un tassement sur les dix premiers centimètres lors de l'humidification ; il est en effet possible que l'eau en circulant vers le bas ait entraîné certaines particules de sol. Il aurait été intéressant d'étayer cette hypothèse par des mesures sur un sol n'ayant pas subi cette aspersion ; mais nous n'avons pas pu le faire à cause des difficultés d'enfoncement de la sonde en sol sec, difficultés décrites au chapitre II (§ 2.2.4).

3.2. Répartition des densités dans le sol.

Sur les figures XIV sont portées les valeurs moyennes de la densité en fonction de la distance par rapport à l'axe de l'ornière et de la profondeur rapportée au fond de travail. L'échelle de ces figures est choisie de façon à ce que la cote 1.00 des profondeurs relatives corresponde à la profondeur réelle du fond de travail observé sous la roue, ce qui nous permet de relever directement le profil de l'ornière, sans le modifier.

Les figures ainsi obtenues nous permettent de montrer la façon dont s'est produit le tassement, ainsi que la largeur de la zone affectée, mais nous allons tout d'abord examiner la validité des hypothèses prises au § 2.3.

3.2.1. Hypothèse 2.3.1. : tassement vertical dans l'axe.

Nous avons proposé en première hypothèse que le poids de solide d'une colonne de sol située dans l'axe de l'ornière reste constant ; nous pouvons calculer pour chaque essai, à l'aide des résultats donnés par la sonde, le poids de solide de cette colonne avant et après passage, puisque nous connaissons la densité de chaque volume élémentaire. On constate avec les résultats du tableau V que le poids de la colonne de sol n'est pas le même en zone non perturbée et sous la roue, mais diminue de 13 à 35 %. La perte de matière solide dans la colonne nous indique que l'hypothèse du tassement vertical dans l'axe de l'ornière n'est pas exacte. Nous avons cependant calculé les variations relatives de la densité moyennes correspondantes, pour avoir un ordre de grandeur de l'erreur commise ; les valeurs données dans le tableau V sont deux à cinq fois plus faibles que celles qui avaient été obtenues par l'aspérimètre avec cette première

hypothèse (tableau III). Bien que la méthode par aspérimétrie présente une grande incertitude pour des mesures de variation de densité, et que le terme de "densité moyenne" ne représente qu'une approximation relativement grossière de la réalité, l'importante différence des résultats obtenus par les deux méthodes, ainsi que le sens de cet écart, indiquent très nettement que cette hypothèse ne constitue pas une bonne approche du phénomène.

3.2.2. Hypothèse 2.3.2. : augmentation moyenne de densité.

Rappelons que cette deuxième hypothèse, couramment employée, impliquait que le tassement n'affecte que la zone située sous la trace visible de la déformation. Or nous constatons sur les figures XII et XIV que globalement, la densité du sol sous le bord de l'ornière est comprise entre celle de la zone non perturbée et celle du sol sous la roue. Il apparaît donc que la zone affectée par le tassement est en réalité plus large que la trace visible de la déformation ; la deuxième hypothèse ne peut donc non plus être retenue.

Il est bien évident que ce résultat n'est pas généralisable, puisque nous n'avons pas effectué de mesures analogues dans le cas d'ornières avec bourrelets ; la trace visible de la déformation serait plus grande, alors que pour une même déformation, le tassement serait moins important ; il faudrait donc pour tirer des conclusions d'ordre plus général, effectuer d'autres séries de mesures avec un sol plus humide, et une autre granulométrie.

Les mesures de densité nous ont montré que les hypothèses qu'il est possible de prendre pour calculer des variations de densité au moyen du seul aspérimètre ne sont pas satisfaisantes dans tous les cas ; cet appareil ne peut nous donner que des appréciations qualitatives sur les tassements (ornières avec ou sans bourrelets), et quantitatives sur les déformations (profondeur du creux de l'ornière, largeur de l'ornière). Par contre, il est pour ces différentes raisons, un élément indispensable en complément d'un appareil de mesure de densité, tel que la sonde à rayons gamma.

3.2.3. Commentaires.

Il nous a été difficile pour plusieurs raisons de tirer des conclusions des différentes coupes du sol (figures XIV). Tout d'abord, il aurait été nécessaire d'avoir un plus grand nombre d'essais pour analyser de manière générale le comportement du sol soumis au roulage. Cependant, les essais effectués auraient permis d'obtenir des conclusions partielles, ou d'émettre des hypothèses qu'une étude approfondie aurait infirmées ou confirmées, si une variation plus rigoureuse des paramètres avait été respectée. Ceci n'a pas été fait pour deux raisons : d'une part, la maîtrise de ces paramètres est rendue difficile par les possibilités de réalisation pratique sur le terrain ; d'autre part, c'est seulement en tenant compte des difficultés rencontrées au cours des essais, et des résultats partiels obtenus, que nous avons pu nous faire une idée plus nette de la façon dont les essais futurs devraient être menés.

Aussi nous ne nous attarderons pas spécifiquement sur ces coupes, et allons étudier de manière plus générale ce que leur confrontation avec les documents déjà cités nous a permis de conclure sur le phénomène de tassement.

- largeur de la zone affectée : si l'on veut connaître avec précision la largeur de la zone affectée, il faut faire un quadrillage très fin de la zone autour de l'ornière. Bien que ne l'ayant pas fait, nous avons pu voir que la largeur de la zone affectée est plus importante que la trace visible de la déformation ; pour les essais avec la remorque vide, nous savons qu'elle se situe entre 13 et 25 cm de chaque côté de l'axe de la roue, puisque les densités en zone non perturbée et à 25 cm de l'axe sont identiques ; mais n'ayant pas fait de mesures analogues avec la remorque pleine, nous savons seulement que la zone perturbée est à plus de 18 cm de chaque côté.

- influence de la teneur en eau : nous pouvons comparer les essais E_3 et E_4 qui sont été effectués sur la parcelle ST, avec la remorque pleine, le seul paramètre variable étant la teneur en eau, de l'ordre de 10-14 % pour E_3n et 18-22 % pour E_4. Malgré une densité initiale du sol légèrement supérieure pour E_4, on observe des densités sous la roue à peine plus fortes, et une profondeur d'ornière identique dans les deux cas. Nous pourrions donc être amenés à penser que dans cette plage 10-22 %, la teneur en eau n'a pas une très grande influence sur le comportement du sol au roulage ;

nous serions par conséquent en deça du seuil hydrique de sensibilité au compactage, pour ce mode d'application d'énergie. Cette constatation est possible grâce aux résultats de BODDAERT (1976) pour lequel les courbes de variations, en fonction de la teneur en eau, de la compacité mesurée in situ après roulage, ont une allure tout à fait compatible avec l'allure générale des courbes Proctor.

- influence de la teneur en argile : nous n'avons pas fait varier ce paramètre, mais nous pouvons remarquer que, bien que le sol ait une forte teneur en argile (30 %), les profils des ornières ne correspondent pas au troisième ou au quatrième type (II § 4), qui présentent des bourrelets latéraux et sont caractéristiques des sols argileux humides ; en effet, les grandes classes d'ornières ont été établies sur des sols non travaillé En d'autres termes, les trois classes d'ornières sont applicables à des matériaux qui peuvent être considérés dans leur état initial comme continu et il est bien évident qu'un matériau récemment travaillé ne peut pas être considéré comme tel.

- influence de l'histoire du sol : la courbe PROCTOR, obtenue pour un niveau d'énergie donné, dépend en tout ou partie de l'histoire du matériau étudié. Le protocole de préparation des matériaux (broyage, tamisage) vise à limiter l'influence de celle-ci, par destruction de l'arrangement des agrégats. La courbe PROCTOR est alors unique, caractéristique de la texture du matériau. Or in-situ, que le sol ait été travaillé ou qu'il soit "rassis", il a déjà subi des modifications dont l'ensemble constitue son histoire et influe sur son comportement. Le sol travaillé, très fortement soufflé pourrait donc être caractérisé de "compressible", au sens de l'école de CAMBRIDGE. D'après la théorie de l'état critique de cette école le comportement du matériau dépend de l'état de contraintes initiales, du volume massique, et du chemin de contraintes suivi par le matériau. Dans les axes (volume massique v - déviateur de contraintes R - pression isotrope P-, on définit le "mur de l'état critique", surface verticale (axe vertical : R) situé au-dessous de la "courbe de l'état critique" qui sépar l'espace des axes (v-R-P) en deux zones correspondant à deux grands types de comportement des matériaux ;

- comportement compressible : c'est celui des matériaux situés dans la zone I (figure XV) ; ils sont à l'état meuble et se comportent comme un milieu "vérouillable" le long de AB, et de façon élastique le long de BC jusqu'à ce qu'ils aient atteint l'état critique au point C.
- comportement fragile : c'est celui des matériaux situés dans la zone II ; ils sont à l'état dense et se comportent comme un milieu rigide le long de DE, et de façon élastique le long de EF pour atteindre l'état critique au point F.

Nous n'avons pas étudié plus précisément cette théorie, mais l'aperçu que nous venons de donner semble bien correspondre aux observations que nous avons pu faire sur les ornières en sol meuble et en sol non travaillé.

CONCLUSION

Le sujet de ce stage comprenait l'étude des perspectives nouvelles offertes par l'emploi d'un appareil de mesures de densités encore peu utilisé, la sonde à rayons gamma, pour caractériser le comportement d'un sol soumis au roulage. Cette étude s'est appuyée sur un certain nombre d'essais effectués sur le terrain, et nous a permis de déterminer les difficultés et les avantages que présente cet appareil, et le type d'essais choisi. Nous avons également tenté d'émettre des hypothèses sur les possibilités de remédier à ces difficultés, ainsi que sur le comportement du sol soumis au roulage et qu'il conviendra de vérifier par une étude plus complète.

La plus grande difficulté concernant l'utilisation de la sonde s'est présentée en terrain sec et meuble. Nous avons vu en effet que le sol s'éboulait lors du creusement des avant-trous à la tarière, et que l'enfoncement direct de la sonde sans ces avant-trous n'était pas possible à cause du fond de travail. Une solution consisterait à effectuer un tubage des trous, qui retiendrait le sol sans le perturber. Les deux tubes utilisés, d'un matériau à déterminer et de diamètre intérieur légèrement supérieur à celui des branches de la sonde, seraient munis d'une trousse coupante afin de pouvoir les enfoncer facilement même dans un sol assez dense. La terre située à l'intérieur des tubes pourrait alors être enlevée à la tarière, et la sonde enfoncée sans difficultés. Pour ne pas perturber la validité des mesures, il serait nécessaire, soit de calculer l'influence de la densité de ces tubes, et de corriger les mesures en conséquence lors de l'exploitation des résultats, soit d'étalonner directement la sonde équipée de son tubage, par une série de mesures dans des matériaux de densité connue. Cette solution permettrait, après perfectionnement du mode opératoire, d'obtenir des résultats en sol sec, ce qui élargirait le champ d'investigations proposé.

Du point de vue expérimental, pour étudier avec précision le comportement du sol, il est nécessaire de posséder un grand nombre de résultats.

Tout d'abord, il faut pour un essai donné, faire un quadrillage fin de la zone étudiée. Du point de vue profondeur, il semble qu'un pas de deux centimètres soit suffisant : d'une part un pas plus petit exigerait une précision telle qu'elle ne peut plus être du domaine d'un appareil de terrain, d'autre part une précision plus grande n'apporterait sans doute aucun renseignement supplémentaire quant à l'interprétation des résultats. Par contre, il est nécessaire pour cette étude de réduire la distance entre deux mesures, afin de déterminer la zone globalement affectée par le tassement, les courbes de répartition des "iso-densités", ainsi que la zone dans laquelle ce tassement est trop important pour la plante. Le problème qui se pose est celui des mesures à effectuer entre l'axe et le bord de l'ornière : le sol n'est alors pas horizontal, il faudrait trouver un système qui maintiendrait la plaque horizontale, et repérer de façon très précise l'enfoncement de la sonde.

Il faut également, pour déterminer l'influence de chacun des paramètres, les faire varier isolemment sur un large éventail. Or nous avons vu que nous ne possédions qu'une maîtrise très relative des différents paramètres : le sol n'est homogène ni en densité initiale, ni en teneur en eau, le fond de travail est irrégulier. la teneur en matière organique est difficilement contrôlable ; de plus, nous ne disposions pas de moyens assez puissants pour appliquer des pressions au sol se rapprochant de celles couramment utilisées.

Ceci nous amène à envisager la possibilité d'une simulation à échelle réelle, dans un lieu qui permettrait de posséder une bonne maîtrise de la mise en oeuvre de l'essai, et faciliterait les conditions d'observations et de mesures. Deux possibilités s'offriraient alors à l'expérimentateur :

- celui-ci pourrait faire une étude statistique en prenant des sols naturels, et en recréant des conditions très proches de la réalité ; l'avantage serait alors que les manipulations seraient facilitées, et que l'expérimentateur aurait des moyens de bien maîtriser les paramètres.

- il pourrait également faire une étude théorique qui porterait sur des sols "artificiels", et des conditions idéales : interface très marqué entre la zone travaillée et la zone non travaillée, densité initiale

homogène.... Il est évident que si cette solution permet une étude rigoureuse, elle poserait d'autres problèmes, d'une part d'interprétation car les lois de la mécanique des milieux continus ne peuvent pas s'appliquer directement à un sol possédant une telle porosité, d'autre part de transposition aux cas réellement rencontrés.

Le mécanisme du tassement des sols travaillés est encore assez mal connu : du point de vue théorique, l'étude est rendue difficile par la grande porosité libre à l'air, et du point de vue expérimental, les méthodes utilisées jusqu'alors n'étaient pas assez fines. Il nous semble après ce stage que l'emploi d'appareils tels que la sonde à rayons gamma est un apport important pour la compréhension du comportement des sols.

ANNEXE I

ESSAI PROCTOR

1. Caractéristiques du moule.

Il a été utilisé pour cet essai un moule de dimensions réduites par rapport au moule normalisé afin de faciliter les manipulations, mais de proportions telles que l'énergie standard E_c soit conservée.

L'énergie mise en jeu résulte de la chute d'une dame de poids P tombant d'une hauteur h sur un nombre n de couches, et N fois par couche. Son expression est la suivante :

$$E_c = \frac{p \cdot h \cdot n \cdot N}{\text{volume du moule}} \quad \text{en } J/m^3$$

Valeurs caractéristiques du moule :

	normal	réduit
Rapport surface dame-surface base	0,09	0,25
Volume du moule v (m^3)	$0,947\ 10^{-3}$	$0,3\ 10^{-3}$
Hauteur de chute h (m)	0,305	0,20
Poids de la dame p (N)	24,43	9,81
Nombre de coups par couche N	25	30
Nombre de couches n	3	3
Energie totale E_c (kJ/m^3)	590	588

2. Préparation du sol - mode opératoire.

L'échantillon prélevé (20 kg) est broyé à sec, puis tamisé à deux millimètres. Le sol est ensuite préparé en autant d'échantillons de 600 g que de points prévus sur la courbe, chacun étant humidifié de façon à faire varier graduellement la teneur en eau de 1 %. Chaque échantillon est ensuite compacté dans le moule Proctor, après homogénéisation de 24 à 48 h.

Puis il est démoulé, en prenant soin de le conserver entier, pesé, et passé à l'étuve pendant 24 h. Après une nouvelle pesée à sa sortie de l'étuve, nous pouvons calculer directement la densité sèche $\bar{\gamma}_d$ après compactage, et la teneur en eau correspondante. L'allure générale de la courbe ainsi obtenue a été décrite au paragraphe 2 du premier chapitre.

ANNEXE II

ASPERIMETRE

Cet appareil est destiné à relever simultanément et sur une même ligne les cotes du microrelief observé en plein champ.

L'aspérimètre utilisé au cours des essais est constitué d'une barre horizontale de 3,00 m de long sur laquelle coulissent des aiguilles verticales de 70 cm de hauteur, espacées de 2,5 cm. Il est maintenu au sol par deux supports verticaux, fixés pour toute la durée de l'essai et placé perpendiculairement à la direction de roulage de la remorque.

Les aiguilles sont mises en place de façon à être juste en contact avec les aspérités de surface du sol et une photographie de leur partie supérieure permet par simple translation d'obtenir une image de la surface.

Par comparaison des différentes aspérimétries, il est donc possible de calculer les variations de volume dues au passage de la remorque.

ANNEXE III

CARACTERISTIQUES DE LA REMORQUE

1) Poids

poids à vide : 250 kg
poids en charge : 1 250 kg

2) Pressions de gonflage

remorque vide : 2 bars
remorque pleine : 3 bars

REMARQUE :

Nous ne nous sommes pas préoccupés de déterminer avec exactitude la pression exercée au sol par la remorque vide ou pleine. Néanmoins, notons pour mémoire qu'en général cette pression au sol est différente de la pression de gonflage. Dans le cas de charges par roue supérieures à 500 kg environ, il existe une abaque permettant de déterminer la pression de contact pour des pneus dont on connait la surface d'empreinte au sol.

FIGURE I

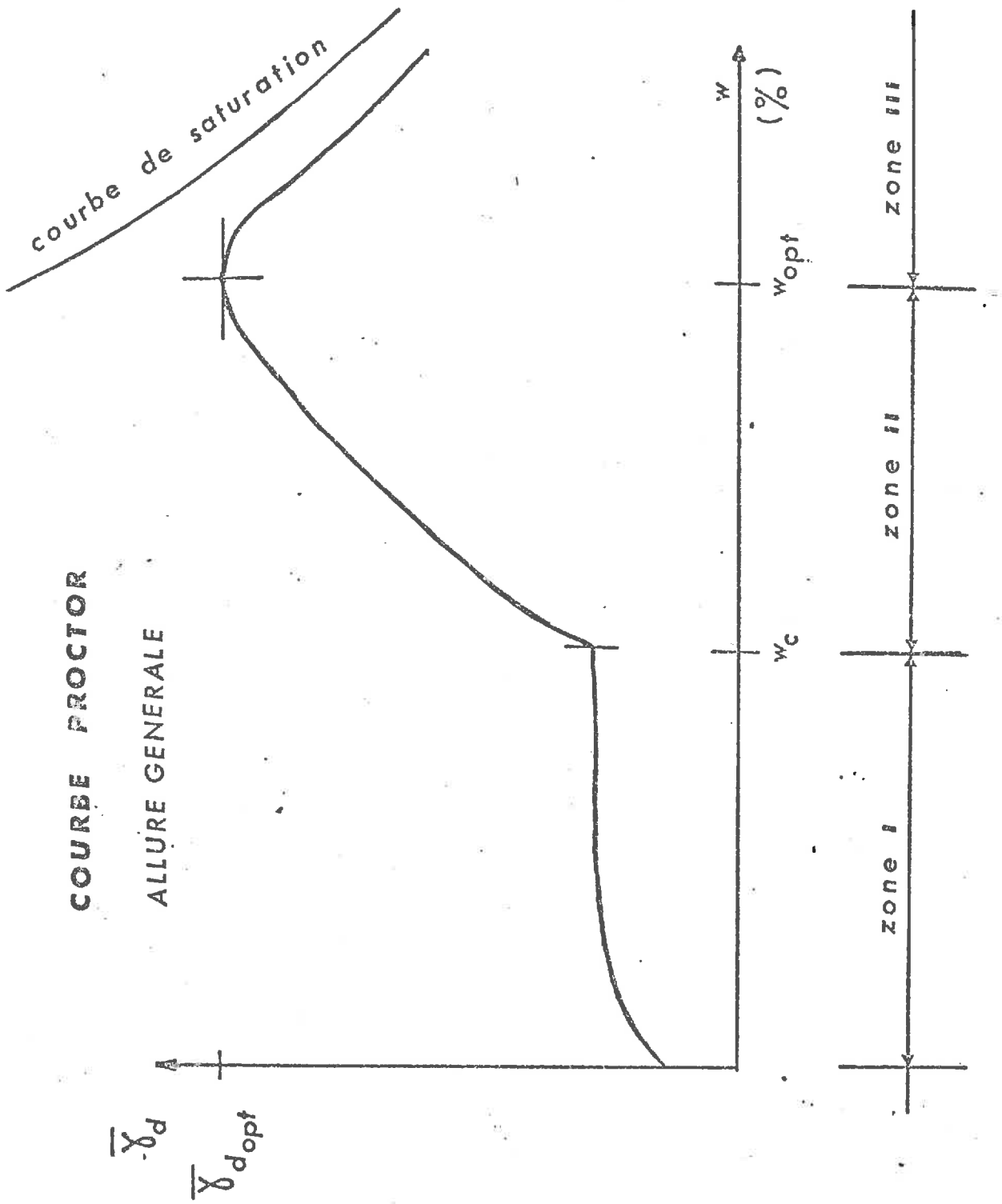
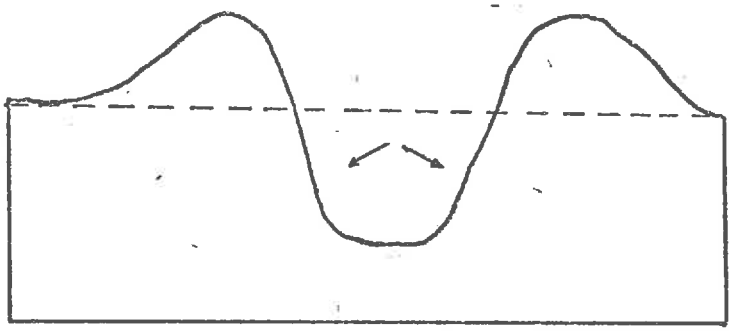

COURBE PROCTOR
ALLURE GENERALE
courbe de saturation
$\overline{\gamma}_d$
$\overline{\gamma}_{d_{opt}}$
w
(%)
w_c
w_{opt}
zone I
zone II
zone III

FIGURE II

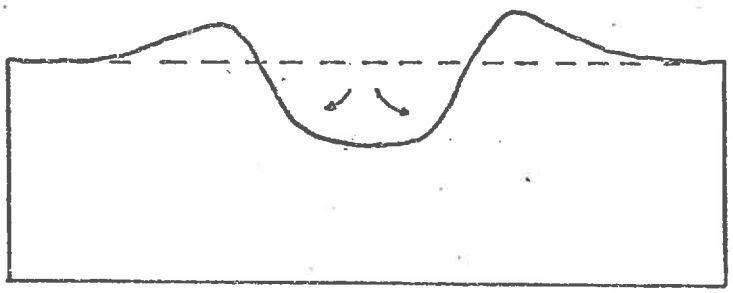
PROFILS DES PRINCIPAUX CAS D'ORNIERES

1



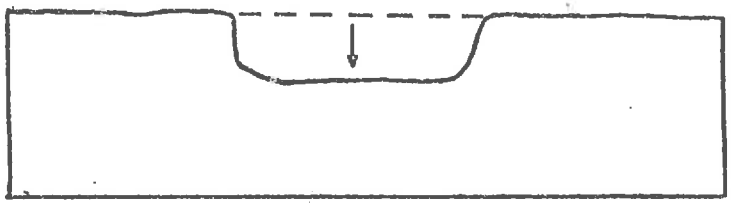
Ornières de sols argileux humides

2



Ornières de sols ayant 20 à 40 % d'argile

3



Ornières de sols sableux humides

FIGURE III

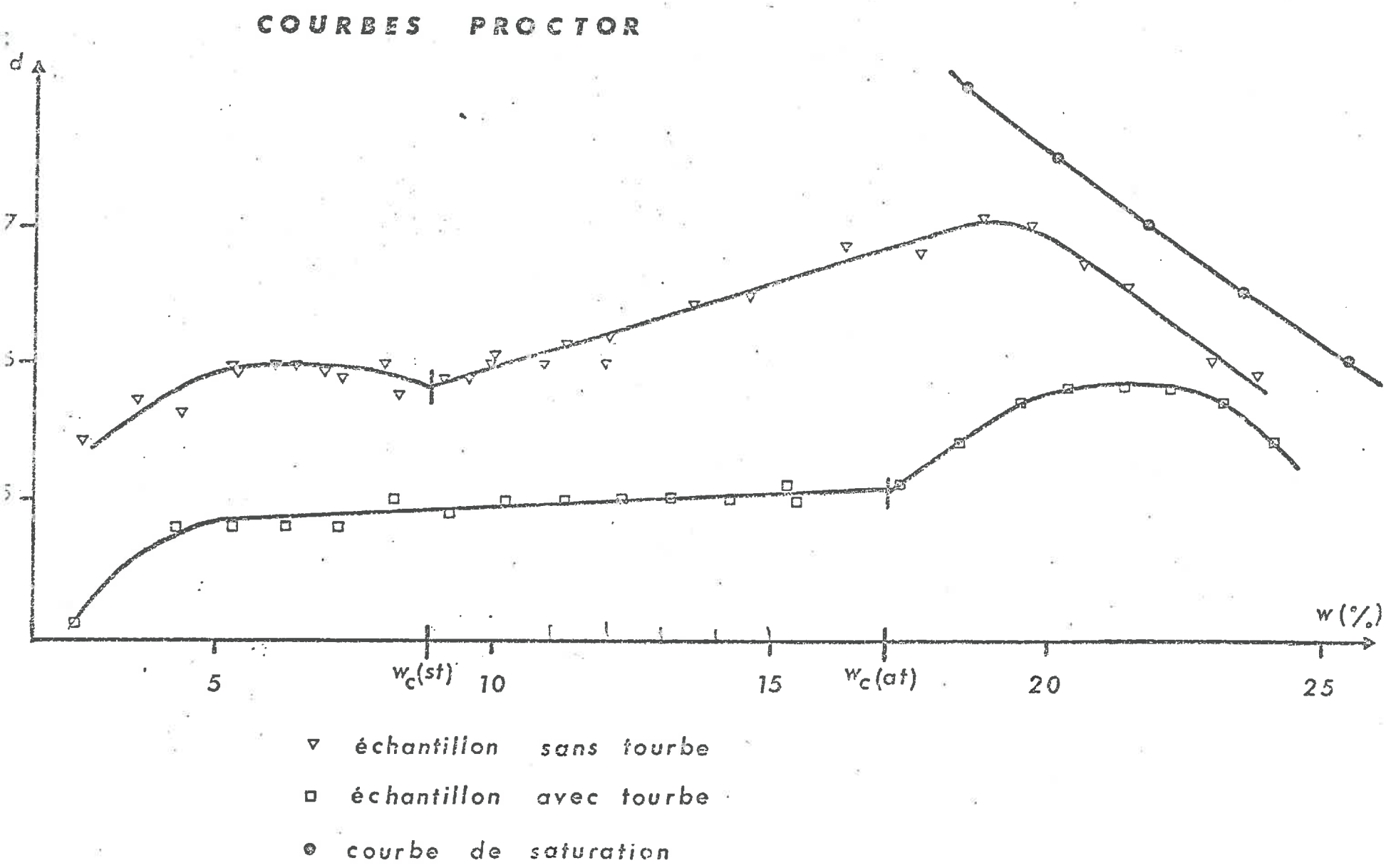

COURBES PROCTOR
d
7
5
5
w (%)
5
$w_c(st)$
10
15
$w_c(at)$
20
25
échantillon sans tourbe
échantillon avec tourbe
courbe de saturation

FIGURE IV 1

ASPERIMETRIE

VUE D'ENSEMBLE

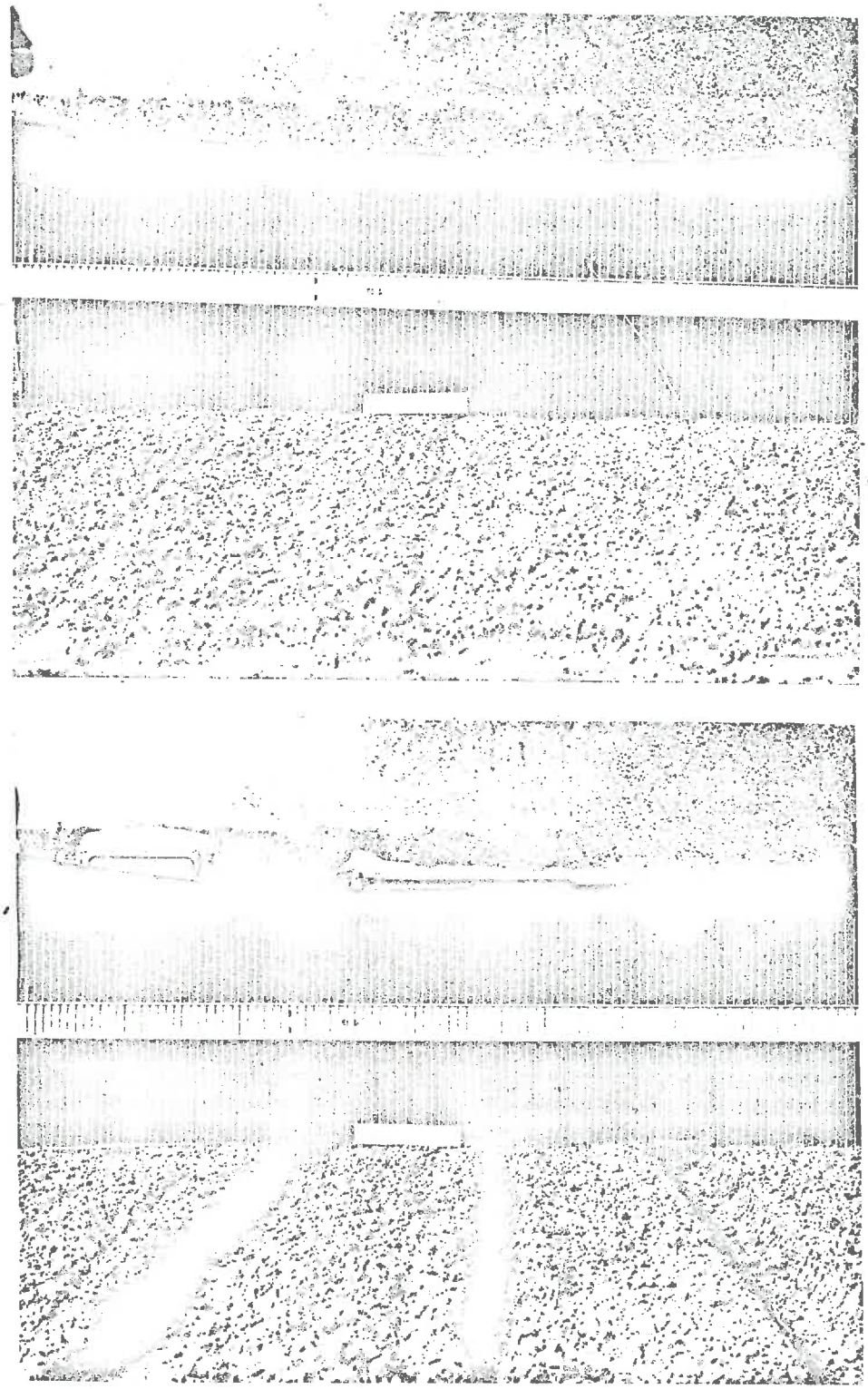


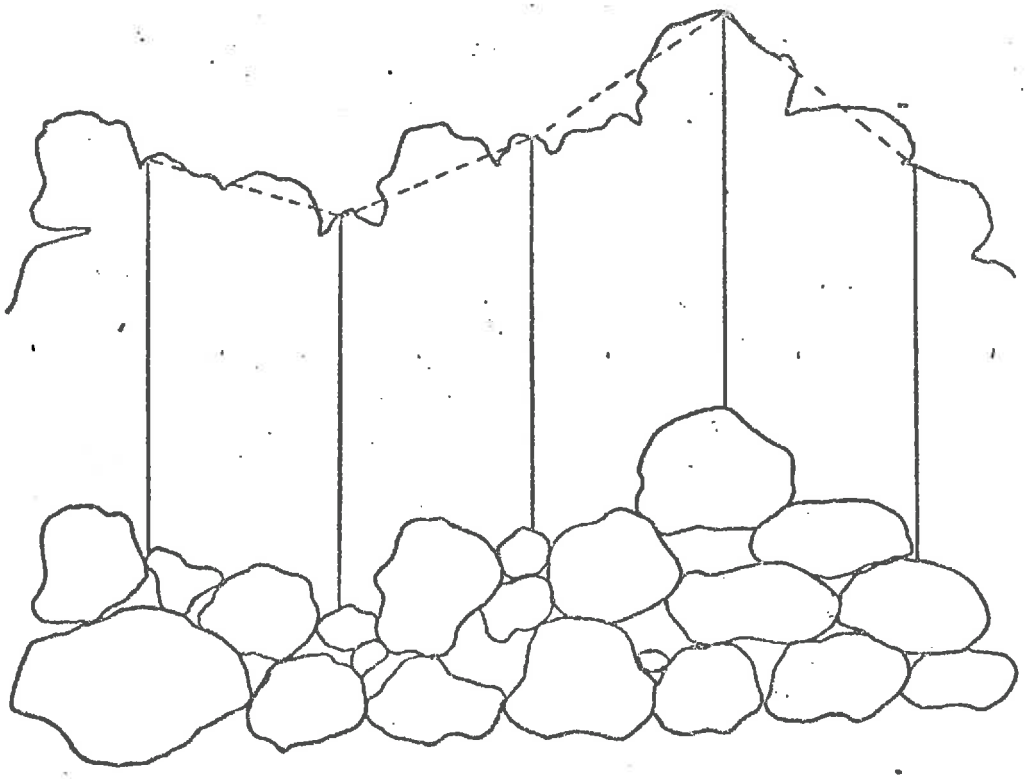
FIGURE IV 2

ASPERIMETRIE

PRINCIPE

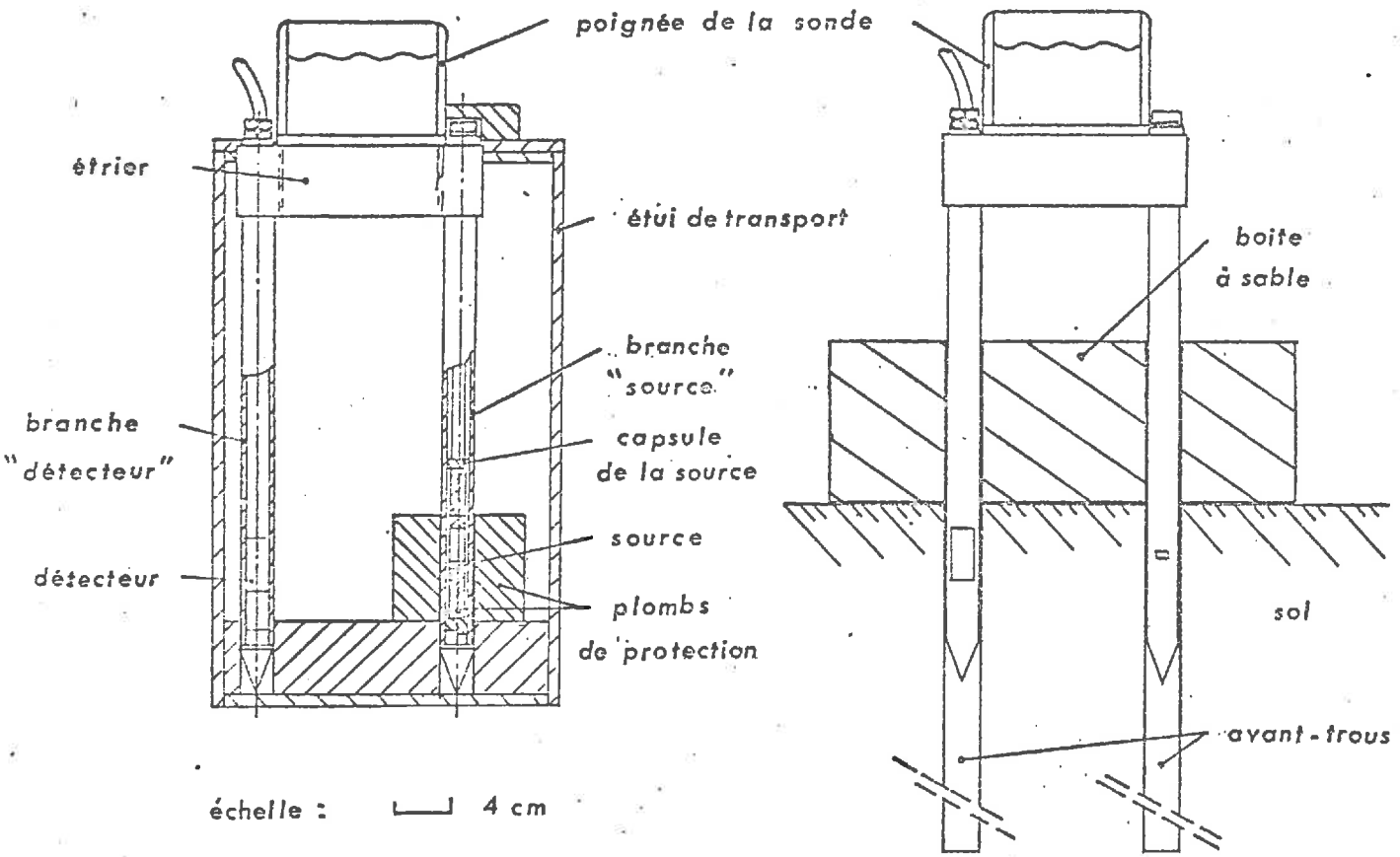
------ relevé par aspérimétrie

——— relevé réel



FIGURES V ET V

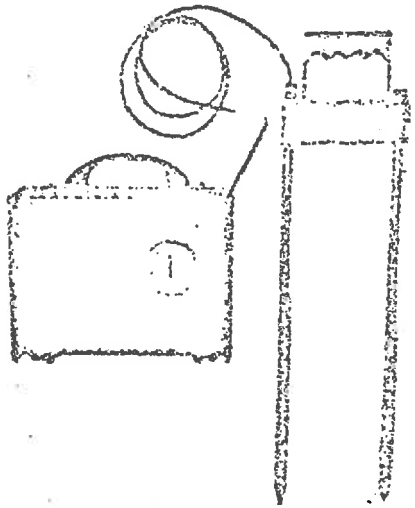
SONDE A RAYONS GAMMA



Sonde en position de test dans le plomb

sonde en position de mesure

d'après B. D. Soane ; D. J. Campbell ; S. M. Herkès .



CÔURBE D'ETALONNAGE DE LA SONDE

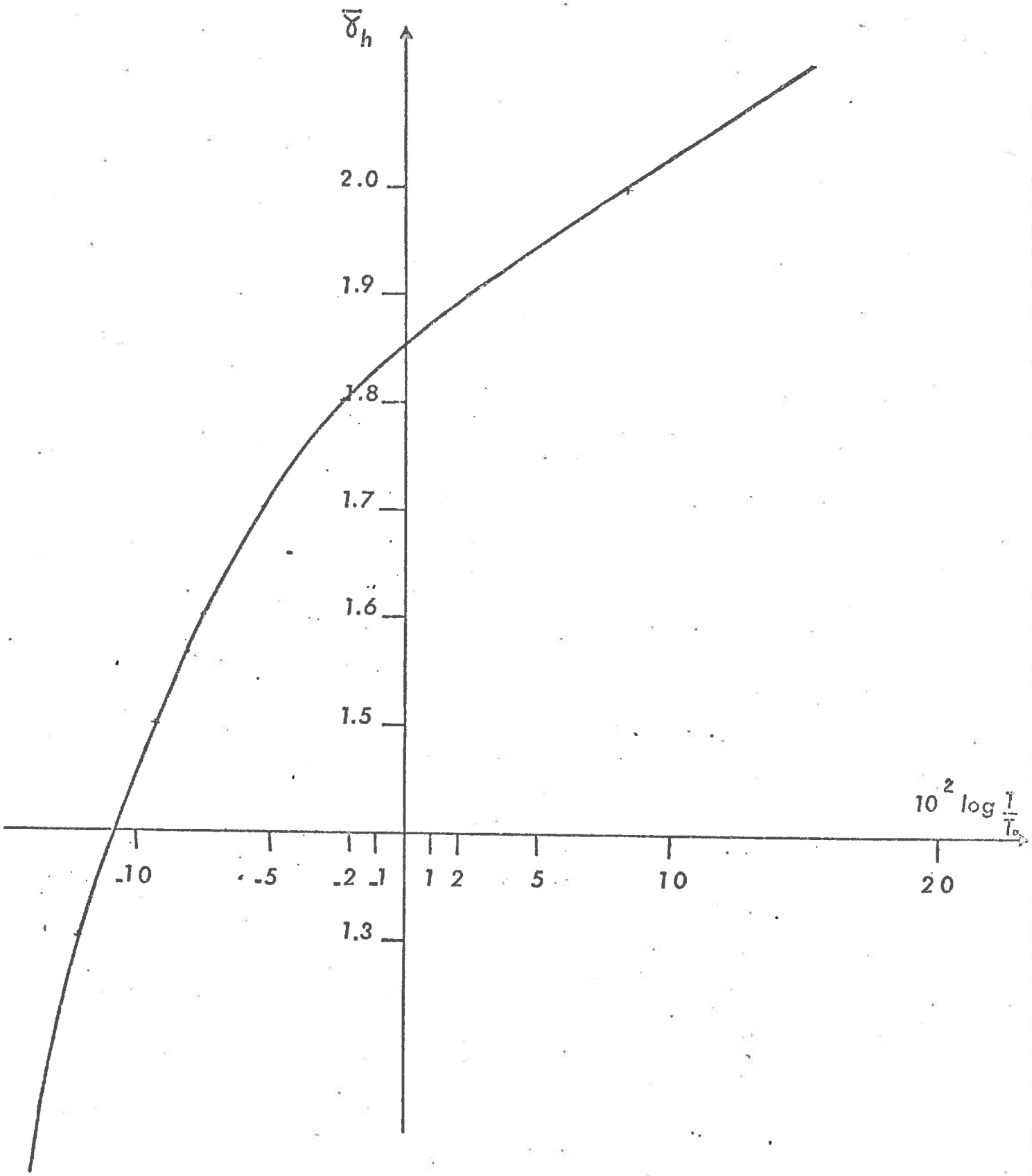


FIGURE VIII

FUSEAU D'EMISSION

DES RAYONS GAMMA

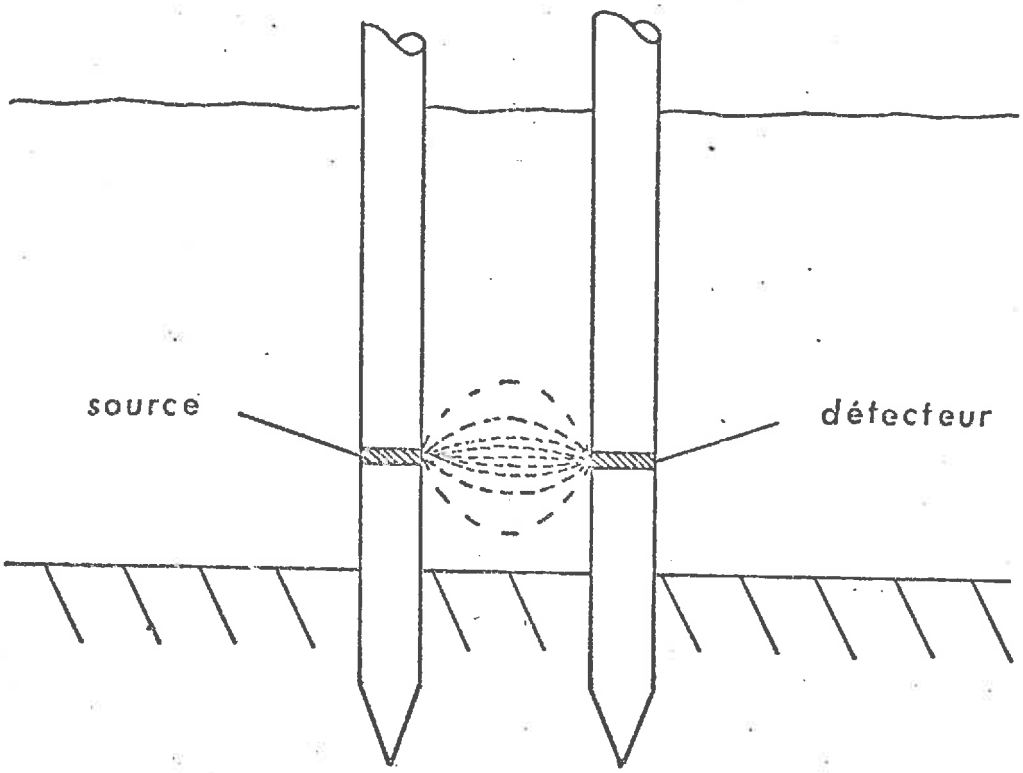


FIGURE IX

MESURES A LA SONDE DANS UN BI - COUCHE

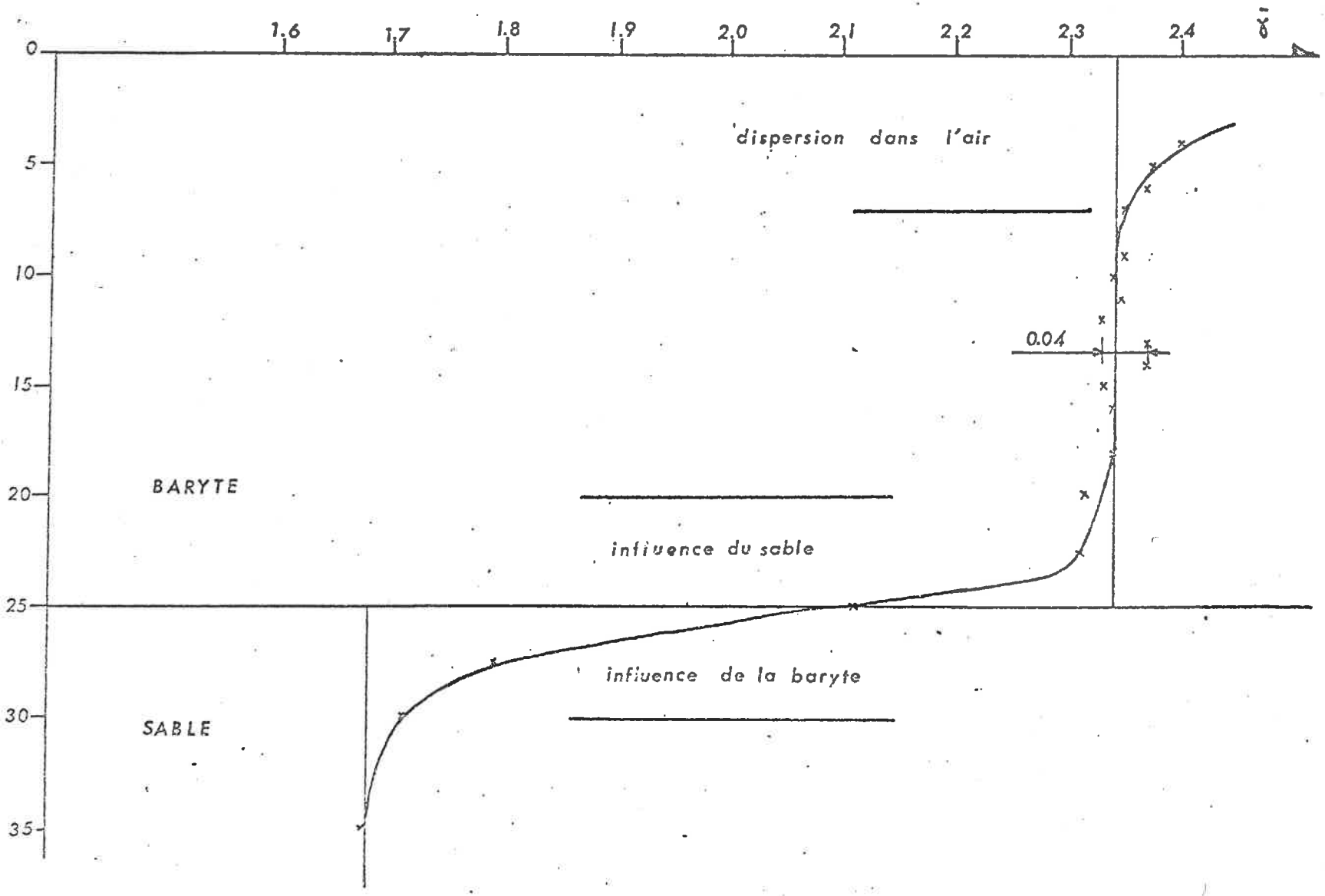


FIGURE X 1

PROFILS HYDRIQUES

ESSAI E_7

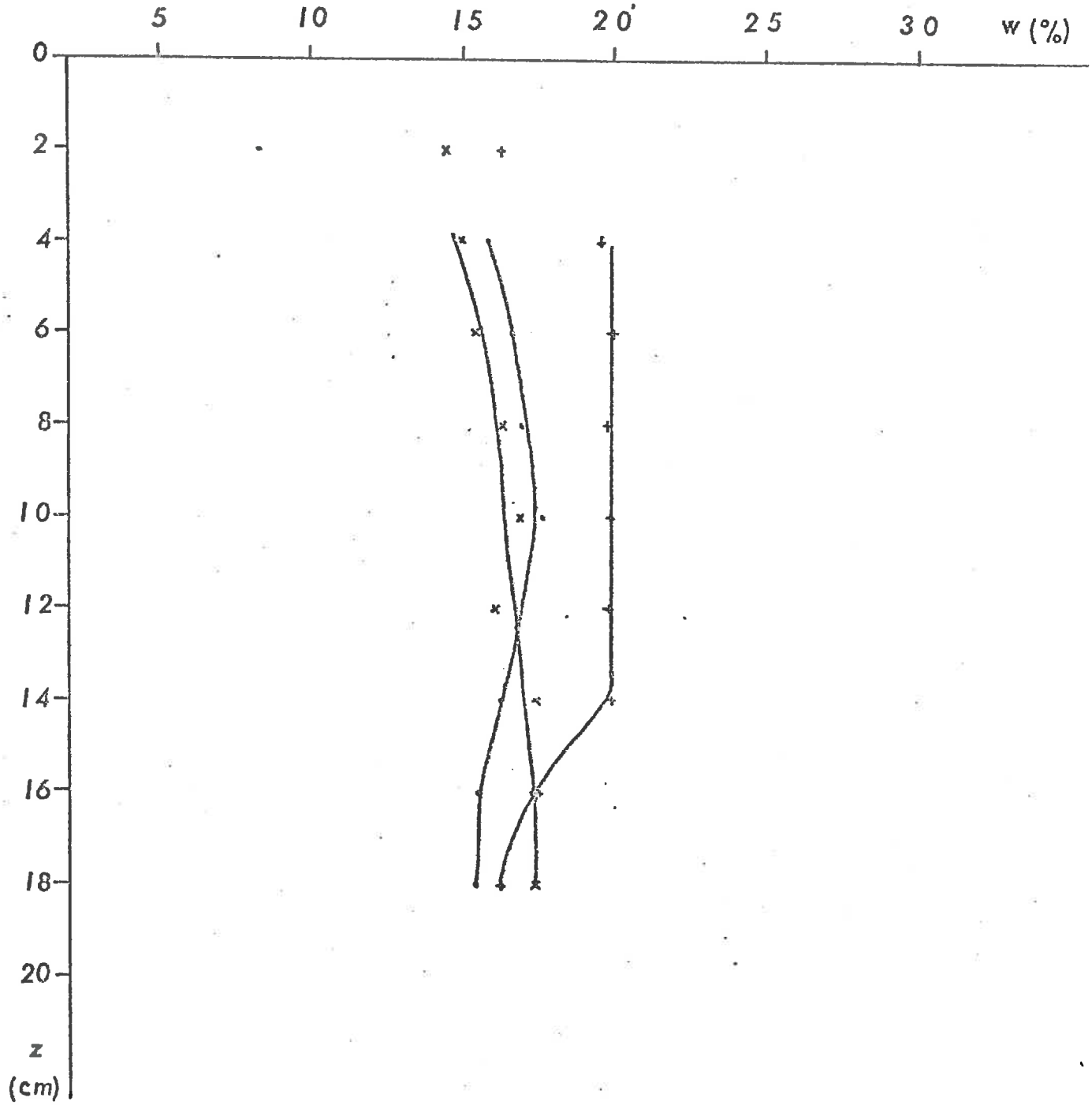


FIGURE X 2

PROFILS HYDRIQUES

ESSAI E_2

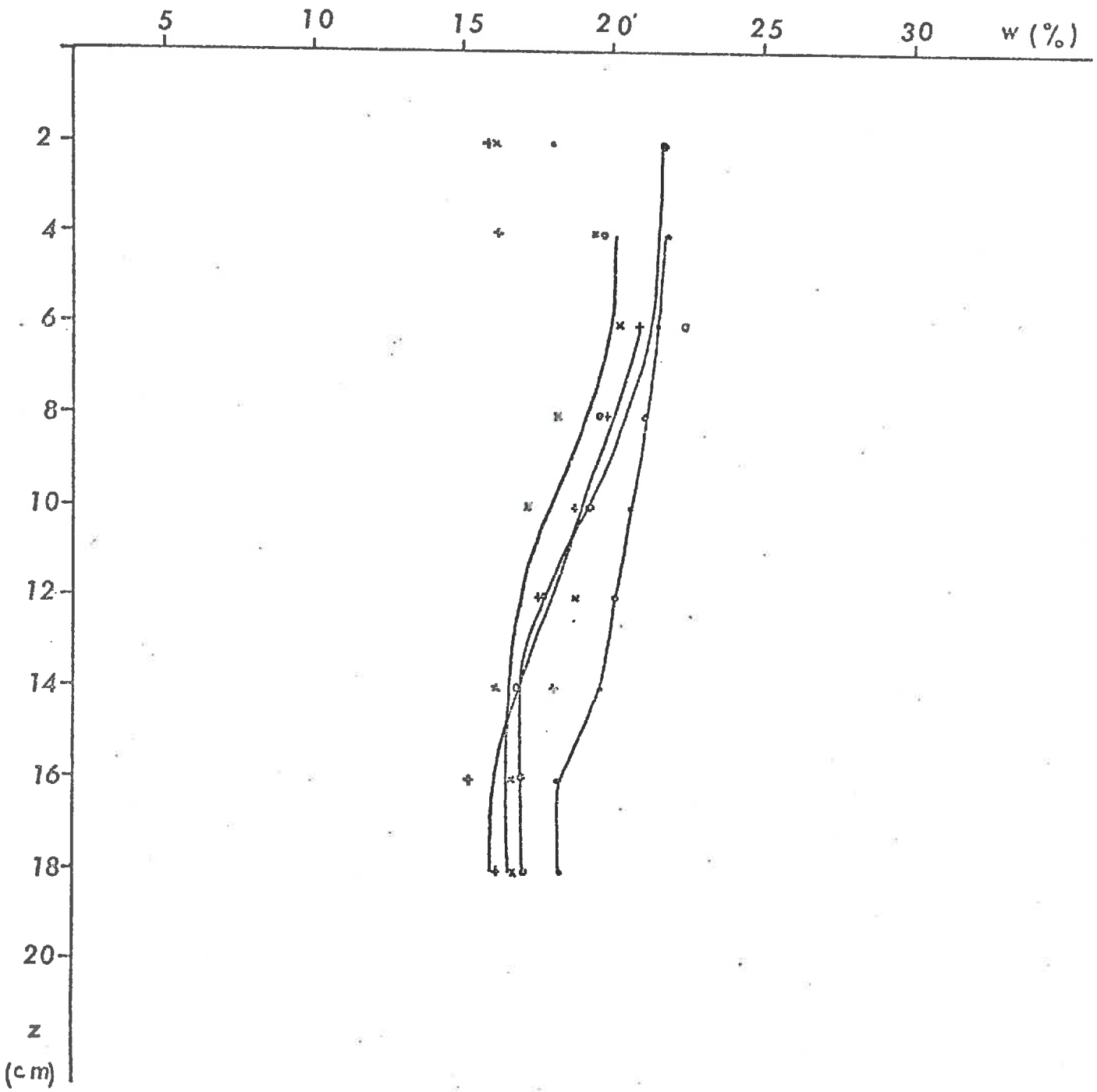


FIGURE X 3

PROFILS HYDRIQUES

ESSAI E_3

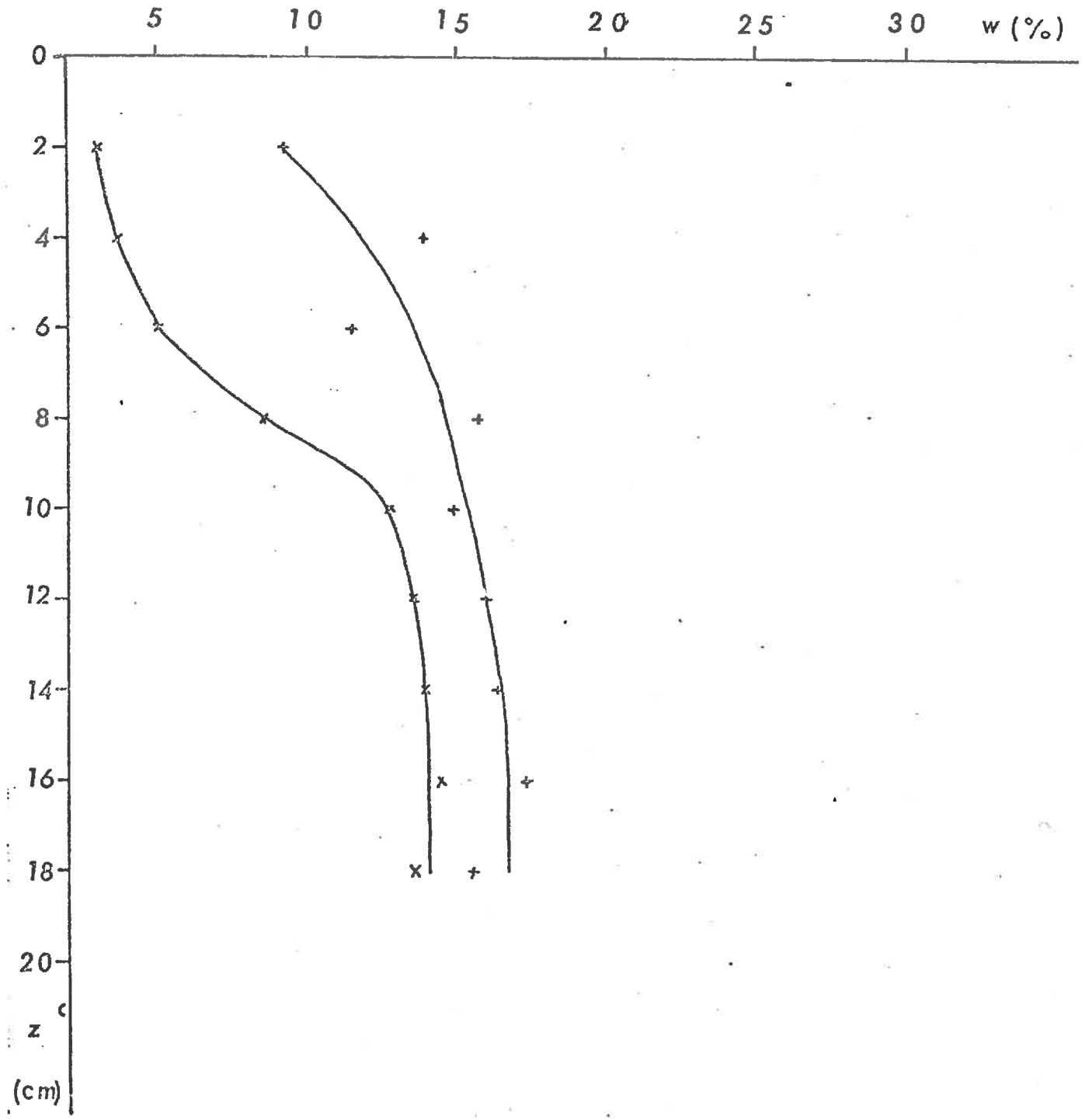


FIGURE X 4

PROFILS HYDRIQUES

ESSAI E_4

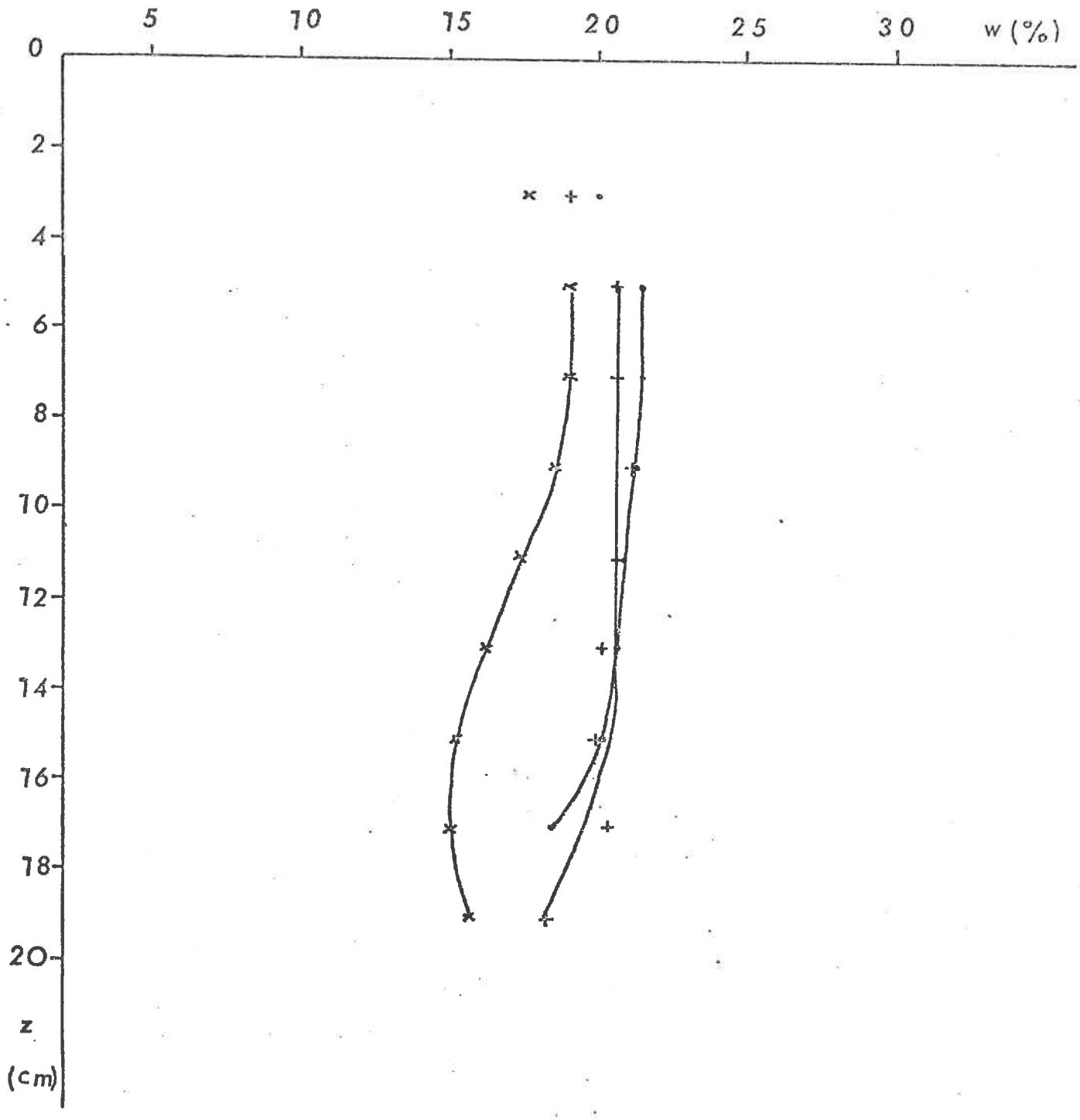


FIGURE X 5

PROFILS HYDRIQUES

ESSAI E_5

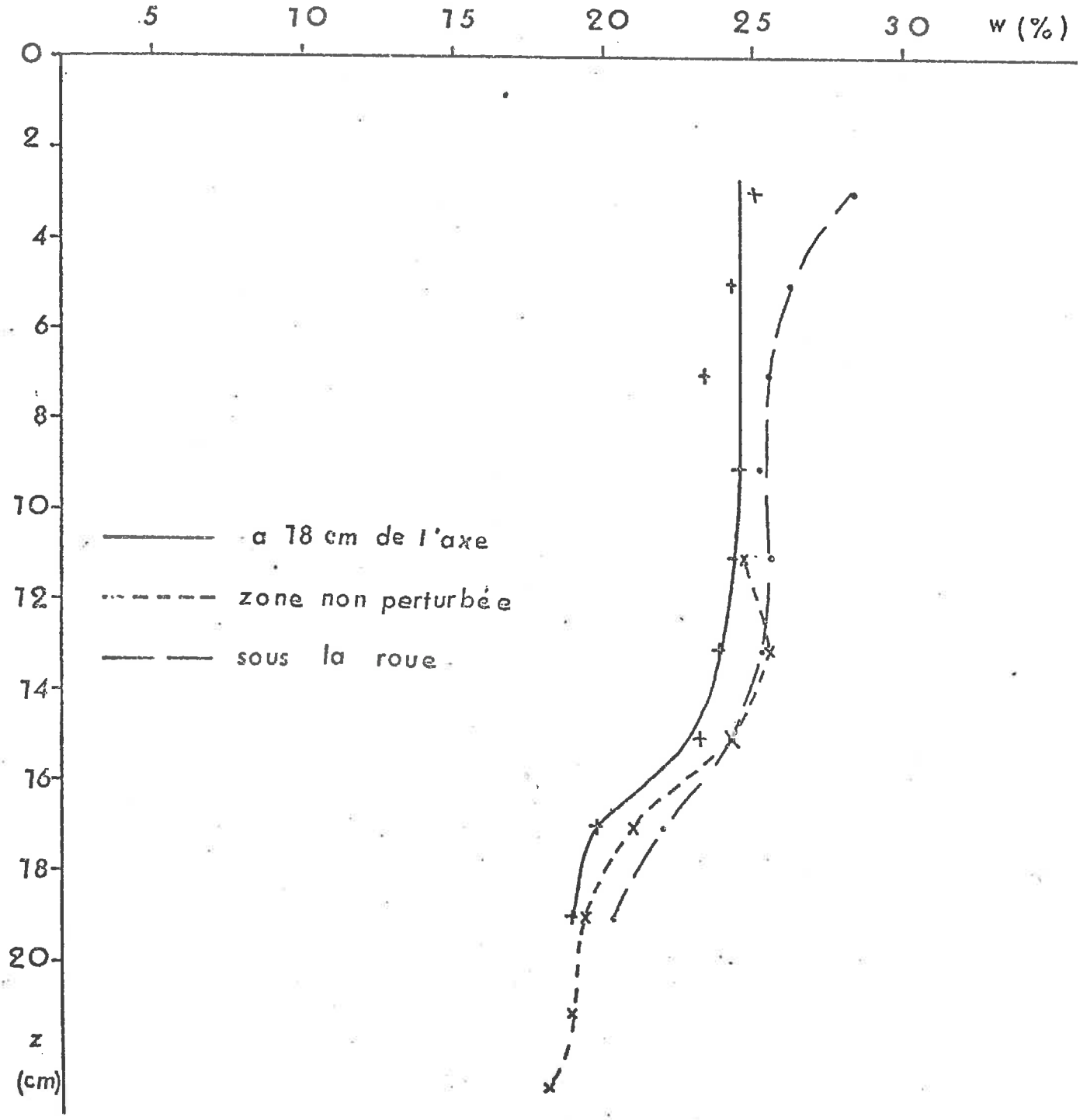


FIGURE XI 1

PROFILS D'ORNIERES ESSAIS E_1 ET E_2

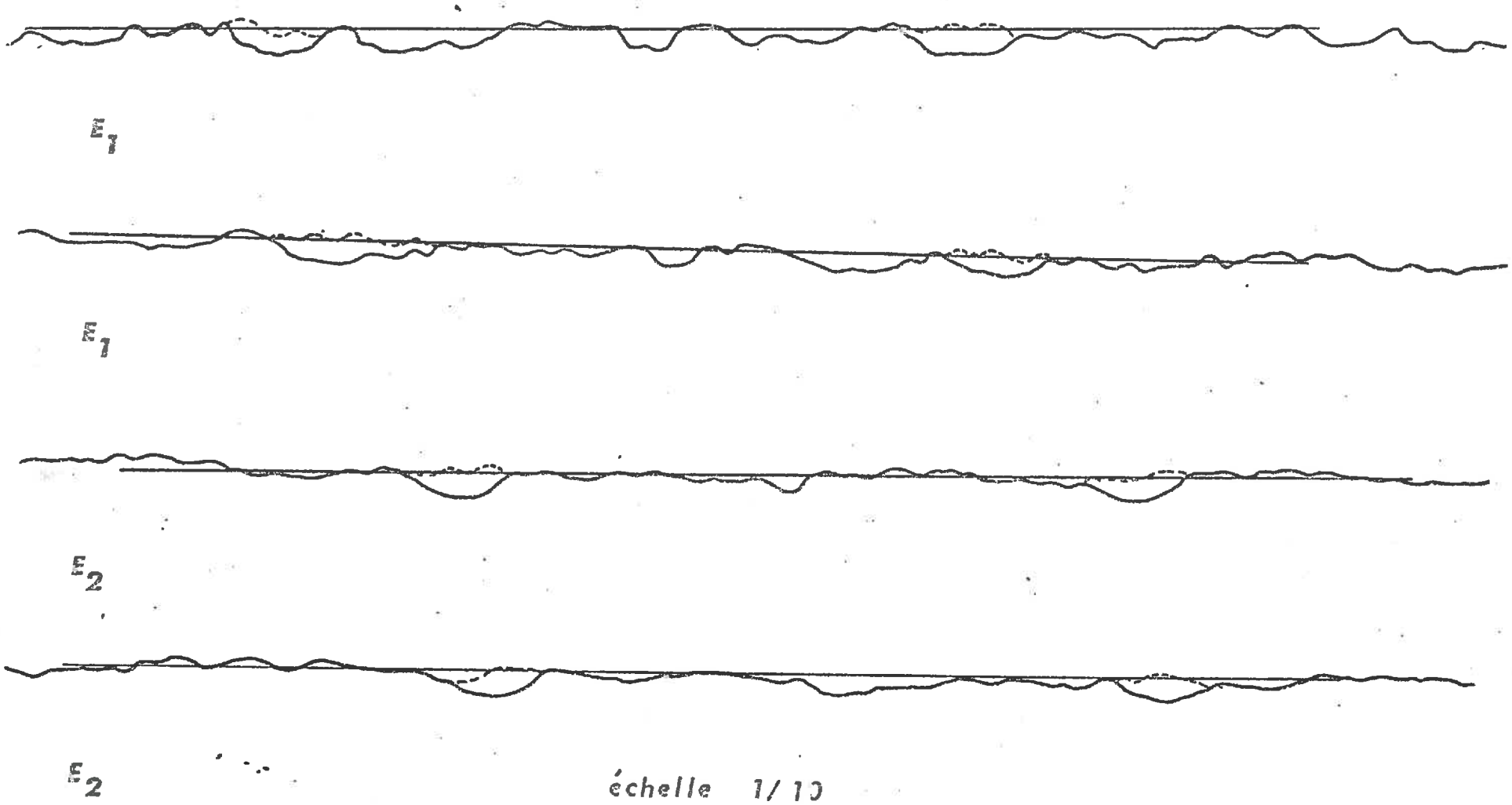


FIGURE XI 2

PROFILS D'ORNIERES ESSAI E_3

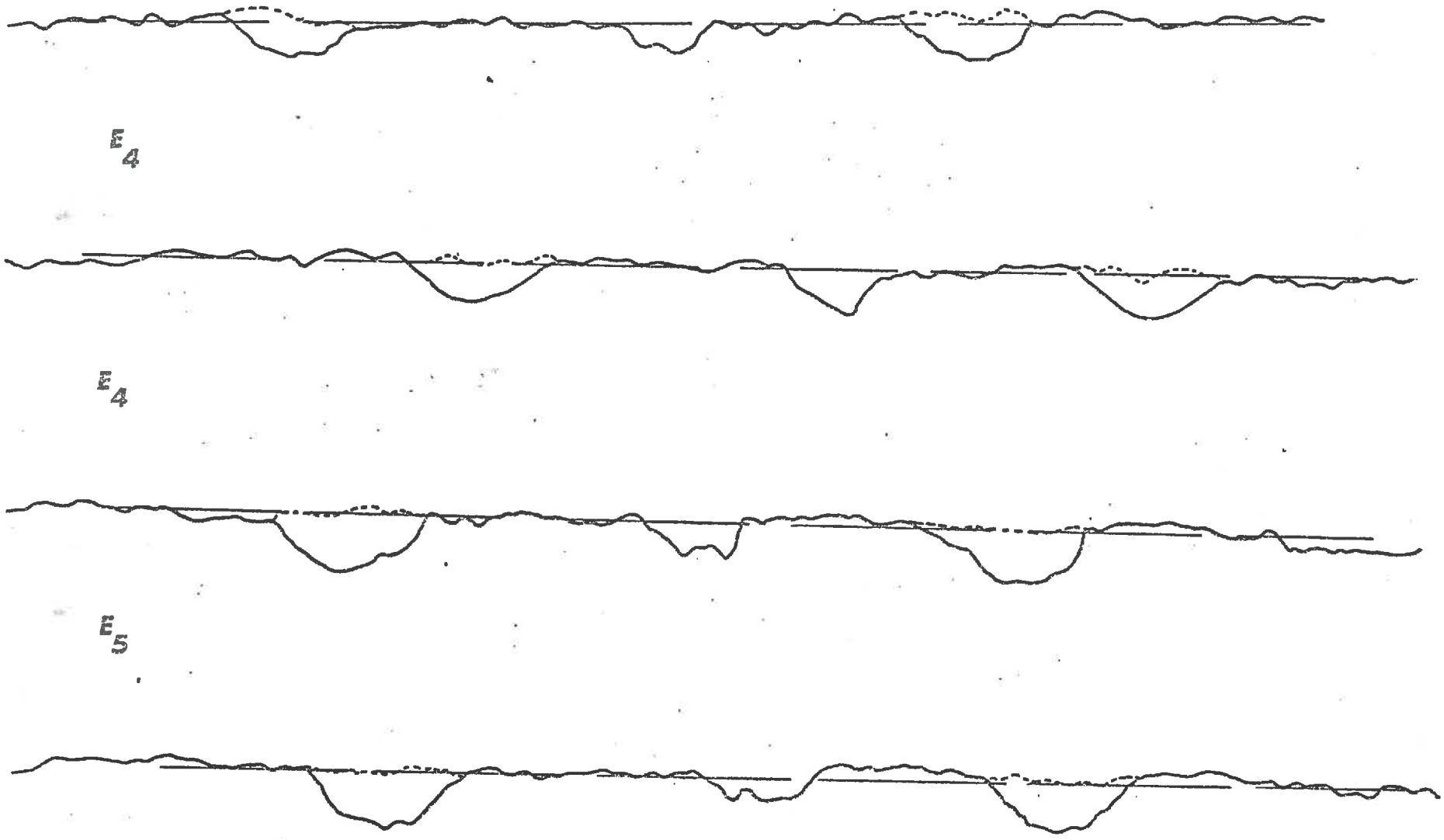
E_3

E_3

échelle 1/10

FIGURE XI 3

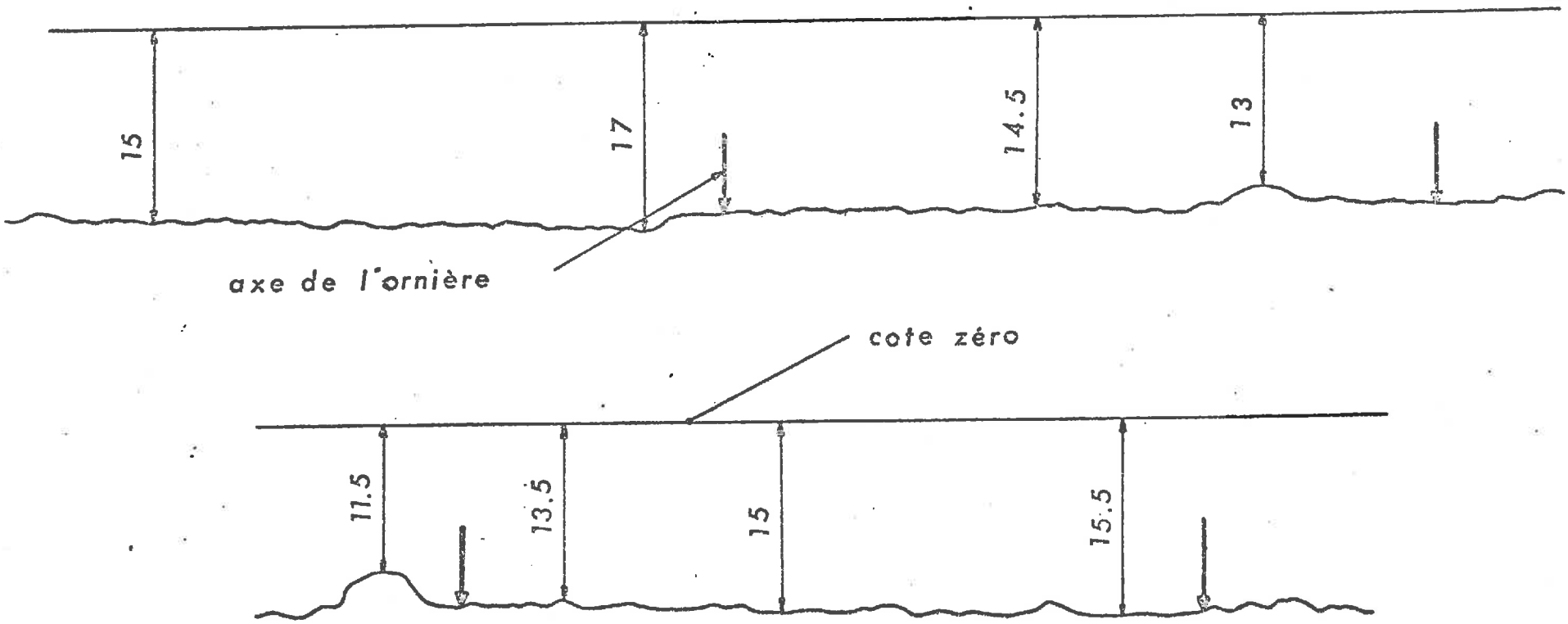
PROFILS D'ORNIERES ESSAIS E_4 ET E_5



échelle 1/10

FIGURE XII

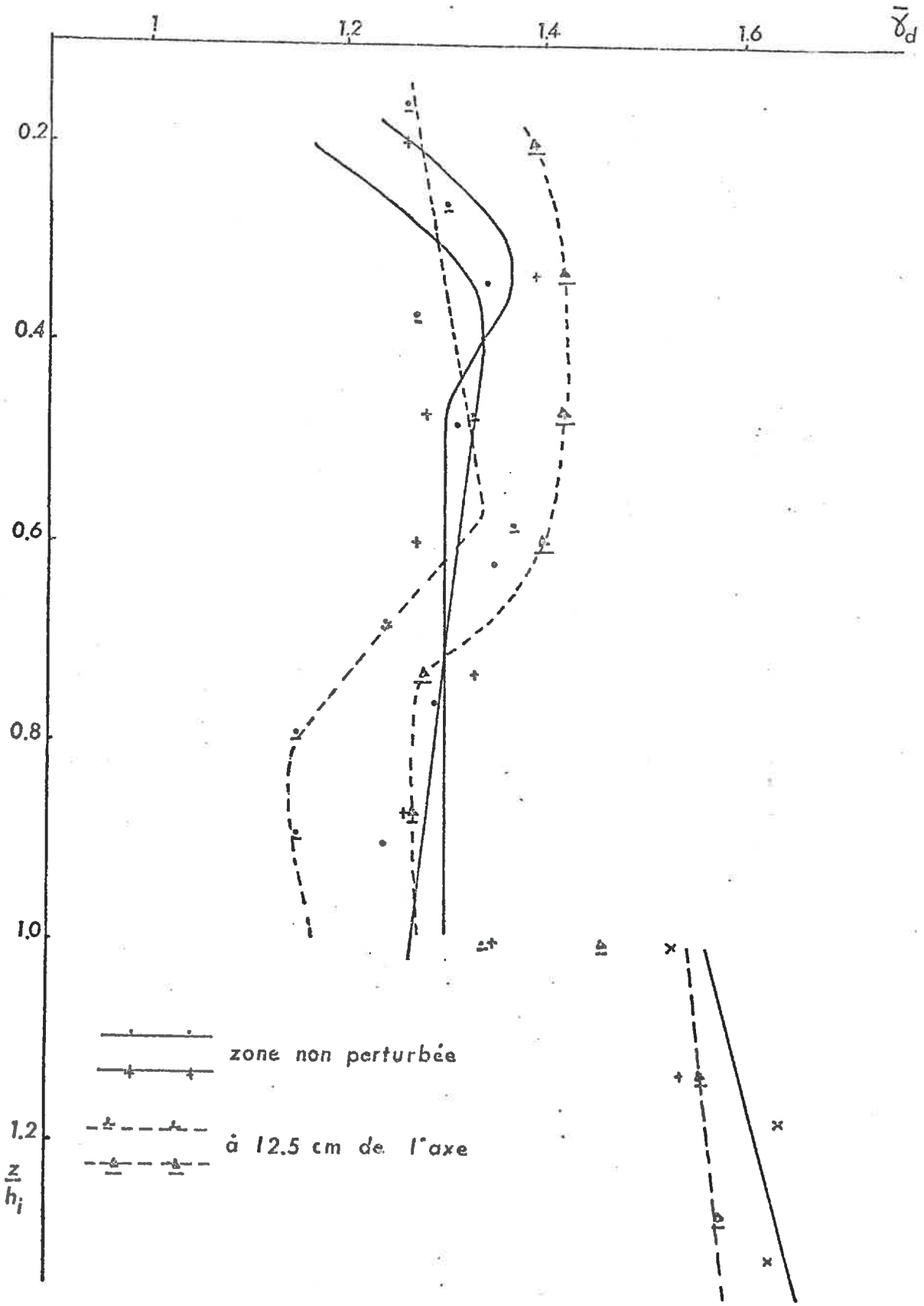
ASPERIMETRIES DU FOND DE TRAVAIL



echelle 1/10

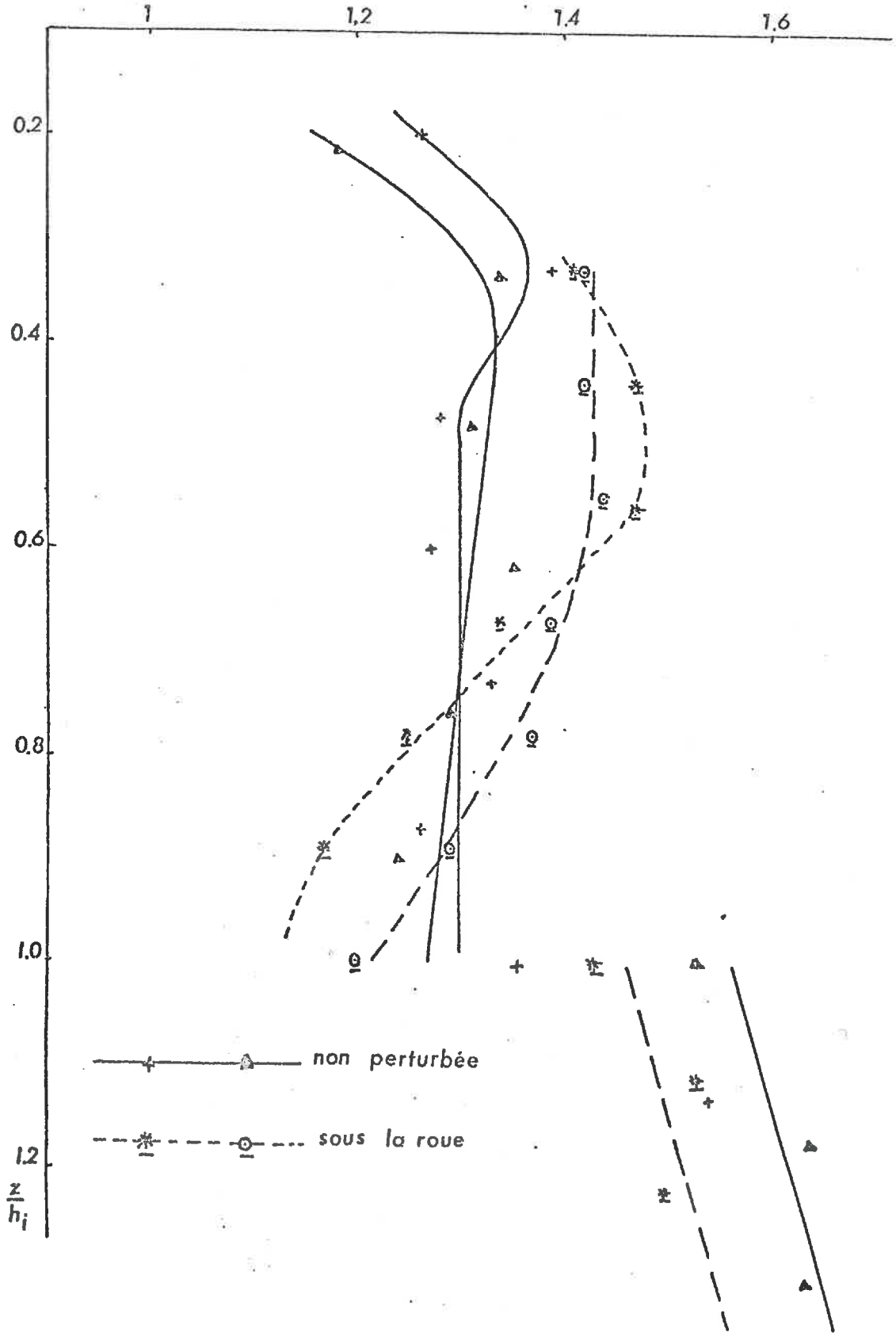
PROFIL DE DENSITE
Essai E_1

FIGURE XIII.1



PROFIL DE DENSITE
Essai E_7

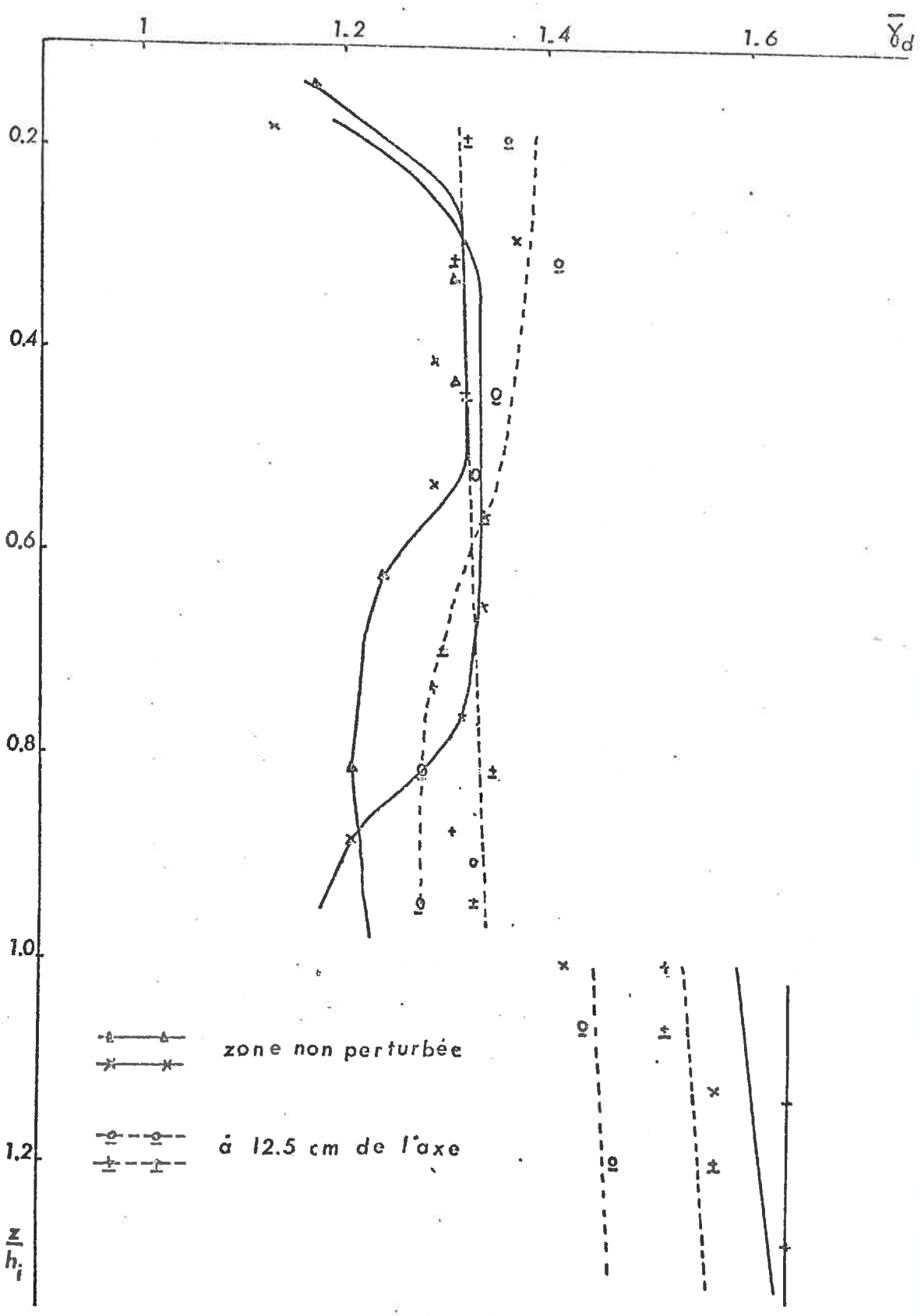
FIGURE XIII 2



PROFIL DE DENSITE

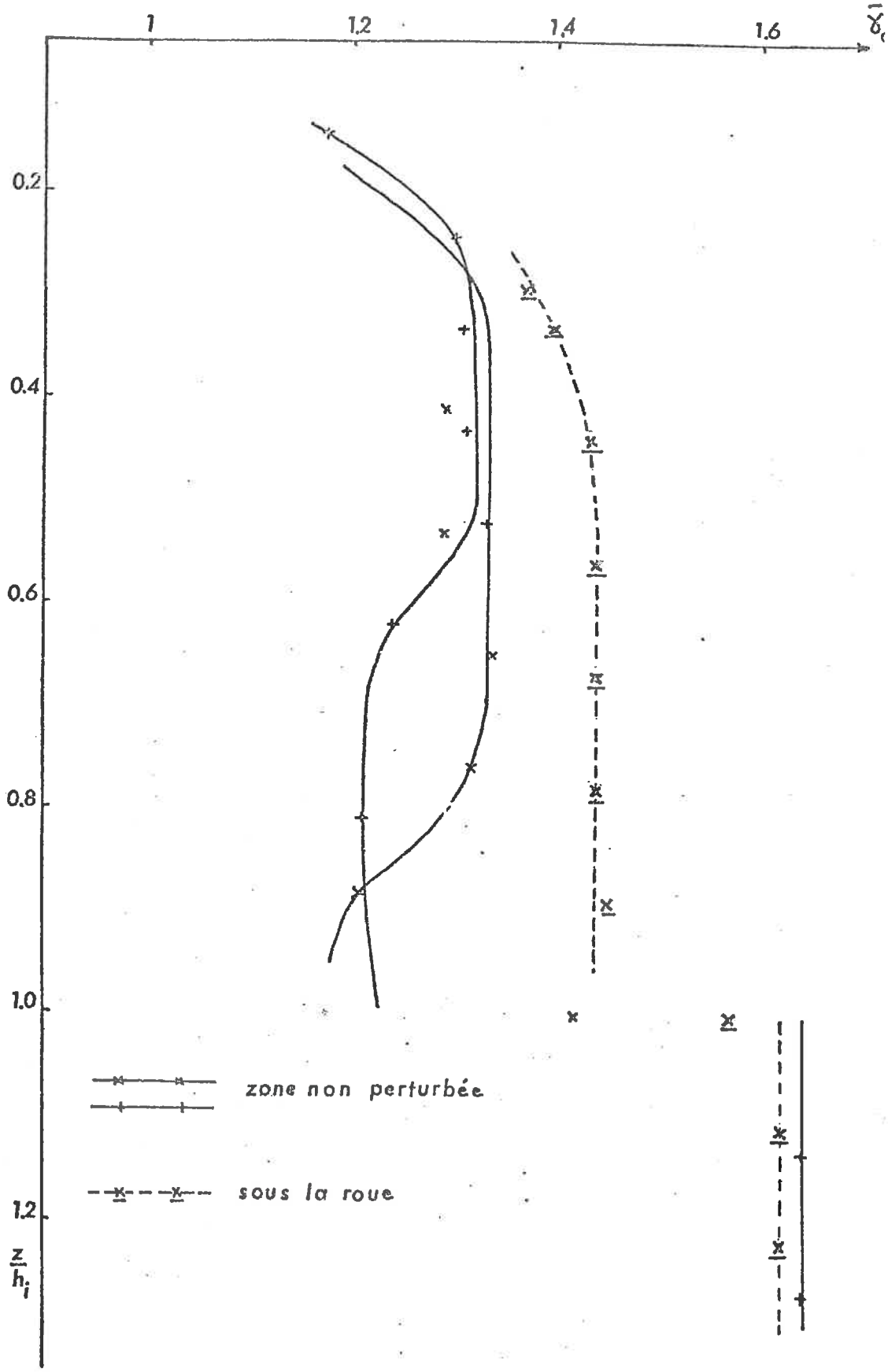
Essai E_2

FIGURE XIII 3



PROFIL DE DENSITE
Essai E_2

FIGURE XIII



PROFIL DE DENSITE
Essai E_3

FIGURE XIII . 5

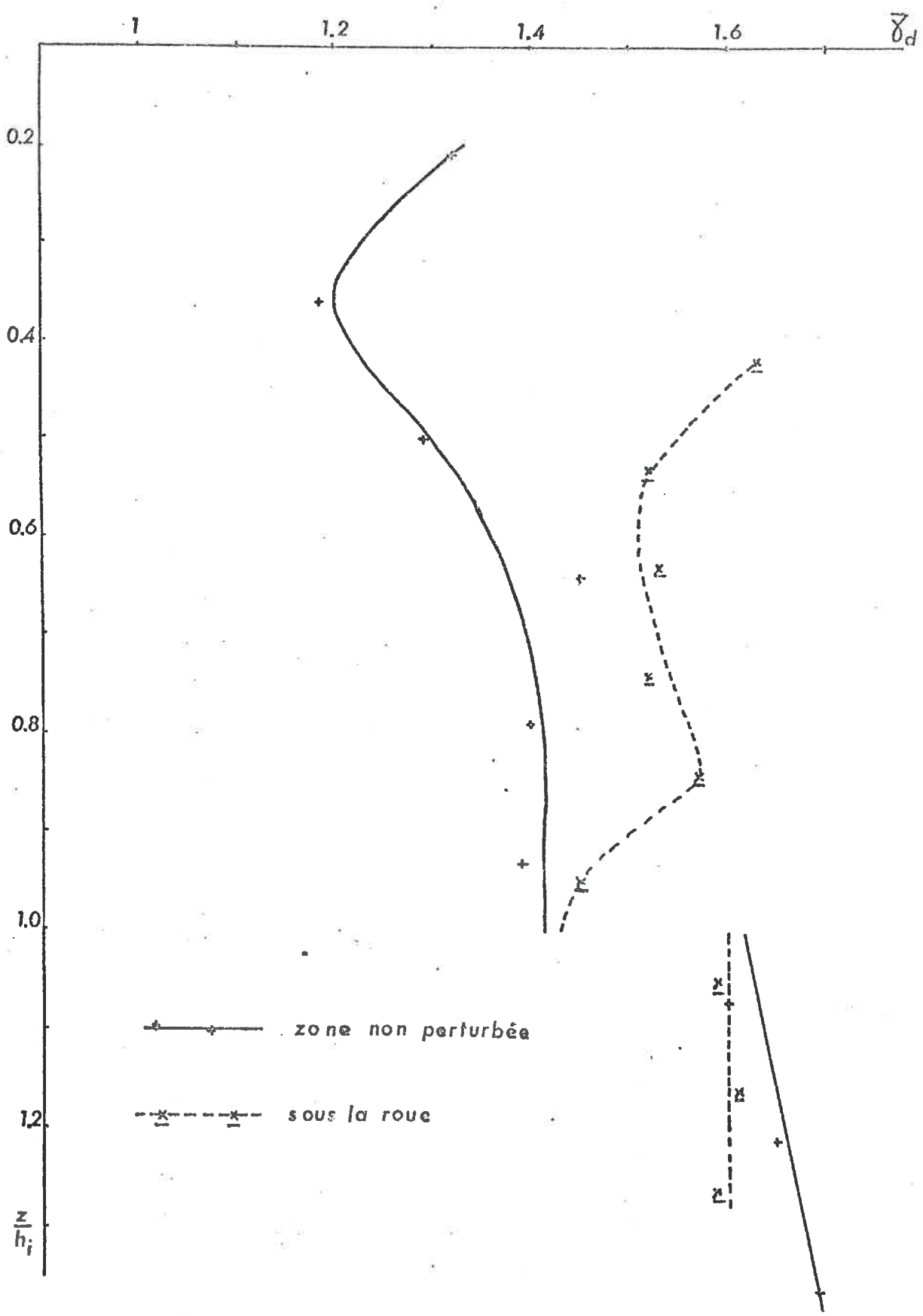


FIGURE XIII 6

PROFIL DE DENSITE
ESSAI E_4

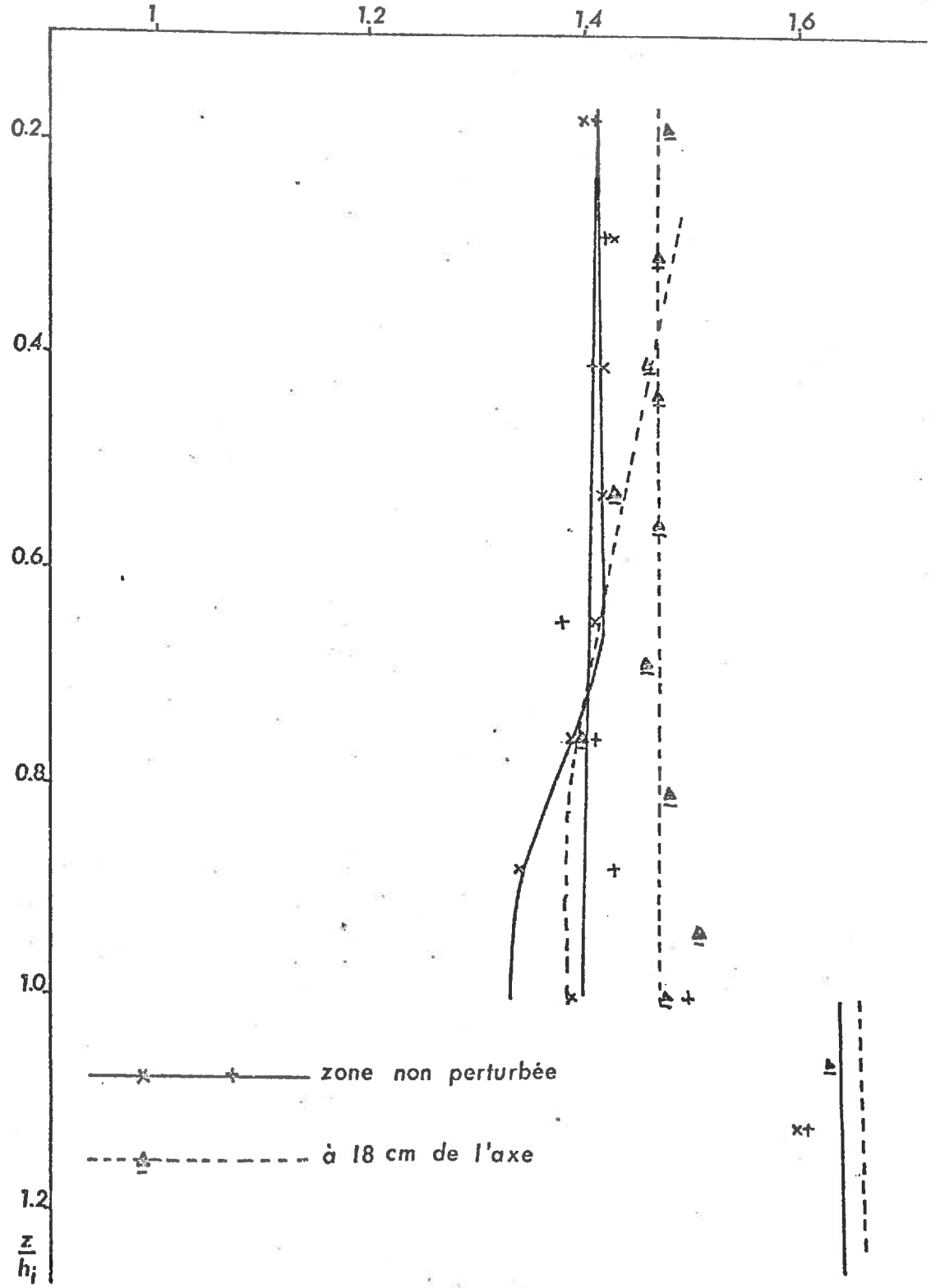


FIGURE XIII 7

PROFIL DE DENSITE
Essai E_4

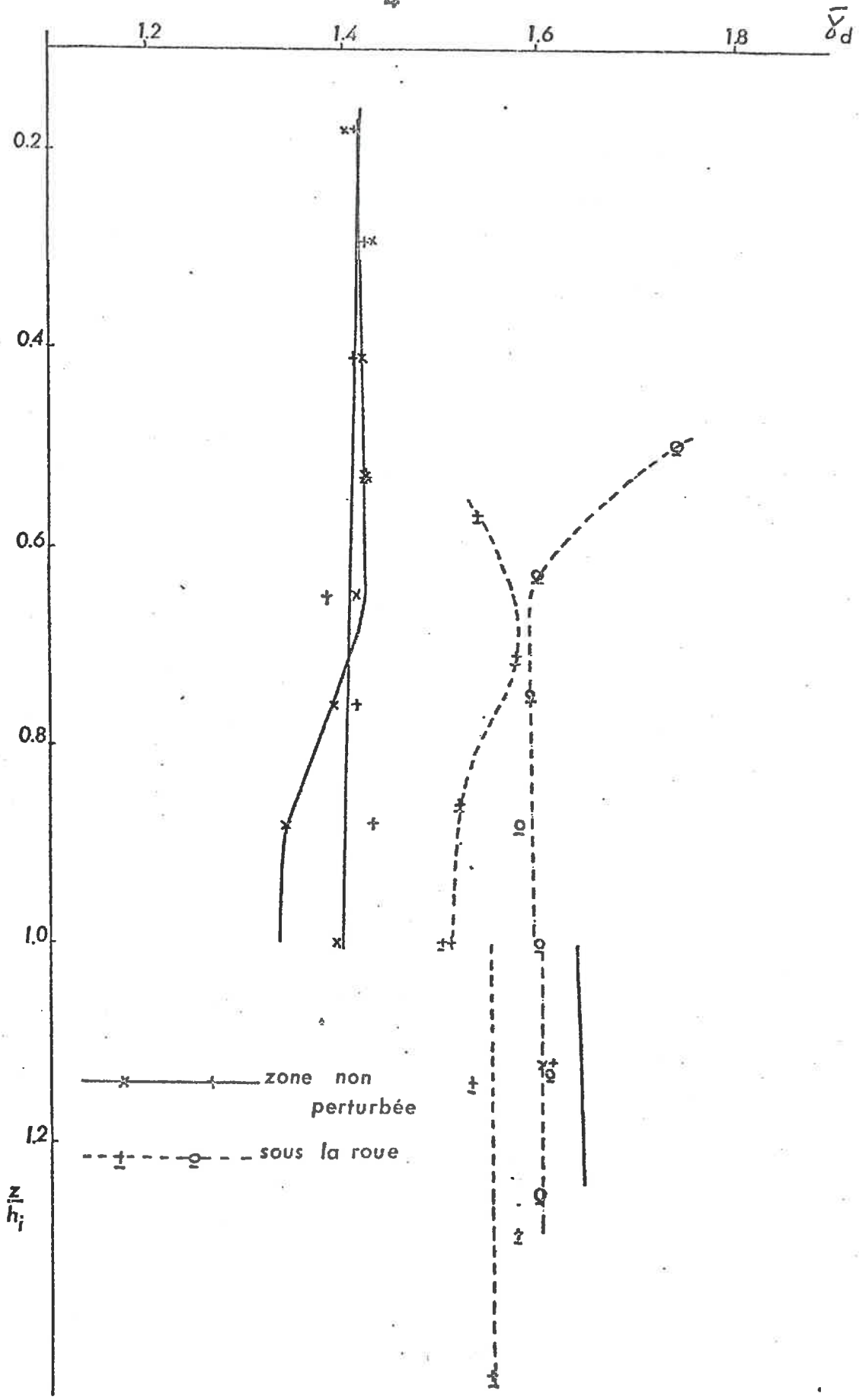


FIGURE XIII 8

PROFIL DE DENSITE
Essai E_5

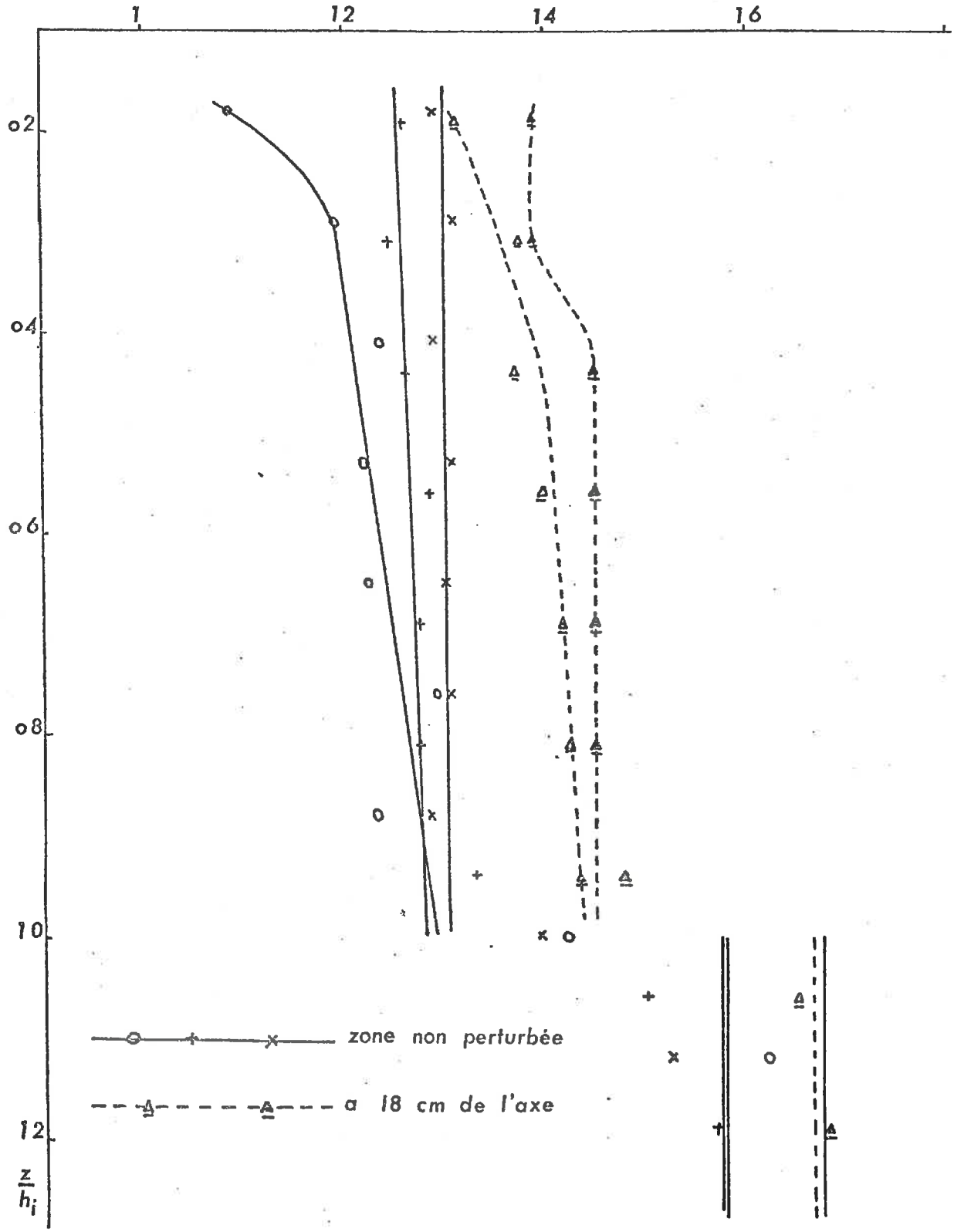
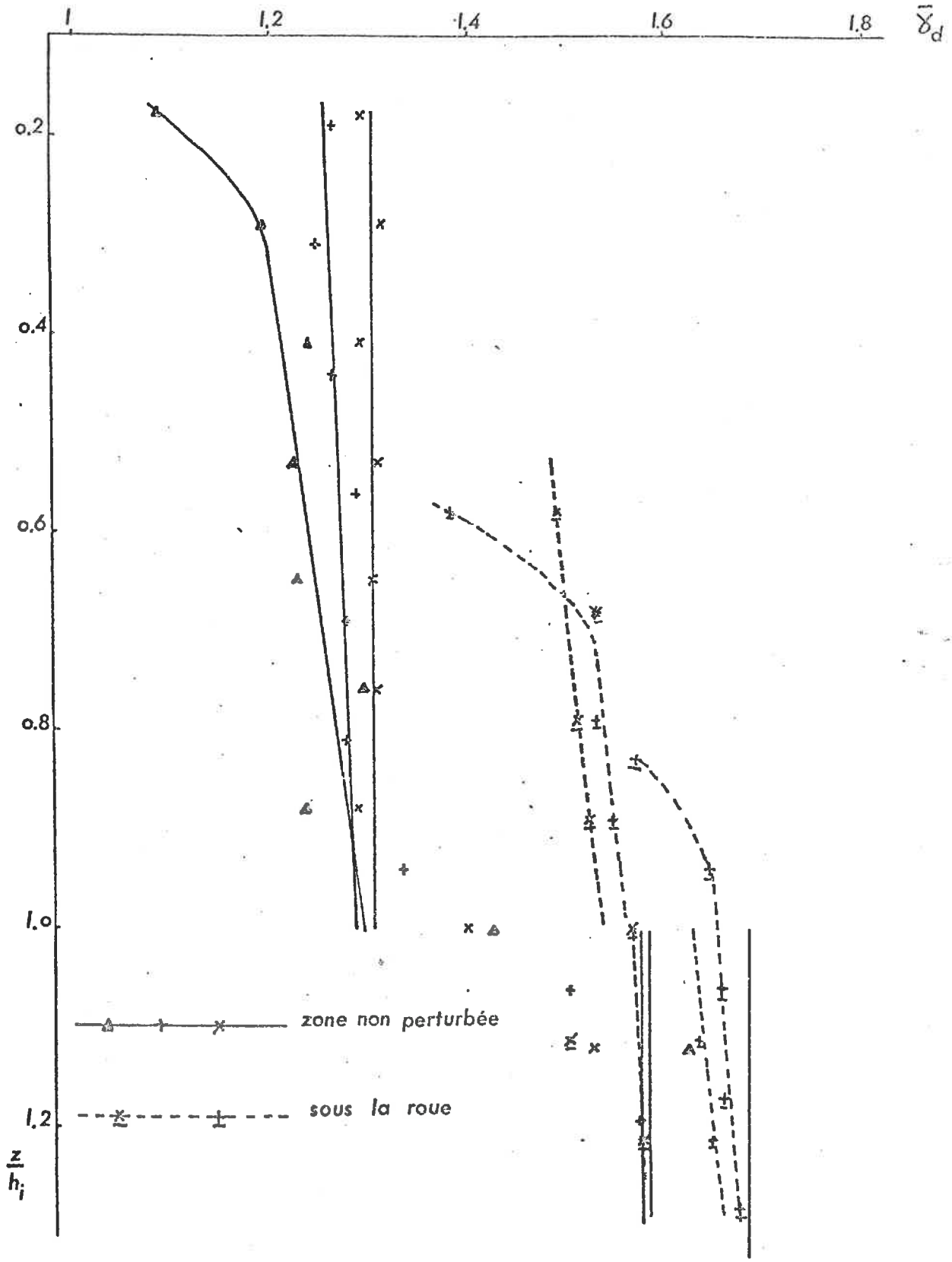


FIGURE XIII 9

PROFIL DE DENSITE
Essai E_5



ST { E_1, E_3, E_4 . NT { E_2, E_5

FIGURE XIV 1

CARTE DE LA COMPACITE

Essai E_1 vide ST

~~faible~~ w 16-20

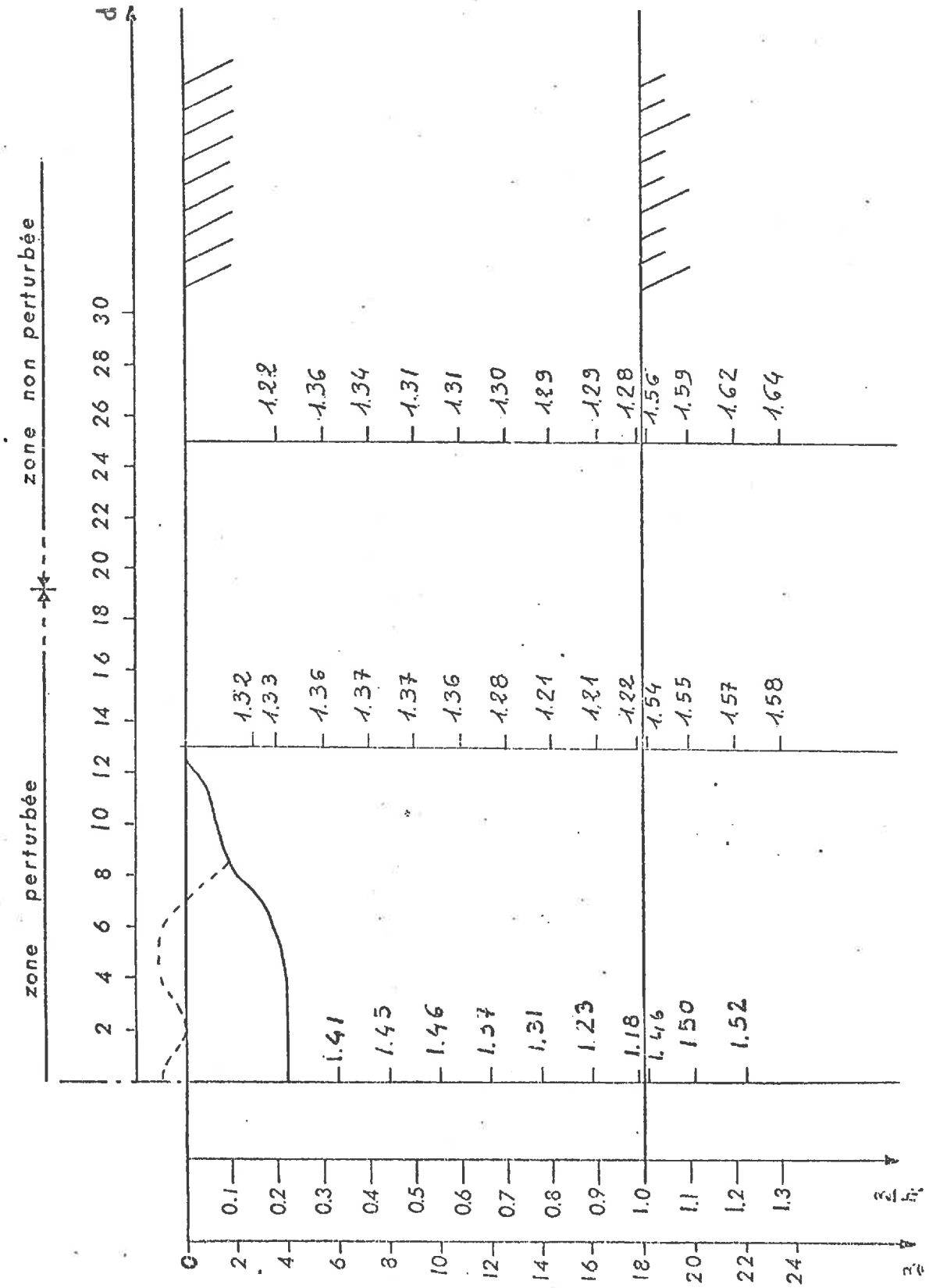


FIGURE XIV 2

CARTE DE LA COMPACITE

Essai E_2 vide AT.

feuille w = 18-23

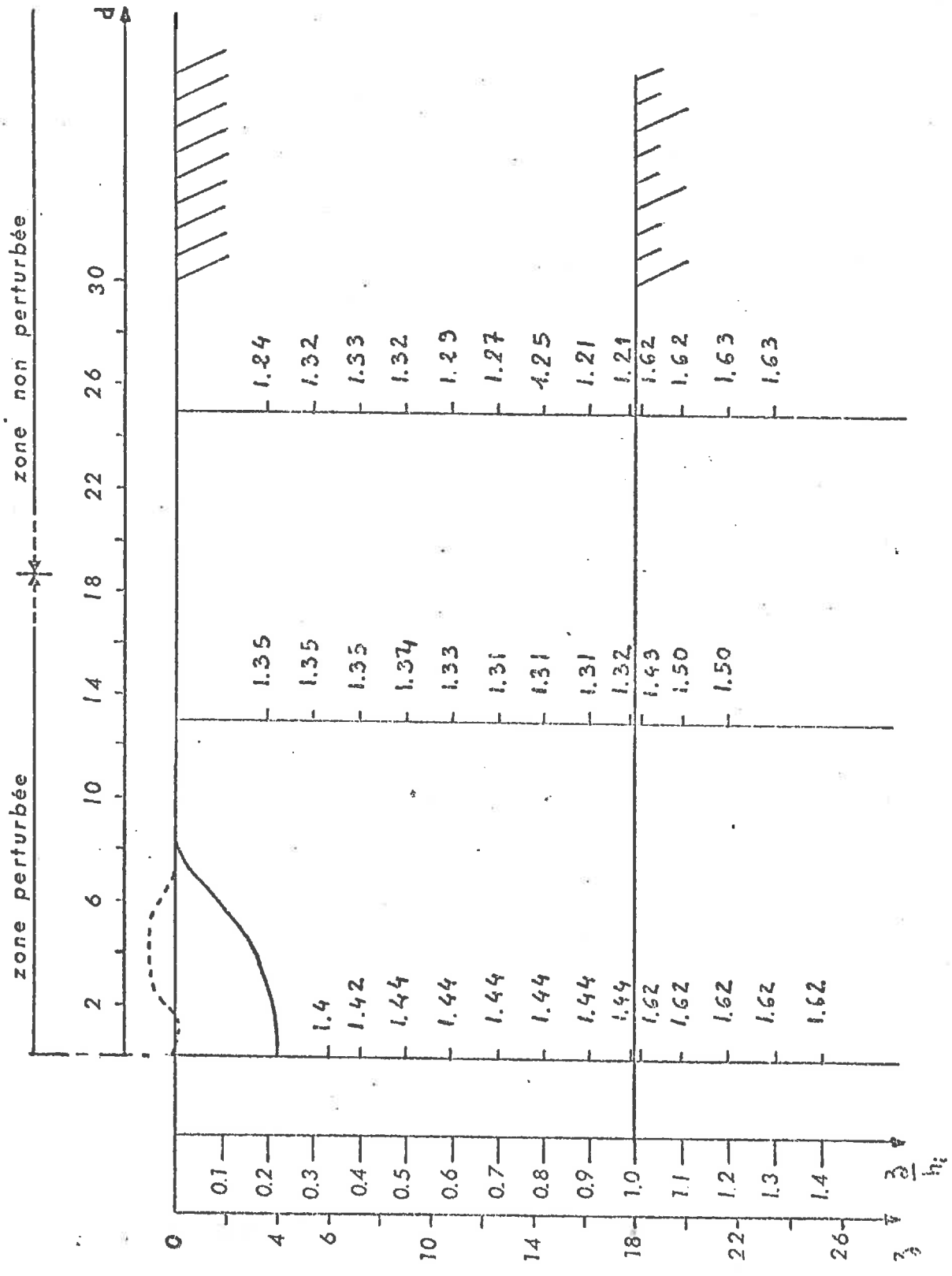


FIGURE XIV 3

CARTE DE LA COMPACITE

Essai E_3

Plein st
w ≠ 13-15 %

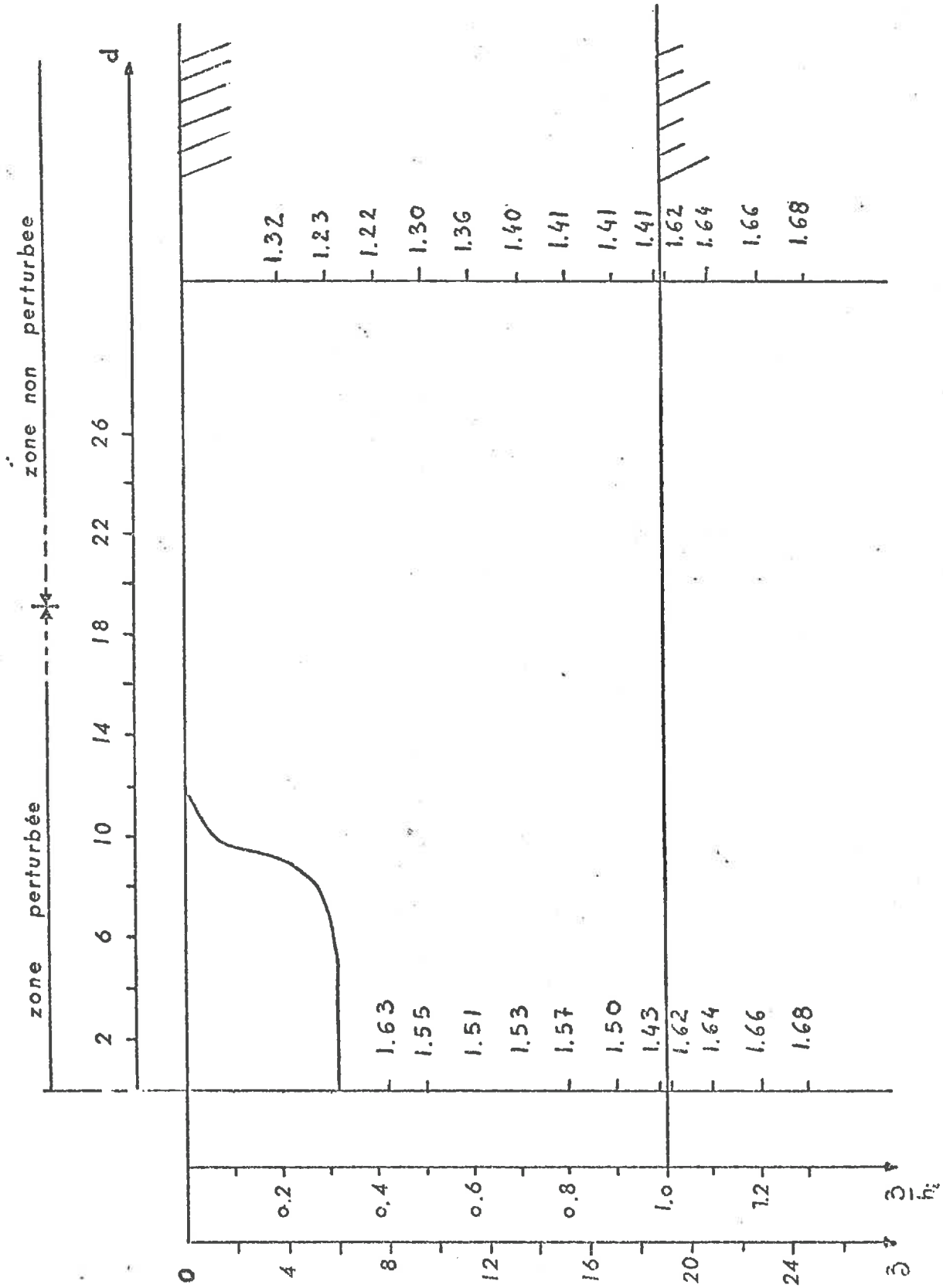


FIGURE XIV 4

CARTE DE LA COMPACITE

Essai E_4

Plan S.T
w≠18-21

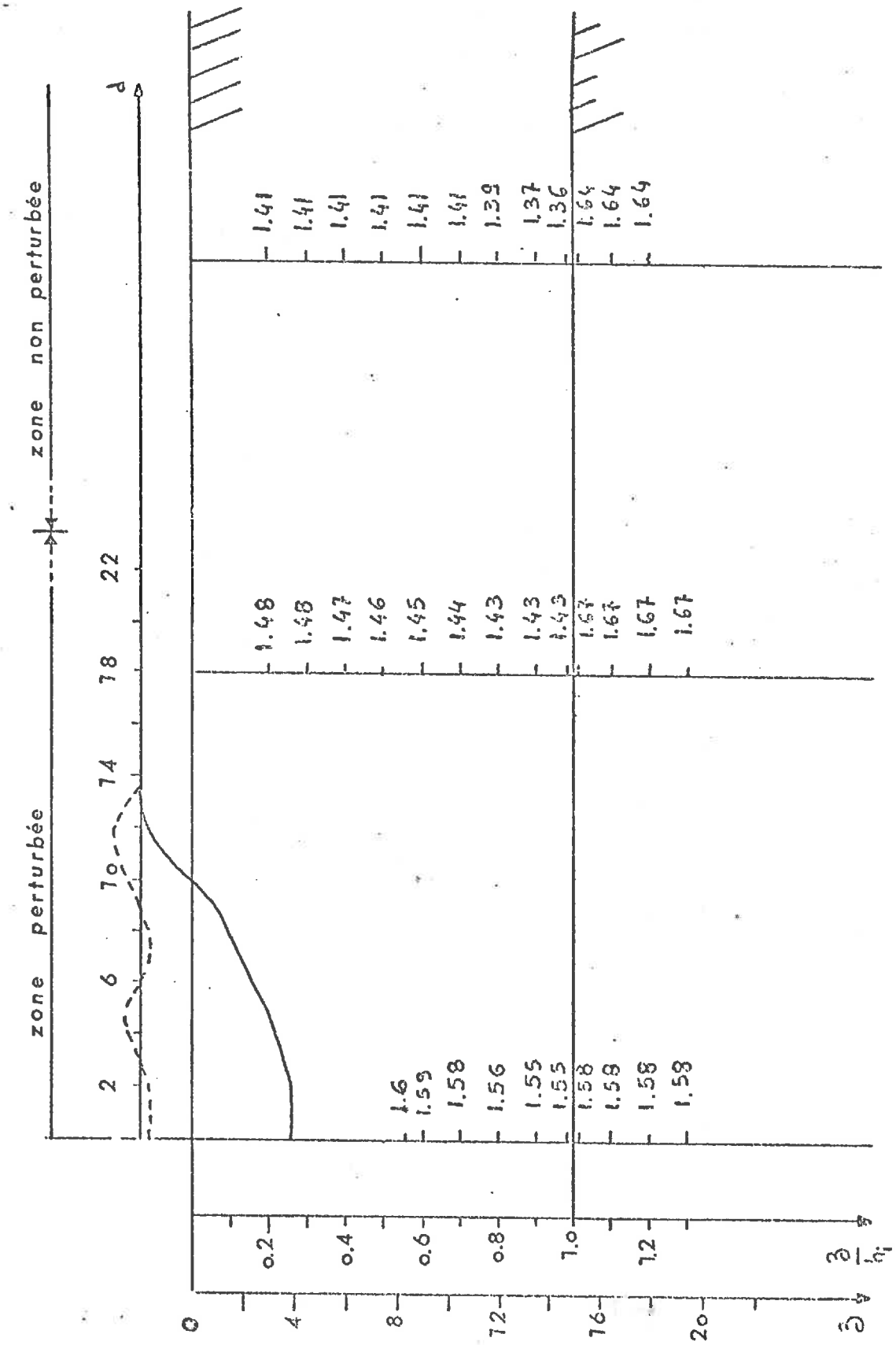


FIGURE XIV 5

CARTE DE LA COMPACITE

Essai E_5

Blum A-T
23.25

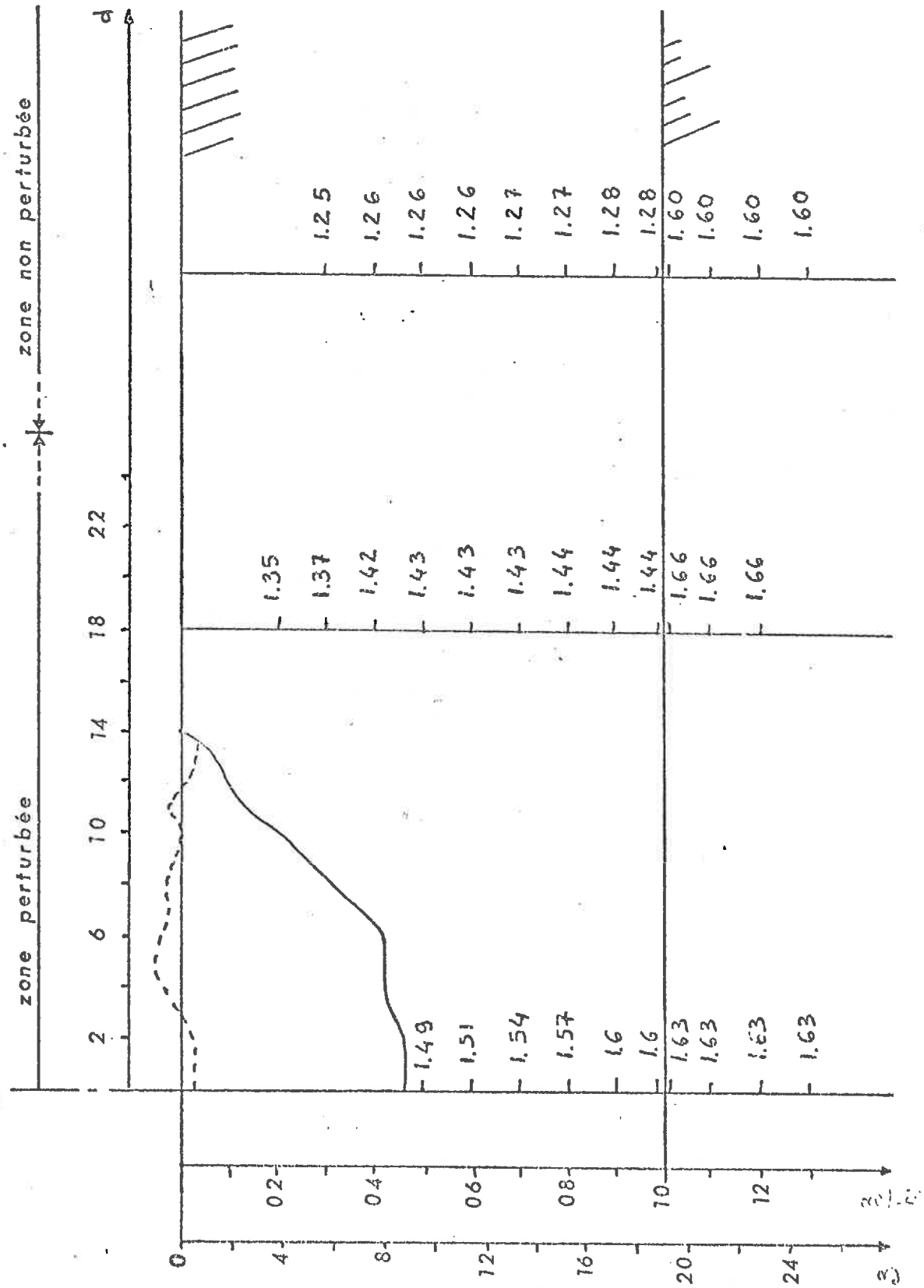


FIGURE XV

REPRESENTATION de l'ETAT CRITIQUE

dans les axes v, R, P

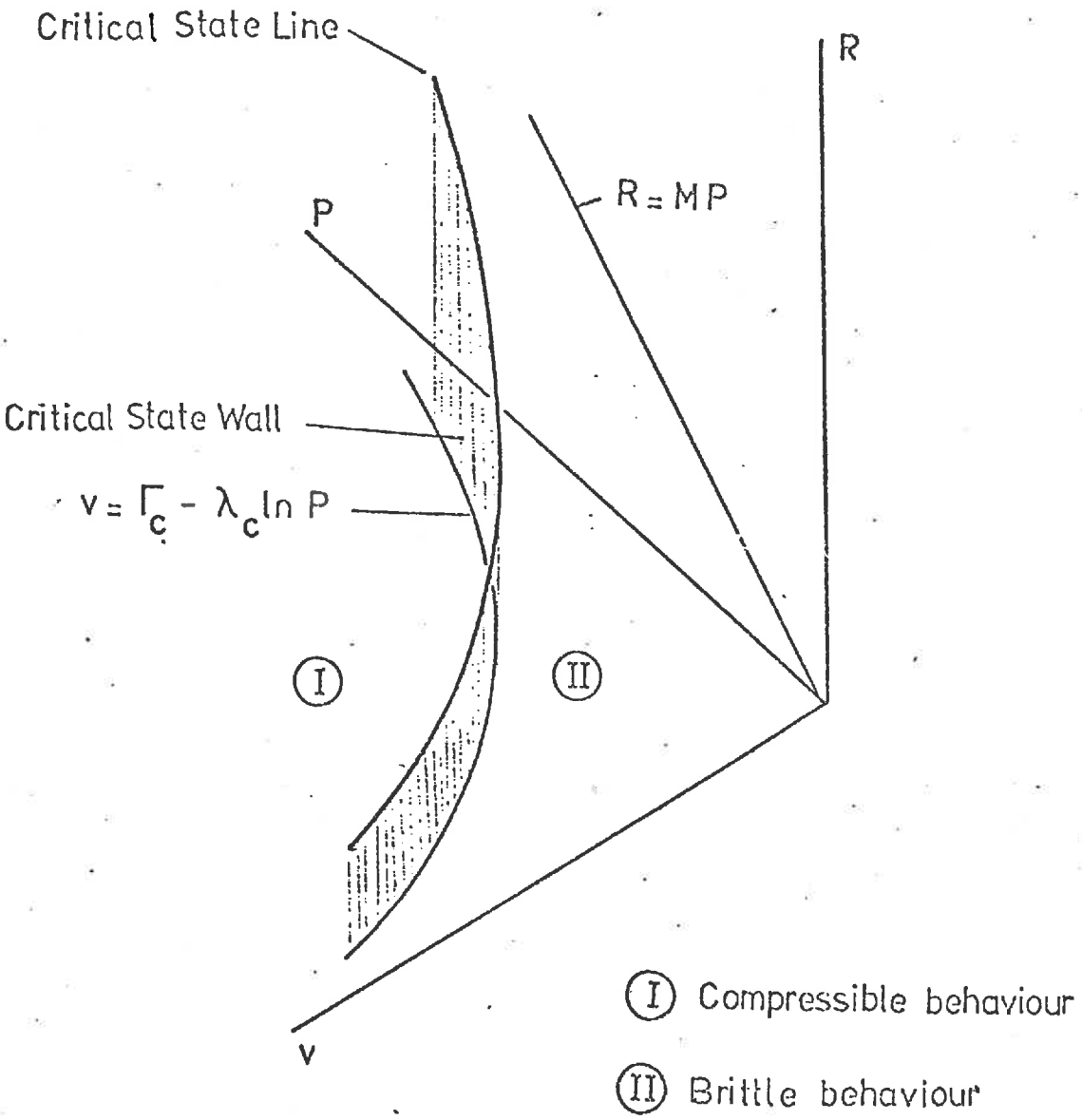


TABLEAU I

ANALYSE GRANULOMETRIQUE - DOSAGE EN MATIERE ORGANIQUE

Echantillon	ST		AT	
A (< 2 µ) %	33	33	32	32
2-20 µ %	35	36	36	37
20-50 µ %	19	18	18	17
50-200 µ %	11	11	12	12
200-2000 µ %	2	2	2	2
M.O. (libre) %	0,3		0,9	
M.O. (liée) %	1,8		2,0	
M.O. totale %	2,1		2,9	
M.O./A %	6,6		8,9	

Nous pouvons noter que le taux de matière organique de la parcelle ST n'est pas celui escompté, puisque nous souhaitions un apport de tourbe de 2 % ; nous avions en effet calculé un poids sec de tourbe, alors que celle-ci a été pesée et ajoutée humide.

C'est une raison, parmi d'autre, pour laquelle nous ne pourrons pas faire apparaître l'influence de la matière organique sur le comportement du sol.

TABLEAU II

Echantillon	Seuil de sensibilité W_c	Teneur en eau opt. W_{opt}	Densité sèche opt. $\gamma_{d\ opt}$
ST	8,8	19,0	1,70
AT	13,3	21,4	1,58

VALEURS CARACTERISTIQUES DES COURBES PROCTOR

SUR MATERIAU AT ET ST

TABLEAU III

VALEURS RELATIVES DE L'AUGMENTATION DE COMPACITE

SOUS LA ROUE CALCULEES PAR ASPERIMETRIES

- HYPOTHESE D'UN TASSEMENT VERTICAL-

Essai	h_i val. moy..	h_g	$\frac{\bar{\gamma}_d}{\bar{\gamma}_{d_i}}$ (%)	Moyenne
1	16	12,5 11,5 12,5 12,5	28 39 28 28	31
2	17	13 13,5 13 13,5	31 26 31 26	29
4	17	11,5 10,5 11 10	48 62 55 70	59
5	17	8 8 8 9	113 113 113 89	107

Il faut noter que ces variations ne présentent qu'une valeur indicative à cause de la très grande incertitude des mesures : difficulté d'évaluation de la cote du fond de travail et de la profondeur de l'ornière (échelle assez faible).

TABLEAU IV - 1

A 12,5 cm de l'axe					Sous la roue (ornière 4 cm)				
*z	**$\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	$\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	z	$\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	$\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$
3	0,16	1,26	0,2	1,39	2				
5	0,26	1,30	0,33	1,42	4				
7	0,37	1,27	0,47	1,42	6	0,33	1,42	0,33	1,41
9	0,47	1,33	0,6	1,40	8	0,44	1,42	0,44	1,47
11	0,58	1,37	0,73	1,29	10	0,56	1,44	0,56	1,47
13	0,68	1,24	0,87	1,27	12	0,67	1,39	0,67	1,34
15	0,79	1,15	1,00	1,46	14	0,78	1,37	0,78	1,25
17	0,89	1,15	1,13	1,58	16	0,88	1,29	0,88	1,17
19	1,00	1,34	1,27	1,57	18	1,0	1,20	1,0	1,43
					20			1,11	1,53
					22			1,22	1,5
Cote fond tra-vail	19		15		Cote fond tra-vail	18		18	

ESSAI E_1

*z = Profondeur absolue

**$\frac{z}{hi}$ = Profondeur/Cote fond de travail

TABLEAU IV-2

A 12,5 cm de l'axe					Zone non perturbée							Sous la roue (ornière 4 cm)		
* z	** z/hi	$\bar{\gamma}_d$	** z/hi	$\bar{\gamma}_d$	* z	** z/hi	$\bar{\gamma}_d$	** z/hi	$\bar{\gamma}_d$	** z/hi	$\bar{\gamma}_d$	* z	** z/hi	$\bar{\gamma}_d$
3	0,19	1,32	0,19	1,37	3			0,14	1,17	0,18	1,13	2		
5	0,31	1,31	0,31	1,41	5	0,33	1,21	0,24	1,30	0,29	1,37	4		
7	0,44	1,32	0,44	1,35	7	0,47	1,18	0,33	1,31	0,41	1,28	6	0,33	1,40
9	0,56	1,34	0,56	1,34	9	0,6	1,23	0,43	1,31	0,53	1,28	8	0,44	1,43
11	0,69	1,30	0,69	1,30	11	0,73	1,29	0,52	1,33	0,65	1,34	10	0,55	1,44
13	0,81	1,35	0,81	1,28	13	0,87	1,31	0,62	1,24	0,76	1,32	12	0,67	1,44
15	0,94	1,33	0,94	1,27	15	1,00	1,52	0,71	1,17	0,88	1,21	14	0,78	1,44
17	1,06	1,52	1,06	1,44	17	1,13	1,64	0,81	1,21	1,00	1,42	16	0,89	1,45
19	1,19	1,57	1,19	1,47	19	1,27	1,64	0,90	1,33	1,12	1,56	18	1,00	1,57
												20	1,11	1,62
												22	1,22	1,62
Cote fond tra-vail	16		16		Cote fond tra-vail	15		21		17		Cote fond tra-vail	18	

ESSAI E_2

* et ** : voir tableau IV_1

TABLEAU IV-3

Zone non perturbée			Sous la roue (ornière 6 cm)		
* z	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	* z	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$
3	0,21	1,32	2		
5	0,36	1,18	4		
7	0,5	1,29	6		
9	0,64	1,45	8	0,42	1,63
11	0,79	1,40	10	0,53	1,52
13	0,93	1,39	12	0,63	1,53
15	1,07	1,60	14	0,74	1,52
17	1,21	1,65	16	0,84	1,57
19	1,36	1,65	18	0,95	1,45
			20	1,05	1,59
			22	1,16	1,61
			24	1,26	1,59
Cote fond tra-vail	14		Cote fond tra-vail	19	

ESSAI E_3

* et ** : voir tableau IV_1

TABLEAU IV - 5

A 18 cm de l'axe					Zone non perturbée							Sous la roue (ornière 9 cm)						
* z	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	* z	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	* z	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$	** $\frac{z}{hi}$	$\bar{\gamma}_d$
3	0,19	1,31	0,19	1,39	3	0,18	1,29	0,19	1,26	0,18	1,09	3						
5	0,31	1,37	0,31	1,39	5	0,29	1,31	0,31	1,24	0,29	1,19	5						
7	0,44	1,37	0,44	1,45	7	0,41	1,29	0,44	1,26	0,41	1,24	7						
9	0,56	1,40	0,56	1,45	9	0,53	1,30	0,56	1,28	0,53	1,22	9						
11	0,69	1,41	0,69	1,45	11	0,65	1,30	0,69	1,28	0,65	1,22	11	0,58	1,50			0,58	1,38
13	0,81	1,42	0,81	1,46	13	0,76	1,31	0,81	1,27	0,76	1,29	13	0,68	1,53			0,68	1,53
15	0,94	1,44	0,94	1,48	15	0,88	1,28	0,94	1,33	0,88	1,23	15	0,79	1,51	0,83	1,57	0,79	1,53
17			1,06	1,65	17	1,00	1,40	1,06	1,50	1,00	1,42	17	0,89	1,52	0,94	1,64	0,89	1,55
19			1,19	1,68	19	1,12	1,52	1,19	1,52	1,12	1,62	19	1,00	1,57	1,06	1,65	1,00	
												21	1,11	1,50	1,17	1,66	1,11	1,63
												23	1,21	1,58	1,28	1,67	1,21	1,65
												25						
												27						
Cote fond travail	16		16		Cote fond travail	17		16		17		Cote fond travail	19		18		19	

ESSAI E_5

* et ** : voir tableau IV_1

TABLEAU V

VALEURS RELATIVES DE L'AUGMENTATION DE COMPACITE SOUS LA ROUE CALCULEES PAR MESURES A LA SONDE.

- HYPOTHESE D'UN TASSEMENT VERTICAL -

Essai	E_1	E_2	E_4	E_5
W_{s_i} (g)	23	23	21	24
W_{s_g} (g)	19	20	14	16
$\frac{/\Delta W_s/}{W_{s_i}}$ (%)	17	13	33	33
$\frac{/\Delta \bar{\gamma}_d/}{\bar{\gamma}_{d_i}}$ (%)	6	12	13	23

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BODDAERT D. : - 1976 - Etude du comportement mécanique d'un sol travaillé soumis au roulage d'engins agricoles.
Mémoire de fin d'étude E.N.I.T.A. de Dijon - I.N.R.A. Avign

FAURE A. : - 1976 - Influence de la phase argileuse sur la susceptibilité au tassement des sols.
Sc. du Sol, Bul. AFES n° 2, 121-130.

FAURE A. : - 1978 - Comportement des sols au compactage. Rôle de l'argi et conséquences sur l'arrangement des grains.
Thèse de doctorat présentée à l'U.S.M. Grenoble - I.N.R.A. Avignon.
- 1978 - Texte de soutenance de thèse (Communication personnelle).

FAURE A., GUERIF J. : - à paraître - Etude statistique de l'influence des matières organiques sur le comportement au tassement des sol

HENIN S., MONNIER G., GRAS R. : - 1969 - Le profil cultural.
Masson et Co. Ed. - Paris -.

KURTAY T., REECE A.R. : - 1970 - Plasticity theory and critical state. Soil mechanics.
Journal of terramechanics, Vol. 7, n° 3 and 4, pp 23 to 56, PERGAMON Press (Great Britain)

MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C. : - 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente des petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité d'un sol.
Ann. Agron., 24, (5), 533-545.