



HAL
open science

Mise au point d'un prototype de penetrometre a plaque destine a l'etude de la portance des sols

P. Hedoire

► **To cite this version:**

P. Hedoire. Mise au point d'un prototype de penetrometre a plaque destine a l'etude de la portance des sols. Sciences du Vivant [q-bio]. 1988. hal-02856775

HAL Id: hal-02856775

<https://hal.inrae.fr/hal-02856775>

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.

E.N.I.T.A. DIJON QUETIGNY

**MISE AU POINT D'UN PROTOTYPE DE
PENETROMETRE A PLAQUE DESTINE A
L'ETUDE DE LA PORTANCE DES SOLS**

Mémoire de fin d'étude

Philippe HEDOIRE

Septembre 1988

AVANT - PROPOS

Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire a été réalisé à la Station de Science du Sol du Centre de Recherches Agronomiques d'Avignon. Je remercie son Directeur, Monsieur P.STENGEL, pour l'accueil qu'il m'a réservé.

Que Monsieur J.GUERIF, qui a dirigé ce travail, Monsieur J.Royère, pour sa collaboration technique, et tous ceux qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire trouvent ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

RESUME

Un prototype de pénétrömètre à plaque destiné à l'étude de la portance d'un sol a été mis au point. Celui-ci a été conçu dans l'objectif d'accéder à la cinétique de déformation du sol, laquelle est trop rarement prise en compte dans les tests de portance.

La bonne connaissance du fonctionnement du prototype a nécessité une étude critique des caractéristiques de fonctionnement de l'appareil dans des conditions standards et indépendamment du comportement du sol.

Ses performances ont ensuite été testées dans des conditions de sol extrêmes :

- horizon continu, homogène, isotrope et à la capacité de rétention
- horizon travaillé, donc hétérogène, isotrope à la capacité de rétention et sans

gradient hydrique marqué.

- horizon travaillé, initialement à la capacité au champ, à différentes étapes de la dessiccation, faisant apparaître un gradient marqué de teneurs en eau.

Il ressort de cette étude que le prototype auquel nous avons abouti, bien qu'il nécessite quelques améliorations, est tout à fait susceptible de servir de base à l'élaboration d'un test de portance.

SUMMARY

A prototype of plate penetrometer dedicated to soil bearing capacity investigations, has been developed according to the defined needs.

It has been developed in order to collect data concerning the kinetic of soil deformation which is rarely taken into account in the literature.

A good knowledge of the efficiency of the prototype required a critical study of the inherent characteristics of the apparatus in controlled conditions, not taking soil behaviour into account.

Its performances were tested in a wide range of soil physical conditions :

- continuous, homogeneous, and isotropic layers of soil at field capacity.
- tilled layers, and so heterogeneous, but isotropic in regard to water profile.
- tilled layers initially at field capacity, different levels of anisotropy in regard to water

profile, were induced by evaporation.

It appeared from this study that the prototype, which has been developed, even if some improvements were to be made, is able to be used as a basis for elaborating bearing test procedure.

PLAN

- I. INTRODUCTION
- II. TECHNIQUES D'APPRECIATION DE LA PORTANCE, ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES :
 - A. Le jugement d'expert :
 - B. Les pénétromètres à cône :
 - 1. Statiques :
 - 2. Dynamiques : pénétromètres à percussion
 - C. Les pénétromètres à plaque :
 - 1. Leur intérêt par rapport aux pénétromètres coniques :
 - 2. Principes d'utilisation et d'interprétations courants :
 - D. Conclusion partielle :
- III. DEMARCHE GENERALE :
- IV. LE PROTOTYPE :
 - A. Présentation générale (Fig.1 Photo.1):
 - B. Description détaillée des éléments de l'appareil :
 - 1. Circuit pneumatique :
 - a) Alimentation pneumatique :
 - b) Description du circuit et de son fonctionnement :
 - (1) Descente du piston :
 - (2) Montée du piston :
 - 2. Mesures, acquisition, et enregistrement des données :
 - a) Capteur et conditionneur de déplacement :
 - b) Capteur et conditionneur de pression :
 - c) Acquisition des données :
 - d) Restitution des données :
 - C. Caractéristiques de fonctionnement du système :
 - 1. Vitesse maximum du piston permise par le montage :
 - 2. Les trois composantes de la déformation, principe de correction :
 - D. Mode opératoire :
 - 1. Réglage de la pression au sol visée P_S :
 - 2. Manoeuvre d'approche :
 - 3. Déroulement du test proprement dit : (photo.3)
 - E. Améliorations du prototype
 - 1. Vitesse de mise en pression nominale :
 - 2. Mesure directe de la déformation du sol, suppression des corrections :
 - 3. Automatisation de la chaîne de restitution des données :
- V. ETUDE IN SITU :
 - A. Objectifs :
 - B. Matériel et méthode :
 - 1. Le sol :
 - 2. Préparation des parcelles expérimentales :
 - a) Parcelle compactée (Photo 5) :
 - b) Parcelle travaillée :
 - c) Parcelle en dessiccation :
 - C. Résultats et discussion :
 - 1. Comportement du prototype dans des matériaux dépourvus de gradient hydrique :
 - a) Analyse de la déformation à l'équilibre
 - (1) Principe d'analyse de la sensibilité du test :
 - (2) Estimation de la déformation du sol :
 - (3) Contrôle de la mise en pression du piston :
 - b) Analyse des cinétiques :

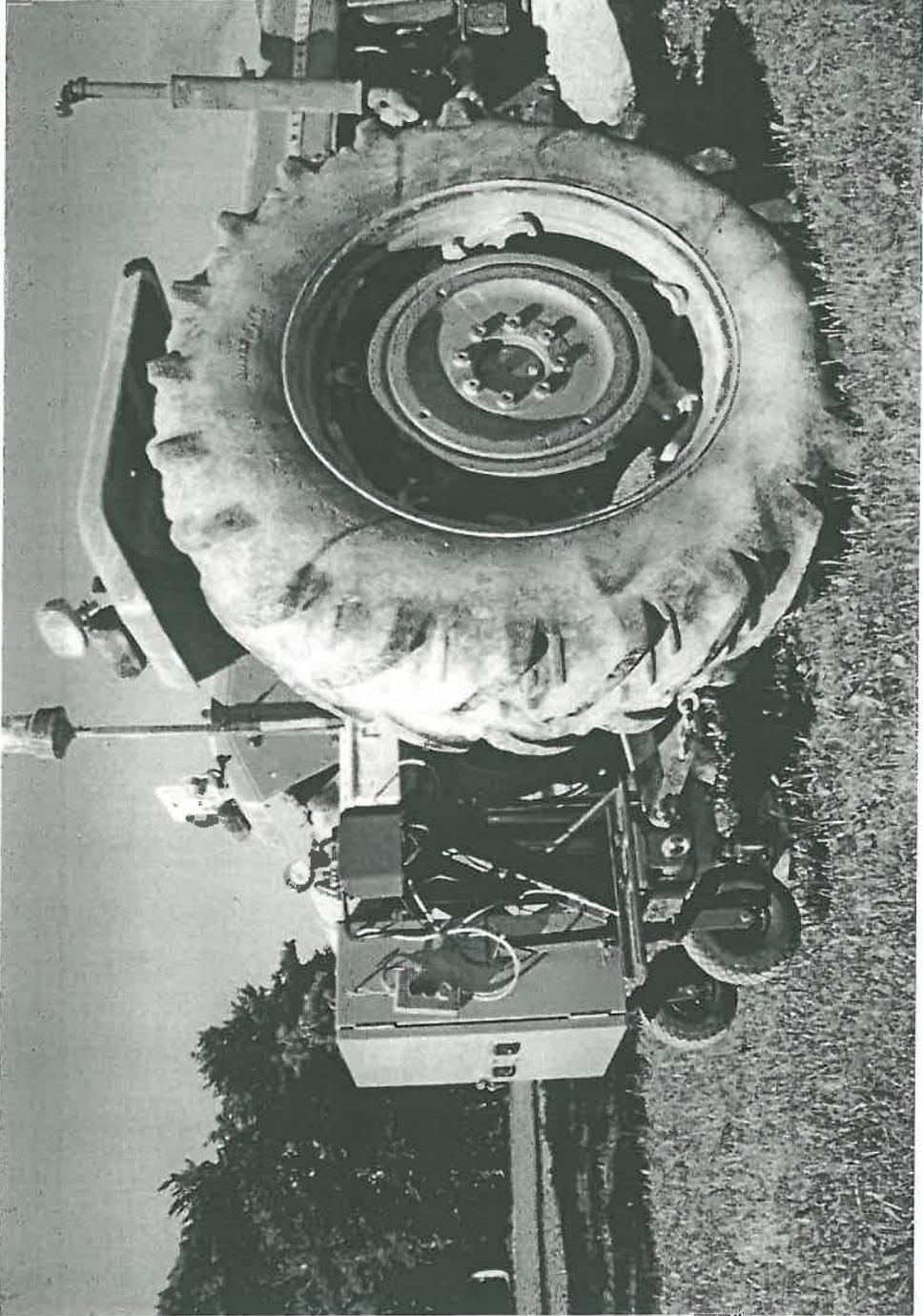
2. Comportement du prototype dans un matériau présentant un gradient hydrique induit par dessiccation à l'évaporation (Fig.13):

- a) Déformations à l'équilibre :
- b) Mises en pression :
- c) Relations pression-déformation :

3. Typologie des relations pression-déformation :

- a) Parcelle en dessiccation
- b) Parcelle compactée + Parcelle travaillée (Fig. 16)

VI. CONCLUSION



PENETROMETRE ATTELE

I. INTRODUCTION

On peut définir la portance comme la propriété d'un sol à résister à l'enfoncement sous le passage d'un engin. Dès lors la profondeur d'enfoncement apparaît comme la variable à privilégier pour accéder à une caractérisation de la portance. En la comparant aux caractéristiques dimensionnelles des pneumatiques, certains auteurs élaborent des indices de portance à caractère binaire : on passe/on ne passe pas. Il s'agit en ce sens d'une notion plus restrictive que celle de traficabilité, laquelle sous entend une appréciation de la faisabilité de la circulation pour une tâche donnée et suppose la prise en compte d'autres propriétés comme l'adhérence ou la stabilité du véhicule vis à vis du relief. On peut remarquer qu'aucune de ces deux notions n'intègrent une évaluation des dégâts éventuels occasionnés par les engins.

Ce travail a pour but la mise au point d'un appareil permettant d'élaborer des tests destinés à apprécier la portance dans des essais comparatifs (exemple : parcelles drainées ou non), ou analytiques (exemple : influence du ressuyage dû au drainage sur le délai d'accessibilité à une parcelle). Cet appareil doit éviter, entre autres, les principaux défauts concernant les pénétromètres à cônes, évoqués généralement par les utilisateurs. Dans un premier temps nous passerons en revue les différentes méthodes disponibles dans la littérature. Nos objectifs nous amèneront à préciser les principales fonctions que l'appareil devra être capable d'assurer. Enfin, l'appareil réalisé et son fonctionnement analysé, nous tenterons, à partir d'essais réalisés *in-situ*, d'apprécier son aptitude à fournir les bases d'un test d'évaluation de la portance.

II. TECHNIQUES D'APPRECIATION DE LA PORTANCE, ELEMENTS BIBLIOGRAPHIQUES :

A. Le jugement d'expert :

Le principe consiste à étalonner un test de terrain (pénétration à cône) ou de laboratoire (point d'adhésivité, limites d'Atterberg) à partir d'estimation d'experts (essentiellement des agriculteurs). Même si leurs jugements semblent cohérents par rapport au test choisi, on peut s'interroger sur l'intérêt d'une telle méthode dans la mesure où le jugement de l'expert n'est valable que pour une micro région, pour des sols, et pour des conditions climatiques familiers à l'expert. En particulier, elle ne fait en aucun cas référence aux caractéristiques des véhicules concernés.

B. Les pénétromètres à cône :

Deux types de pénétromètres peuvent être distingués en fonction du mode d'enfoncement utilisé.

1. Statiques :

Le pénétromètre dit "statique" est enfoncé à une vitesse supposée constante, (couramment 3 mm/s). La force nécessaire à la pénétration peut être appliquée manuellement, ou mieux à l'aide d'une crémaillère ou d'un vérin, appareillages qui nécessitent un point d'appui généralement fourni par un véhicule. La mesure consiste à évaluer la résistance de pointe soit pour atteindre un enfoncement donné soit au cours de l'enfoncement, la pointe et la tige support étant conçues pour minimiser les frottements. Cette mesure peut être effectuée avec un dynamomètre à ressort et enregistrée sur papier (Morlon, 1984; Duret, 1984), ou avec un capteur de force couplé à une acquisition de donnée (Anderson, et al, 1980; O'Sullivan, et al, 1983; Billot, 1988).

Dans le domaine du Génie civil on peut rencontrer des pénétromètres plus sophistiqués, permettant entre autres d'estimer les frottements latéraux, lors de la pénétration, et souvent couplés à d'autres appareils de mesures comme les pressiomètres par exemple. Leurs dimensions (cônes et tiges de plusieurs cm de diamètre) sont de ce fait incompatibles avec des évaluations des propriétés mécaniques des couches de surface des sols travaillés.

2. Dynamiques : pénétromètres à percussion

Ceux ci comportent généralement, une tige à extrémité conique, pénétrant dans le sol sous l'effet d'un battage (une masse métallique, coulissant sur la tige joue le rôle de "mouton"). Les pénétrogrammes dynamiques (reliant profondeur d'enfoncement et nombre de coup de mouton) obtenus sont difficilement interprétables en terme de résistance statique. Ces appareils résultent, comme précédemment, d'une miniaturisation d'appareil du génie civil. Ils sont dans ce cas destinés à la simulation du battage des pieux. Leur fabrication est peu onéreuse, et ne nécessitent aucun point d'appui; mais ils ne peuvent servir en fait que de tests comparatifs (Simonin, 1985).

C. Les pénétromètres à plaque :

1. Leur intérêt par rapport aux pénétromètres côniques :

Le reproche le plus fréquent, fait par les utilisateurs, concernant les pénétromètres à aiguille tient au fait que, généralement, les sols cultivés présentent, relativement à la taille du cône, une hétérogénéité telle que les profils pénétrométriques ne renseignent pas sur le comportement mécanique global des couches de sol traversées, mais sur la résistance à la rupture de chaque élément structural rencontré au cours de la descente. L'utilisation d'une plaque devrait permettre, de s'affranchir de ce problème d'échelle, et d'approcher des valeurs possibles de la surface de contact sol-pneumatique.

Par ailleurs la possibilité de combiner différentes surfaces de plaque ainsi que différentes forces, permet d'analyser, l'effet propre de la pression de contact et de la charge sur essieu. Des travaux antérieurs ont montré, qu'à pression de contact égale, une augmentation de charge sur l'essieu se traduit par une augmentation du volume affecté par le compactage, et ceci tout particulièrement en profondeur (Söhne, ; Sudakov, et Okhytin, 1987).

L'utilisation de plaques circulaires est essentiellement motivée par la simplification des calculs qu'entraîne la symétrie de révolution des volumes de sol concernés par les tassements.

2. Principes d'utilisation et d'interprétations courants :

Le principe de ce type de pénétromètre consiste à enfoncer une plaque à vitesse constante et à mesurer la force qu'il convient d'exercer pour atteindre une profondeur z donnée. Les travaux de mise au point sont menés sur des matériaux homogènes, isotropes et continus, ce qui autorise un certain nombre d'hypothèses dans les tentatives de formalisation des phénomènes. Ces tests à plaque sont utilisés dans des "modélisations" ayant toutes comme point de départ l'ajustement de Bekker (1956) :

$$P = k z^n \dots\dots\dots(1)$$

La plupart des auteurs s'emploient à relier ces coefficients n et k à des propriétés du sol, comme la cohésion et l'angle de frottement, paramètres de la théorie de Mohr-Coulomb, et des caractéristiques (taille et forme) de la plaque utilisée (Sela et Ehrlich, 1972), mais l'absence de réelle signification analytique de cette formule n'est que rarement évoquée dans la bibliographie (Wien dieck,1968).

Si l'utilisation des tests à plaque semble tout à fait adaptée à des comparaisons de traitements (drainage / non drainage, par exemple), ou à l'étude du comportement au compactage de couches de sol in situ (Guérif, 1984), par contre elle ne permet en aucun cas de simuler strictement le comportement du sol lors du passage de roues. En effet il ne faut pas négliger, les aspects spécifiques au contact pneumatique/sol lors du roulage : chargement progressif, action des barrettes (poinçonnement et cisaillement),...

D. Conclusion partielle :

Au vu de ces quelques éléments bibliographiques, on constate que les tests de portance sont tous fondés sur des techniques qui procèdent à un enfoncement à vitesse constante, où l'on mesure la force conduisant à une profondeur donnée. Cependant la déformation du sol sous charge, dans le cas des roulages par exemple, ne se fait pas à vitesse constante, et résulte de temps très court d'application de la charge. Bien que la cinétique de déformation ne soit pas classiquement prise en compte dans les tests de portance, on dispose dans la littérature de travaux théoriques relatifs à la rhéologie des sols, nombreux en génie civil, moindre en génie rural. Par ailleurs on rencontre quelques travaux expérimentaux montrant l'influence significative de la vitesse d'avancement des véhicules et donc du temps de contact sol/pneumatique (Pope, 1971 ; Okhytine, 1987).

Il apparaît donc souhaitable d'accéder à l'appréciation de la déformation au cours du temps, consécutive à l'application d'une pression donnée. On pourra donc exprimer alors la profondeur d'enfoncement en fonction de la pression, et l'on s'affranchit ainsi de l'hypothèse de réciprocité de la fonction que suppose, à tort, la méthode classique.

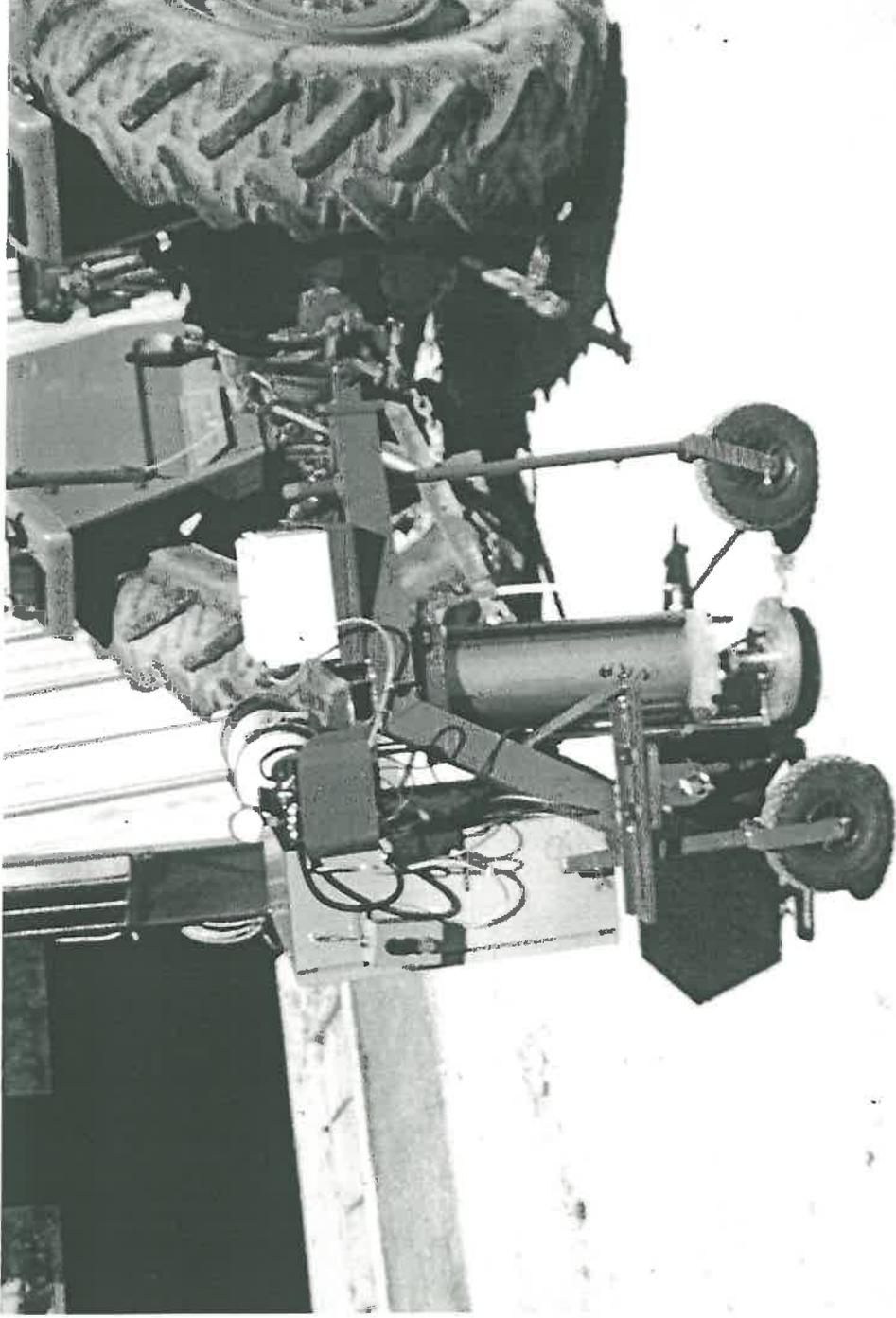
III. DEMARCHE GENERALE :

C'est donc vers un aspect cinétique que nous allons porter l'effort, dans la construction du prototype. Il conviendra donc de pouvoir procéder à l'application rapide d'une charge donnée, ainsi qu'à la mesure et à l'enregistrement de la déformation au cours du temps. Ce prototype étant destiné à l'élaboration de protocoles d'estimation de la portance dans des conditions variées, il convient qu'il offre le maximum de possibilités dans le cadre de l'option choisie, et que les variables en jeu soient accessibles à la mesure et à l'enregistrement, de manière à contrôler au mieux le processus.

Après avoir décrit le prototype obtenu à partir de ce sommaire cahier des charges, on présentera ses performances dans des conditions de sol extrêmes :

- horizon continu homogène isotrope et à la capacité de rétention.
- horizon travaillé, donc hétérogène, isotrope, et à la capacité de rétention, et sans gradient hydrique marqué.
- horizon travaillé, initialement à la capacité de rétention, à différentes étapes de la dessiccation, faisant apparaître un gradient marqué de teneurs en eau.

Les états physiques de chacune des parcelles sont appréciés par analyse des systèmes de porosité, en combinant des mesures de profils hydriques, des profils de masses volumiques effectués à la sonde gamma à transmission LPC-INRA, et des mesures de laboratoire donnant les caractéristiques texturales de l'espace poral au gonflement-retrait (se reporter Annexe 1 et 2).



VUE D'ENSEMBLE DU PENETROMETRE A PLAQUE

IV. LE PROTOTYPE :

A. Présentation générale (Fig.1 Photo.1):

Une plaque circulaire (3), appliquée au sol par l'intermédiaire d'un vérin pneumatique permet d'exercer des pressions d'intensités variables à la surface du sol. Le vérin est fixé sur un bâti rigide par l'intermédiaire d'une noix articulée (9) assurant la verticalité du vérin, indépendamment de l'horizontalité du tracteur.

La mise en service du système nécessite un point d'appui lors de l'application de la charge. Les tracteurs étant les véhicules les plus facilement disponibles sur les lieux d'expérimentation on a donc choisi d'atteler le bâti au système trois points(4). Sur le plan pratique, le fait que le pénétromètre soit attelé à l'arrière du tracteur nécessite que l'approche de la zone d'essai se fasse en marche arrière pour ne pas créer lors du passage des roues, un compactage préalable à la réalisation du test.

Afin que les vibrations du tracteur ne viennent pas perturber la cinétique d'enfoncement on travaille toujours moteur arrêté. On ne peut donc pas utiliser le compresseur du tracteur pour alimenter le vérin.

On utilise en alternance deux bouteilles d'air comprimé normalement destinées à la plongée sous-marine (1). En effet le remplissage de ces bouteilles s'effectue facilement sur le terrain à l'aide d'un compresseur, de petite taille, autonome du fait de son moteur à essence. Ces bouteilles contiennent 12 litres d'air comprimé à 200 bar ($200 \cdot 10^2$ kPa).

Compte tenu des pressions maximum admissibles par le piston et les différents éléments du circuit pneumatique, un détendeur primaire, situé à la sortie de la bouteille, et réglé à 10 bar (10^3 kPa) interdit toute surpression dans le réseau.

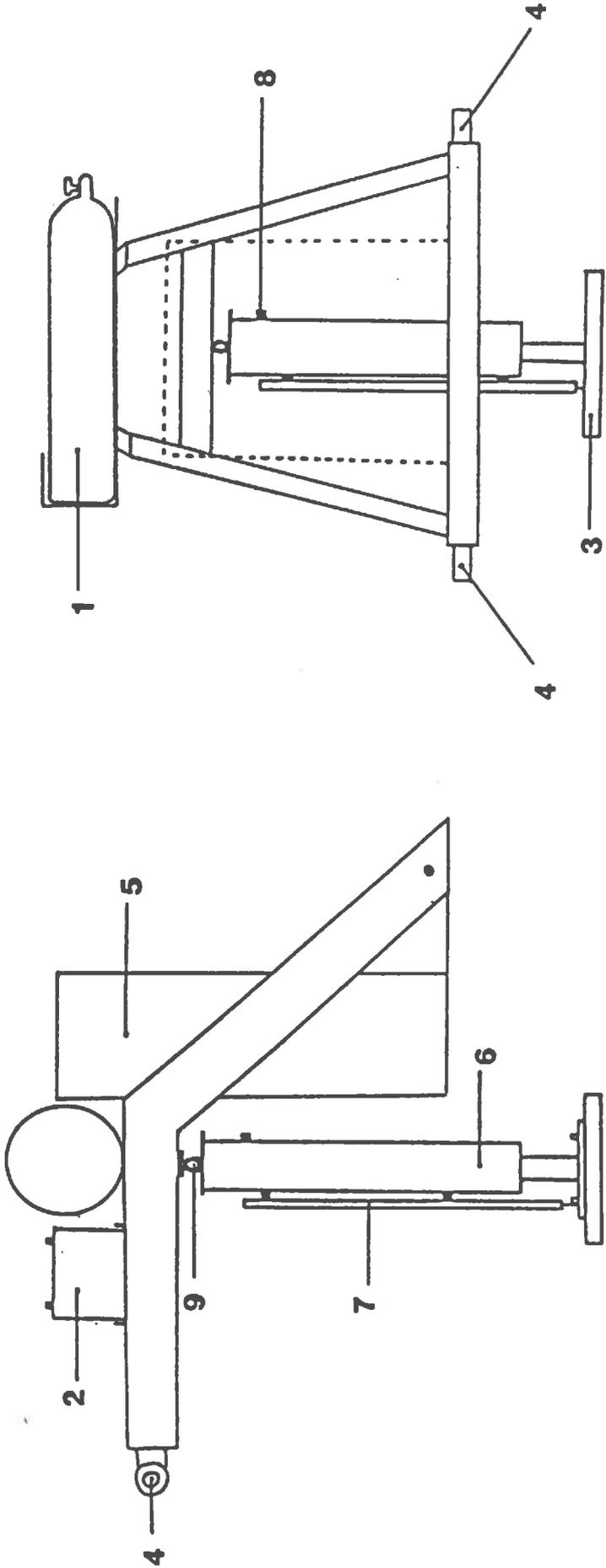
Une armoire métallique (5) abrite les éléments du circuit pneumatique, ainsi que les conditionneurs des capteurs et l'acquisition de donnée.

2 batteries de 12 volt montées en série (2) assurent l'alimentation des électrovannes du réseau pneumatique et des conditionneurs.

Enfin, pour accéder aux variables qui nous permettrons d'analyser la cinétique de déformation du sol, deux capteurs sont nécessaires :

- un capteur de déplacement (7) fixé parallèlement au cylindre du vérin.
- un capteur de pression (8) fixé dans la partie supérieure du vérin.

PENETROMETRE A PLAQUE

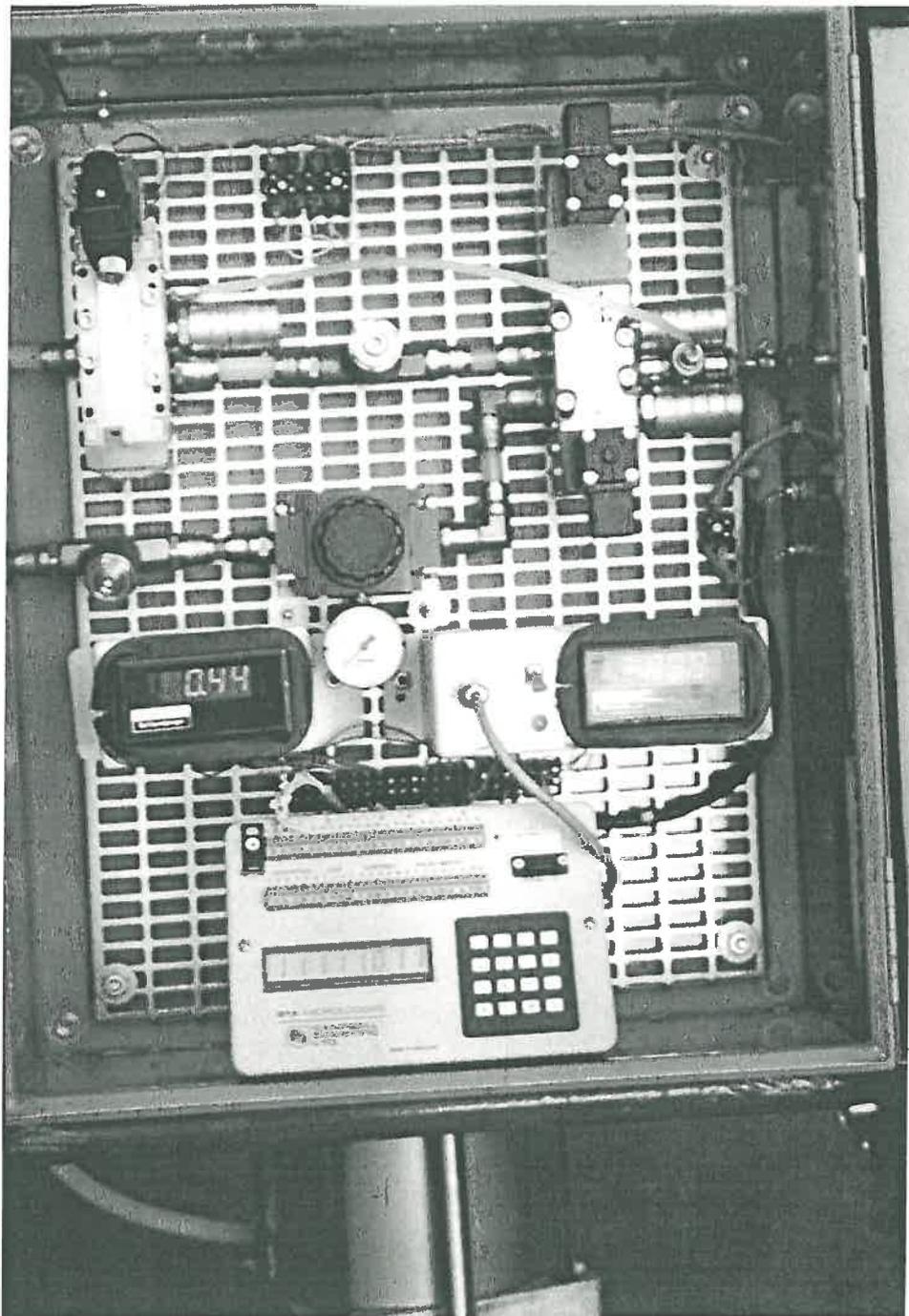


VUE LATÉRALE

VUE ARRÉRIÈRE

- 1) Bouteille d'air comprimé
- 2) 2 batteries de 12 volts en série
- 3) Plaque circulaire interchangeable
- 4) Fixation 3 points
- 5) Armoire contenant l'essentiel du circuit pneumatique
- 6) Vérin pneumatique
- 7) Capteur de déplacement
- 8) Capteur de pression
- 9) Noix de fixation

Fig. 1



CIRCUIT PNEUMATIQUE et ACQUISITION DE DONNEES

B. Description détaillée des éléments de l'appareil :

Celui-ci, entièrement réalisé à la station de Science du sol d'Avignon (INRA), tente de répondre, aux impératifs techniques imposés par les objectifs préalablement définis.

1. Circuit pneumatique :

a) Alimentation pneumatique :

Une des conditions importantes pour accéder à la cinétique de déformation du sol réside dans la nécessité d'avoir une vitesse de déplacement potentielle du piston, supérieure à celle de la déformation du sol sous charge. En effet, dans le cas d'un matériau comme le sol,

- si la vitesse de déformation de la couche de sol étudiée est inférieure à la vitesse de déplacement du piston dans l'air, alors la cinétique du piston rendra réellement compte de la viscosité du matériau étudié (Fig 2 segment AC₂), c'est à dire de sa déformation au cours du temps.

- si par contre la vitesse de déplacement du piston dans l'air est inférieure à la vitesse de déformation potentielle de la couche de sol étudiée, alors la vitesse de déplacement observée sera celle du piston dans l'air (segment AB) Lorsque la viscosité de la couche devient telle que sa vitesse de déformation est inférieure à la vitesse de déplacement du piston dans l'air, on est ramené au cas précédent (segment BC₃).

Une étude antérieure a montré que l'usage d'un circuit hydraulique ne permettait pas d'accéder à cette cinétique (Guérif, 1984). Ainsi le choix s'est fait en faveur du circuit pneumatique en espérant un gain significatif de la vitesse potentielle du piston.

b) Description du circuit et de son fonctionnement : (fig.3 et photo.2)

(1) Descente du piston :

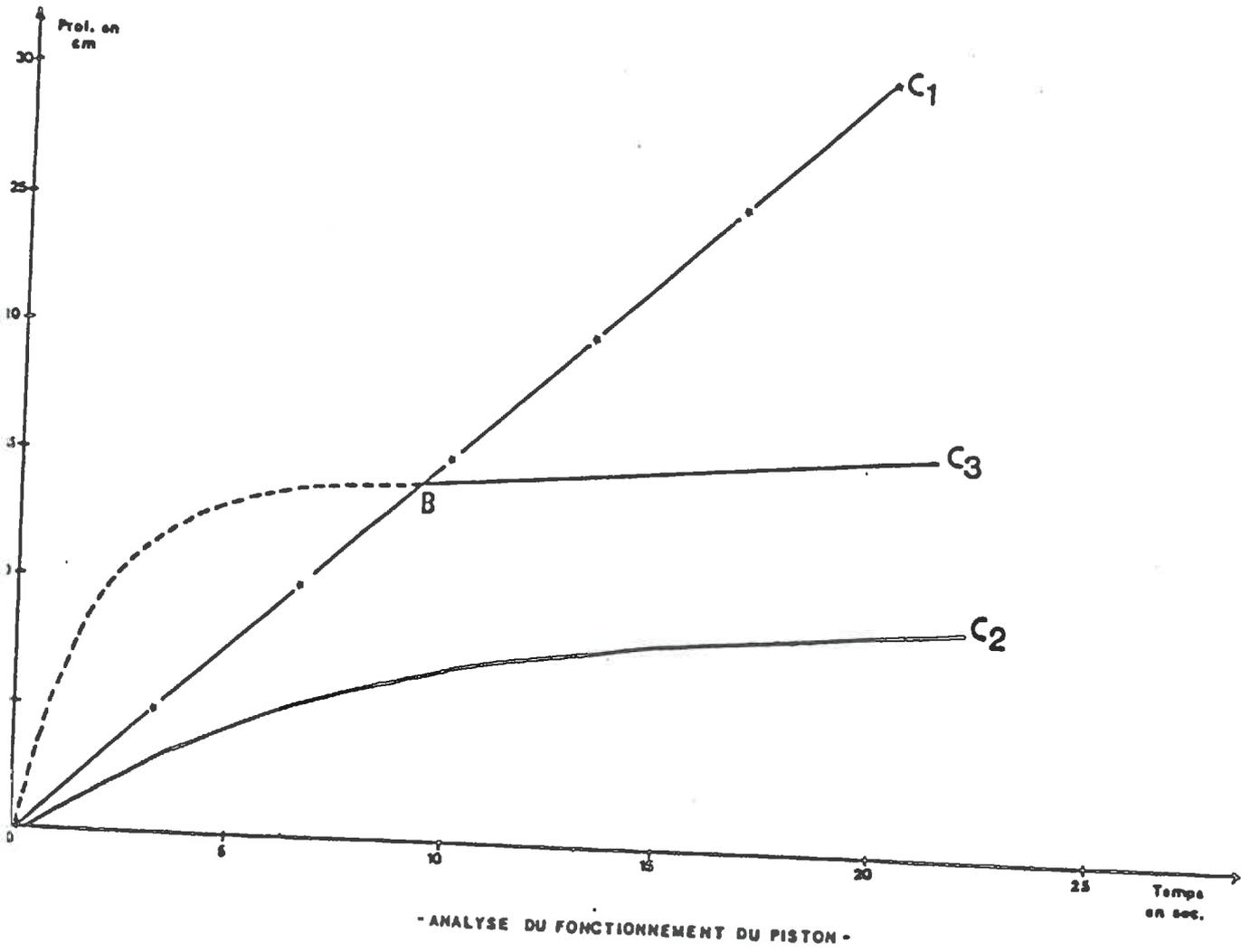
Pour faire descendre le piston, il faut augmenter la pression dans la chambre supérieure (A) du vérin. Ensuite, suivant que l'on supprime plus ou moins rapidement la contre pression dans la chambre inférieure (B), on peut moduler la vitesse.

L'air arrive dans la chambre (A) du vérin lorsque l'électrovanne (2) est activée. Le piston ne descend que lorsque la pression dans la chambre (B) est inférieure à celle de la chambre (A). La chambre (B) peut être purgée de deux façons :

- Soit brutalement si le départ de l'air se fait par la fuite 9(a); la descente est alors rapide.
- Soit relativement lentement, si le départ de l'air s'effectue par la fuite 9(c), après traversée du bipasse 5(b). Celui-ci a pour effet de laisser passer l'air rapidement dans un sens et de le freiner dans l'autre. On peut régler le débit de la fuite à son niveau.

L'électrovanne (3) a pour fonction d'orienter le départ de l'air vers les fuites 9(a) ou 9(c).

Fig. 2



(2) Montée du piston :

Le fonctionnement du système se déduit aisément du précédent. La remontée du piston est assurée par une augmentation de la pression dans la chambre (B) l'arrivée d'air étant pilotée par l'électrovanne (2). La régulation de la purge de la chambre (A) commande la vitesse de remontée du piston. Cette régulation est ici simplifiée, seule une vitesse lente étant nécessaire. La remontée lente est assurée par le ralentissement du débit de fuite 9(a), dont le réglage est effectué au niveau du bipse 5(a). Une purge brutale, et/ou totale peut être éventuellement effectuée par la vanne manuelle (17).

2. Mesures, acquisition, et enregistrement des données :

a) Capteur et conditionneur de déplacement :

Ce capteur, de type mécanique est constitué d'un corps cylindrique fixé le long du cylindre du piston et dans lequel peut coulisser une tige fine de 40cm de long. Celle-ci, rendue solidaire de la plaque à l'une de ses extrémités, permet de suivre la cinétique d'enfoncement de la plaque dans le sol. Un noyau de fer doux fixé à l'autre extrémité se déplace entre des bobinages électriques contenus dans le corps cylindrique du capteur. La position du noyau de fer doux par rapport aux bobines détermine, par induction différentielle, une tension proportionnelle au déplacement.

Un conditionneur est associé à ce capteur et assure plusieurs fonctions :

- il permet d'assurer le réglage du zéro,
- il alimente le capteur par une tension alternative pour tirer pleinement partie de sa sensibilité,
- il traite le signal de mesure qui doit être démodulé et filtré,
- il permet le réglage de la sensibilité.

Dans notre cas le capteur de déplacement est étalonné de telle sorte que la tension du signal de sortie en mvolt corresponde au déplacement en mm.

b) Capteur et conditionneur de pression :

L'utilisation d'air comprimé pour la mise en charge du vérin implique nécessairement une cinétique de mise en pression, qui dépend du débit du circuit pneumatique, du volume de la chambre supérieure (A) du piston, et de ses variations. Le suivi de cette cinétique de mise en pression est donc nécessaire.

Un capteur de pression a donc été installé dans la partie supérieure du piston, il mesure la pression dans la chambre supérieure (A) et permet de suivre son évolution.

On peut déduire de la pression pneumatique dans la chambre (A) P_A , la pression au sol P_S . On peut écrire :

$$P_A = F / S_{\text{piston}} \dots \dots \dots (2)$$

$$P_S = (F - f) / S_{\text{plaque}} \dots \dots \dots (3)$$

où F est la force exercée sur le piston, (en Newton)

où f représente les frottements dus au joint situé entre piston et cylindre, (en Newton)

où S_{piston} et S_{plaque} représentent les surfaces respectives du piston et de la plaque (en mètre carré).

où P_A et P_S sont exprimées en Pascal.

D'après l'abaque du constructeur: (annexe 3)

$$F - f = 0.03 P_A - 10^3 \dots\dots\dots(4)$$

en remplaçant dans l'équation (3) le terme $(F - f)$, par sa valeur donnée par l'équation (4), on a :

$$P_S = (0.03 P_A - 10^3) / S_{\text{plaque}} \dots\dots\dots(5)$$

le diamètre de la plaque étant de 0.25m, il vient :

$$P_S = 0.611 P_A - 20372 \dots\dots\dots(6)$$

Le principe de fonctionnement du capteur est fondé sur la notion d'effet piezoresistant (variation de la conductivité d'un matériau lorsqu'il est soumis à une contrainte). Le capteur est une membrane en silicium monocristalin qui constitue à la fois le corps d'épreuve et le transmetteur électrique. Quatre jauges de contraintes branchées en pont de Wheatstone sont intégrées sur la membrane par une méthode de fabrication des semi-conducteurs. Cette technologie, comparée à celle des résistances collées, améliore très sensiblement ce type de capteurs : hystérésis négligeable, faible dérive à long terme, faible sensibilité thermique etc... Le signal de sortie a une tension proportionnelle à la pression.

Le conditionneur assure une alimentation stabilisée, une amplification du signal et permet l'étalonnage du capteur. Celui-ci a été réalisé de telle sorte que la sortie en mV correspond directement à la pression en kPa.

c) Acquisition des données :

Les données sont finalement recueillies par l'intermédiaire d'une acquisition de données de type "micrologger 21X" de chez Campbell Scientific. Celle-ci est programmable, dispose de 8 voies d'entrée analogiques, et d'une capacité de stockage de 20000 données. La programmation permet entre autre la gestion individuelle de la scrutation des voies (gamme de sensibilité des capteurs, fréquence de scrutation), le stockage des données, et leur restitution à un micro-ordinateur compatible PC.

L'acquisition de données s'effectue de la façon suivante :

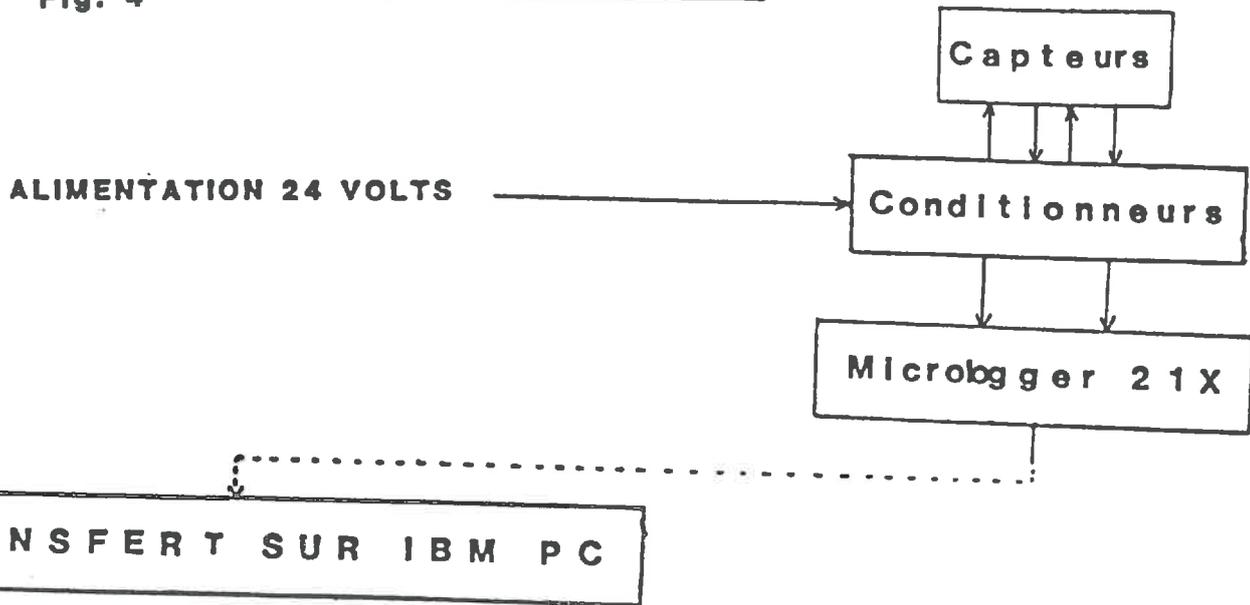
La conversion analogique/digital utilise un temps d'intégration de $250 \cdot 10^{-6}$ s. La scrutation est effectuée tout les 1/10ème de seconde, ce qui assure l'obtention de l'allure du phénomène, et sa bonne restitution sous forme graphique.

d) Restitution des données :

Un programme (PCPLOT) implanté sur micro PC permet de recueillir les données en provenance de l'acquisition "micrologger21X". Il gère le port RS232, et restitue un fichier ASCII, contenant des informations supplémentaires générées par l'acquisition, telles qu'une base de temps, et certains caractères de contrôle à "nettoyer". Le fichier une fois "propre" est transféré sur tableur (MULTIPLAN) pour la mise en forme proprement dite des données, et leur sortie graphique (via CHART).

DES DONNEES

Fig. 4



exemple de fichier de sortie:

Programme "PCPLOT"

→ Fichier ascii

01+0102.	07+0123.	03+023.2	04+4.027	05+43.96
01+0102.	02+0123.	03+023.3	04+09.73	05+48.67
01+0102.	02+0123.	03+023.4	04+30.01	05+63.10
01+0102.	02+0123.	03+023.5	04+087.9	05+070.3
01+0102.	02+0123.	03+023.6	04+109.4	05+078.2
01+0102.	02+0123.	03+023.7	04+117.3	05+083.2
01+0102.	02+0123.	03+023.8	04+123.9	05+089.6
01+0102.	02+0123.	03+023.9	04+134.9	05+094.6
01+0102.	02+0123.	03+024.0	04+139.0	05+098.3
01+0102.	02+0123.	03+024.1	04+143.3	05+099.0

Programme en Fortran

nettoyage du fichier

+0102.	+0123.	+023.2	+4.027	+43.96
+0102.	+0123.	+023.3	+09.73	+48.67
+0102.	+0123.	+023.4	+30.01	+63.10
+0102.	+0123.	+023.5	+087.9	+070.3
+0102.	+0123.	+023.6	+109.4	+078.2
+0102.	+0123.	+023.7	+117.3	+083.2
+0102.	+0123.	+023.8	+123.9	+089.6
+0102.	+0123.	+023.9	+134.9	+094.6
+0102.	+0123.	+024.0	+139.0	+098.3
+0102.	+0123.	+024.1	+143.3	+099.0

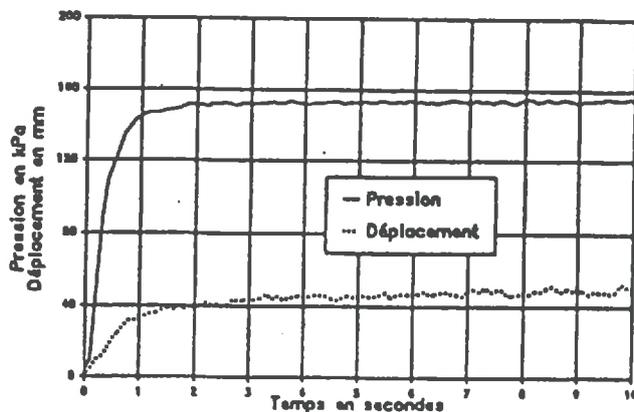
MULTIPLAN

→ élaboration des données

		TEMPS	PRESSION	Z0	Z	Z corrigé
102	123	0	4.027	0	43.96	0.00
102	123	0.1	9.73	4.71	48.67	4.71
102	123	0.2	30.01	17.14	63.10	9.73
102	123	0.3	87.9	26.34	70.3	11.63
102	123	0.4	109.4	34.24	78.2	14.19
102	123	0.5	117.3	41.24	83.2	22.01
102	123	0.6	123.9	49.64	89.6	25.19
102	123	0.7	134.9	50.64	94.6	28.07
102	123	0.8	139.0	54.34	98.3	31.98
102	123	0.9	143.3	55.04	99.0	32.03

CHART

→ graphique



La mise en forme des données consiste à :

- se donner une origine des temps propre à chaque test,
- ramener l'origine des déplacement à zéro, le zéro électrique du capteur ne coïncidant pas avec le contact de la plaque à la surface du sol (enfoncement des roues du tracteur, rugosité de surface).
- extraire la composante du déplacement propre à la déformation du sol. En effet comme nous le verrons plus loin le déplacement mesuré résulte de trois composantes, la déformation du sol, l'élasticité du système trois point, et celle des pneumatiques du tracteurs.

On trouvera (Fig.4) le résumé des principales étapes conduisant de la mesure à la mise en forme définitive des données.

C. Caractéristiques de fonctionnement du système :

La bonne connaissance du fonctionnement du prototype a nécessité une étude critique des caractéristiques de fonctionnement du système pneumatique dans des conditions standards et indépendamment du comportement du sol. On a donc enregistré, pour chaque pressions utilisées par la suite, les déplacements du piston et les mises en pression au cours du temps, dans l'air et sur un sol bétonné considéré comme non déformable.

1. Vitesse maximum du piston permise par le montage :

La vitesse propre du piston, c'est à dire sans résistance au niveau de la plaque, est une caractéristique importante soulignée dans le cahier des charges.

La Fig.5 montre bien , par rapport à un système hydraulique à huile utilisé précédemment (Guérif, 1984), l'intérêt du système pneumatique qui permet en effet de doubler quasiment la vitesse de déplacement dans l'air. Une exception cependant pour la pression de 1bar où le développement total du piston prend 1 s de plus que pour les autres pressions. On est probablement dans un domaine de pression où les frottements, au niveau du joint entre piston et cylindre, ont une influence significative sur la vitesse de déplacement.

Par ailleurs la Fig.5 montre que la cinétique de mise en pression, en l'absence de résistance au niveau de la plaque, et donc pour un développement maximal du vérin, a une durée comprise entre 3 et 4 s. La vitesse de montée en pression dépend à la fois du débit d'air comprimé dans le circuit, de la pression à atteindre, et du volume de la chambre (A) lui même dépendant du déplacement du piston. On constate (Fig.6), au cours d'une cinétique dans l'air, que la mise en pression se fait en deux phases. La portion de courbe AB correspond à mise en pression, alors que le piston se déplace, donc à volume variable de la chambre (A). Au delà de B, le développement du vérin étant achevé, la mise en pression se fait à volume constant, sa vitesse dépend alors uniquement du débit du circuit pneumatique.

Vitesse du piston

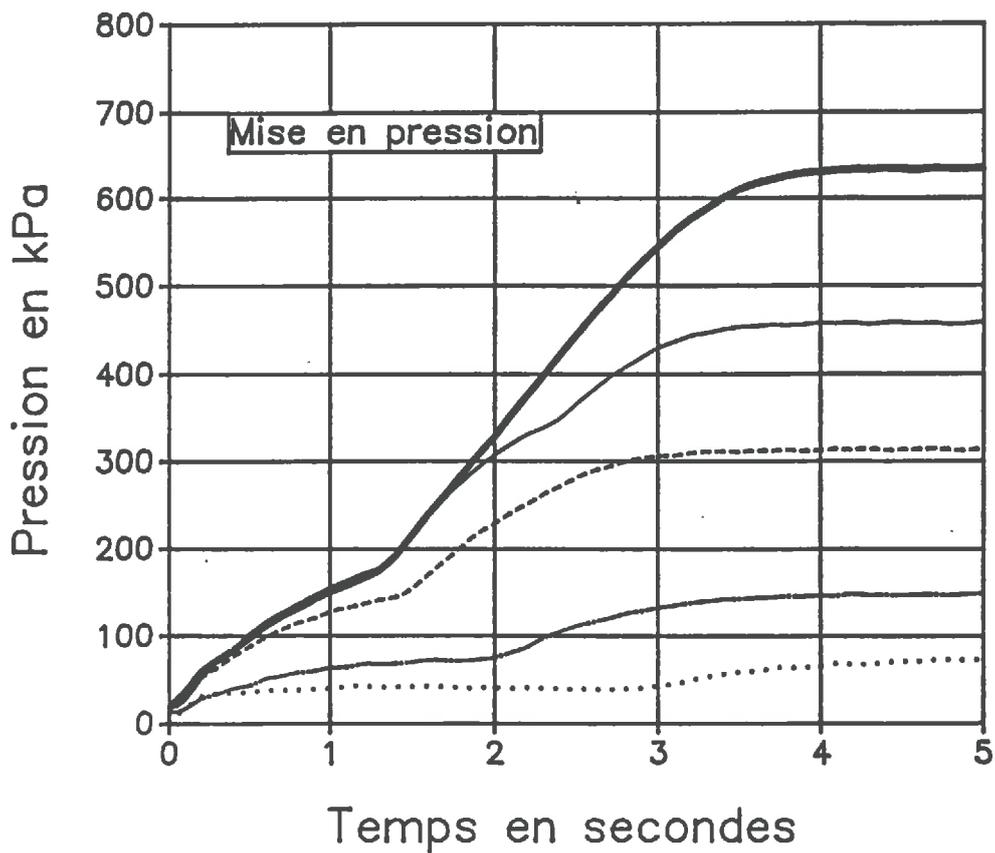
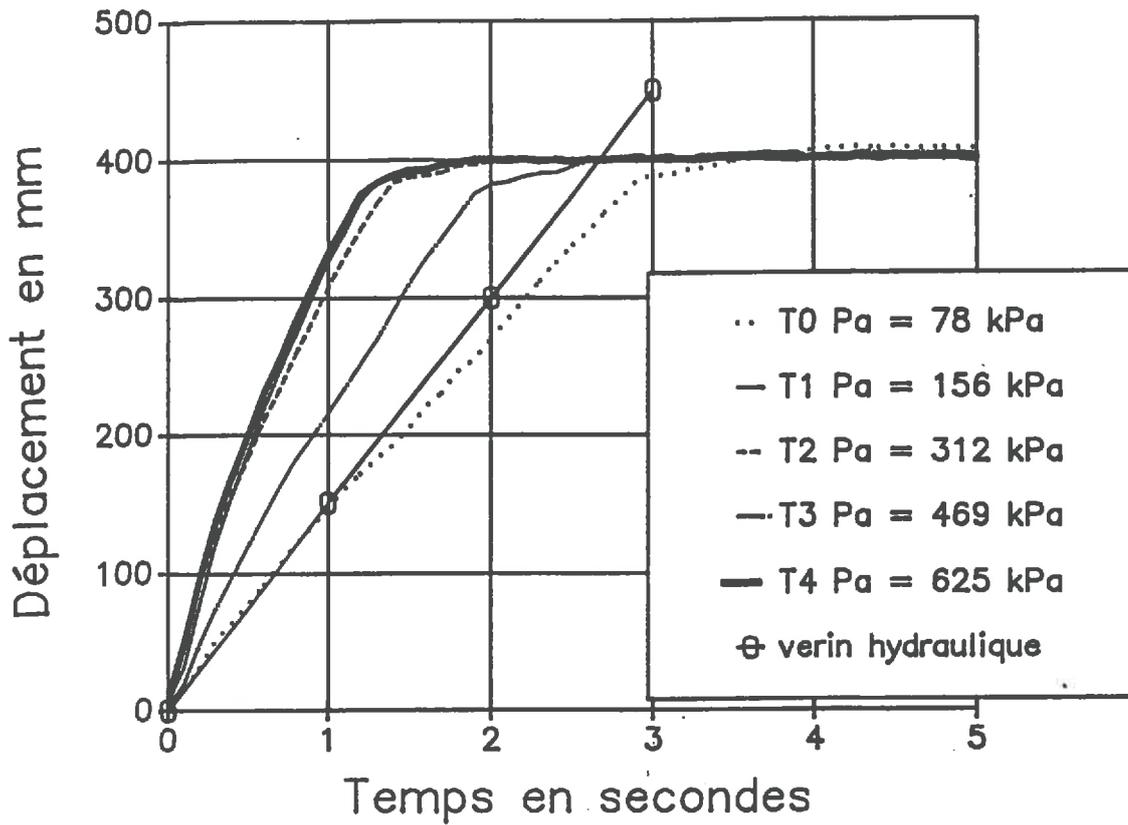
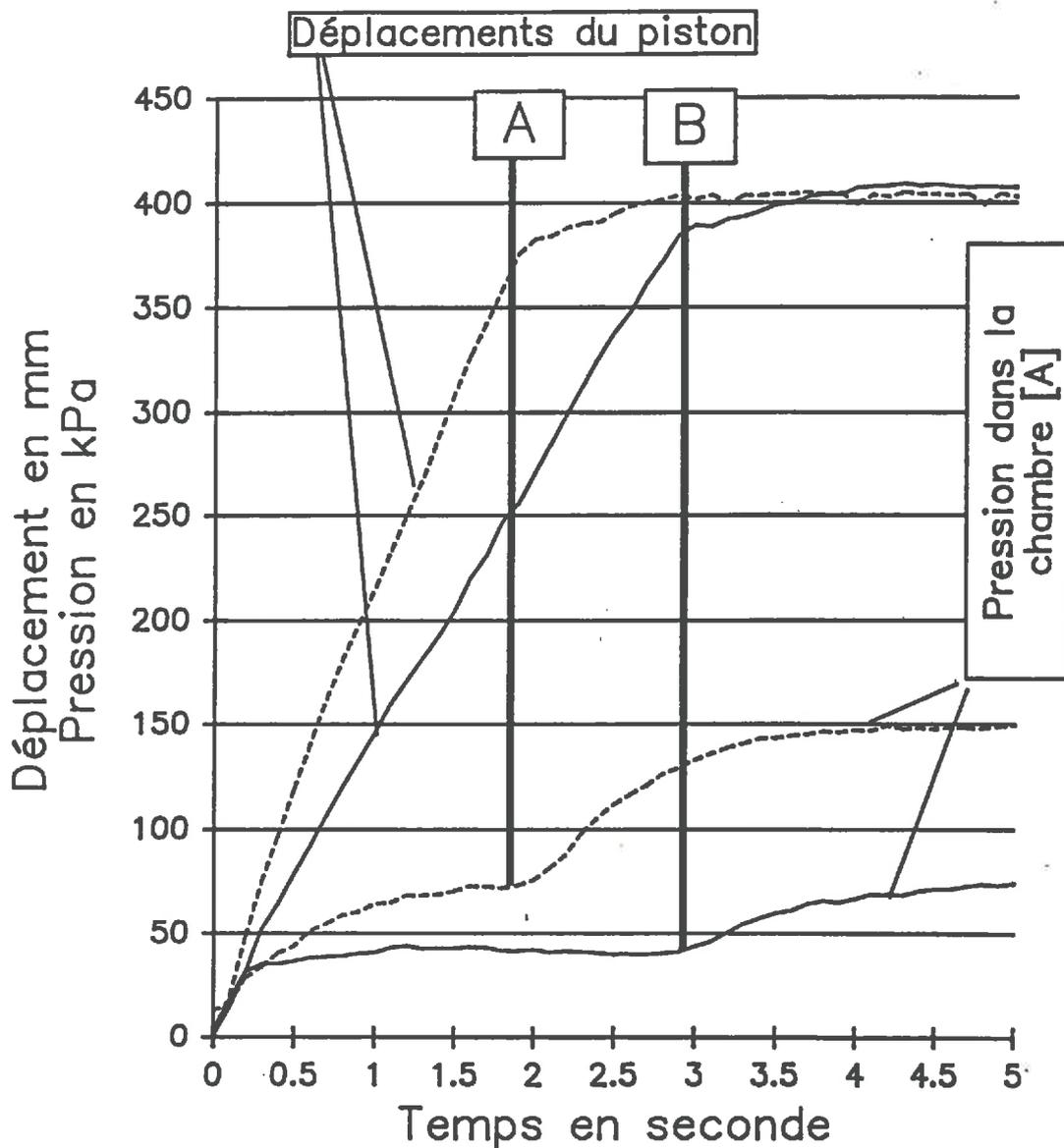


Fig. 5

EXEMPLE DE CINETIQUES :
 Déplacement du piston
 Mise en pression



— T0 Pa = 78 kPa
 --- T1 Pa = 156 kPa

Fig. 6

2. Les trois composantes de la déformation, principe de correction :

Le déplacement mesuré résulte en fait de trois composantes :

- la déformation effective du sol,
- un déplacement du bâti, consécutif à la déformation du système trois points, lié à l'élasticité du système d'amortissement du point supérieur. Ce dernier autorise un léger soulèvement du bâti lorsque le piston est en appui.

- un soulèvement du tracteur, qu'accompagne l'élasticité des pneumatiques.

Pour éliminer de la mesure ces deux derniers déplacements parasites, on effectue une correction des données selon le principe qui suit. A partir de l'hypothèse qu'à tout instant, la somme des déplacements parasites, ou déplacement du point d'appui mesuré à partir d'essais réalisés sur sol bétonné, est proportionnelle à la pression (P_A) mesurée dans la chambre (A), on peut écrire :

déformation du sol = déplacement mesuré - déplacement du point d'appui

$$Z_{\text{sol}} = Z_{\text{mesuré}} - (0.1458 P_A + 2.0982) \dots\dots\dots(7)$$

Pour vérifier la validité de ces hypothèses, nous avons mesuré effectivement *in situ*, à l'aide d'un capteur de pression additionnel et fixé au sol, le déplacement du point d'appui parallèlement à l'enregistrement du déplacement total normalement mesuré. La comparaison des courbes de déformation du sol obtenues : (fig.7)

- soit à partir du déplacement total mesuré diminué du déplacement du point d'appui mesuré,

- soit par l'équation (7),

montre que le mode de correction est valide, et permet d'accéder à la cinétique réelle de déformation du sol.

D. Mode opératoire :

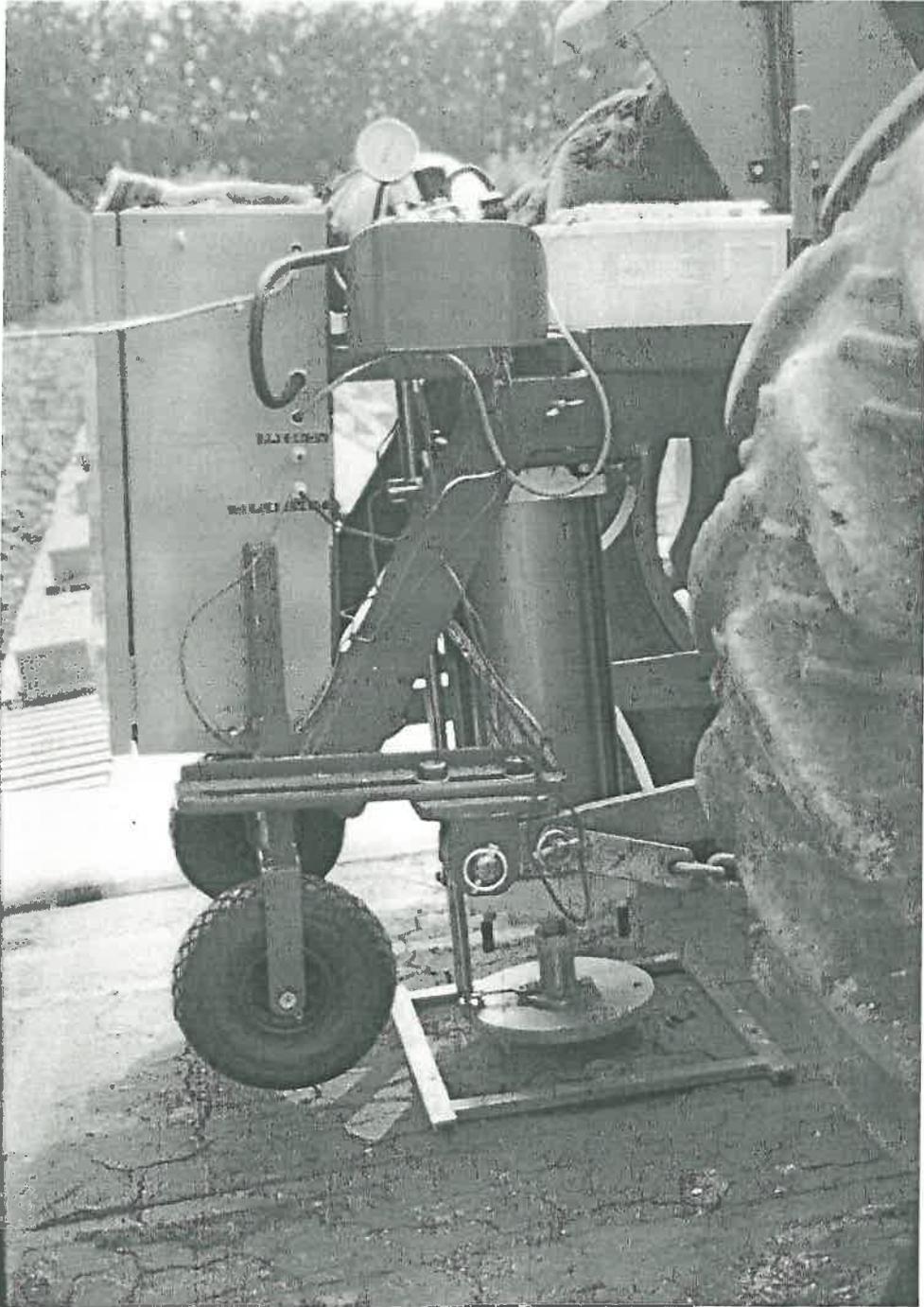
Le principe de fonctionnement du penetromètre à plaque étant acquis, nous allons résumer l'ensemble des étapes à suivre en pratique pour procéder à un test d'enfoncement.

1. Réglage de la pression au sol visée P_S :

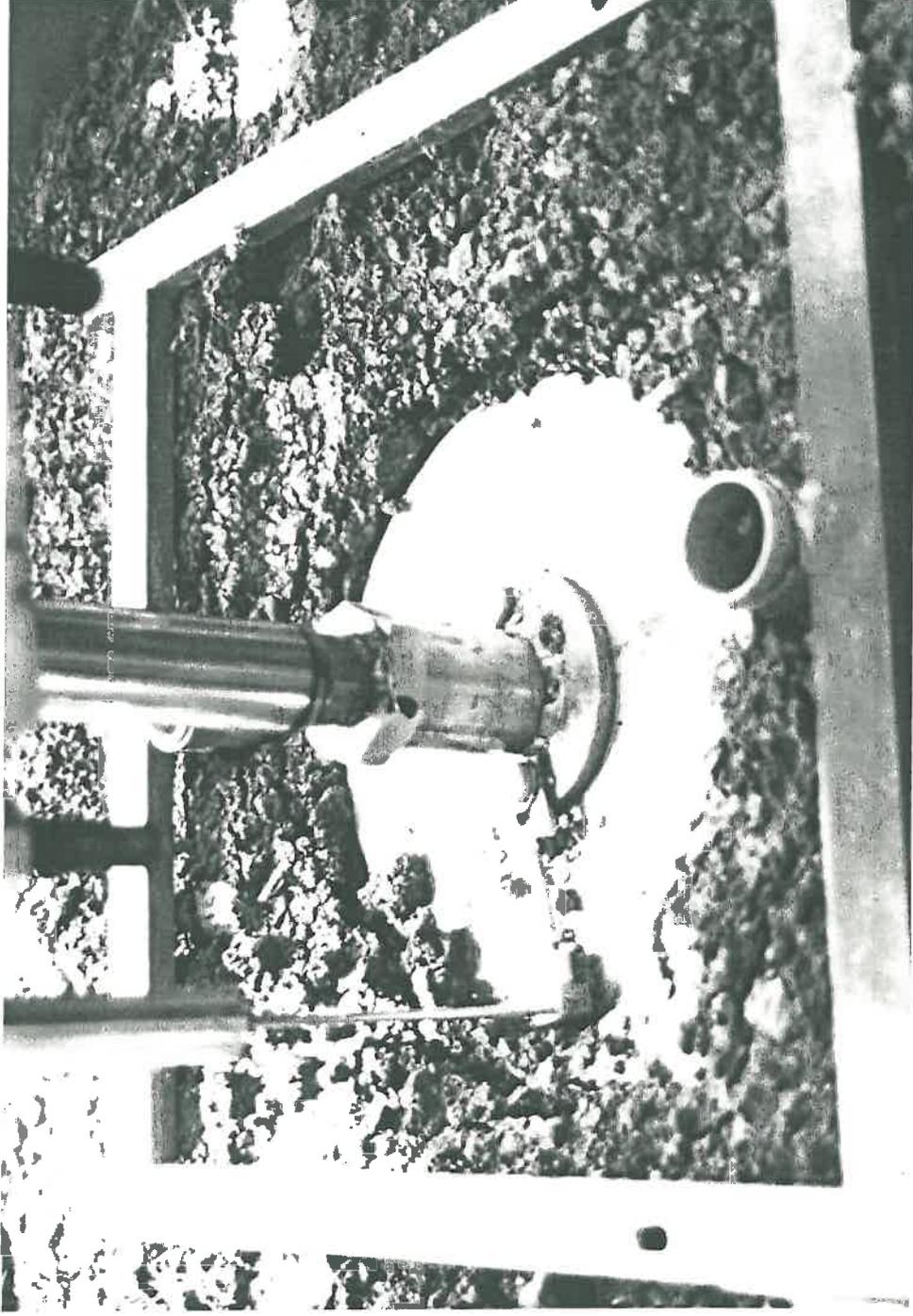
- Calcul de la pression P_A (en Pascal) à afficher, à partir de l'équation (6):

$$P_A = 1.637 P_S + 33342 \dots\dots\dots(8)$$

- Réglage avec le mano-détendeur (10) approche grossière par lecture au manomètre Bourdon du mano-détendeur, réglage fin par lecture du capteur de pression fixé dans la chambre (A). Pour ce faire le piston doit être en butée (sur un sol stabilisé par exemple).

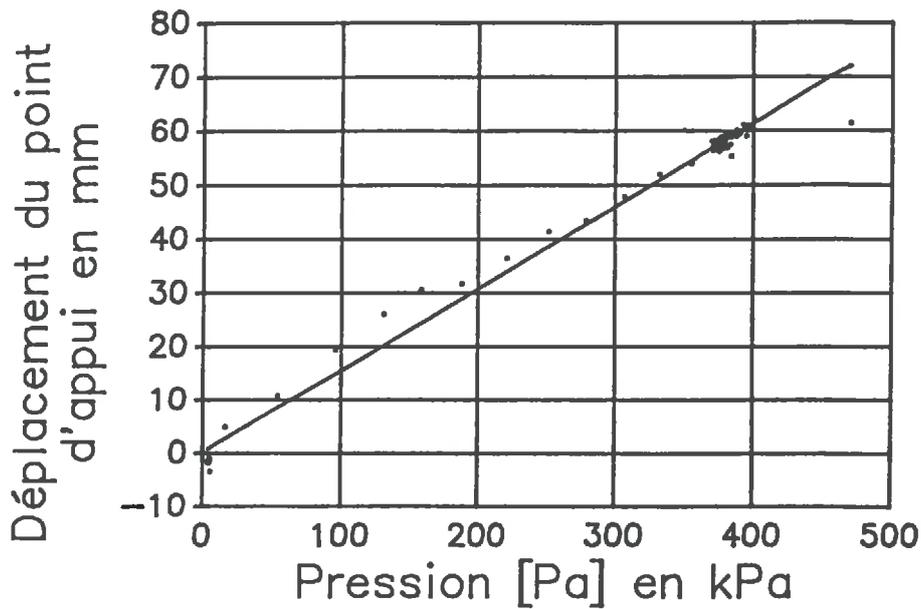


PENETROMETRE EN PLACE

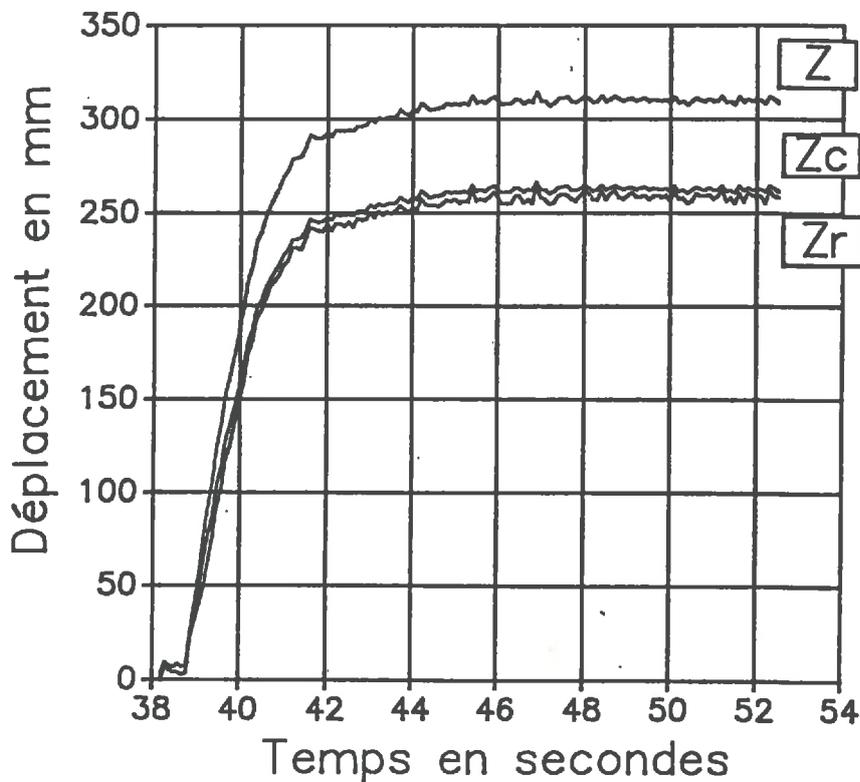


ENFONCEMENT DU PISTON

Principe de la correction



Appréciation de la correction



Z: déplacement total tel qu'il est mesuré

Zr: $Z - (\text{déplacement mesuré du tracteur})$

Zc: déplacement corrigé par la régression linéaire = déformation du sol estimée

Fig. 7

2. Manoeuvre d'approche :

- La descente lente s'effectue en actionnant le bouton du milieu du boîtier de commande (6), en maintenant la chambre (B) légèrement sous pression. La manoeuvre d'approche n'est terminée que lorsque les chambres (A) et (B) sont toutes deux à la pression atmosphériques, pour que chaque test soit effectué dans les mêmes conditions initiales.

La position du piston dépendant en fait de l'équilibre des pressions entre les deux chambres (A) et (B), en pratique, il faut simultanément actionner la vanne de purge (17) et l'électrovanne (3) (bouton du haut) pour provoquer le départ concomitant de l'air contenu dans chaque chambre.

3. Déroulement du test proprement dit : (photo.3)

- Lancement du programme d'acquisition du micrologger 21X.

- Déclenchement de la descente rapide du piston:

on appuie simultanément sur le bouton central (mise en pression de la chambre (A)) et sur le bouton du bas (ouverture de la fuite de la chambre (B)).

- Arrêt du programme d'acquisition, une fois l'enfoncement "à l'équilibre" atteint.

NOTA : Repérer soigneusement les numéros d'enregistrement de la première et de la dernière donnée, pour la restitution ultérieure vers le micro-PC.

- Remontée du piston à vitesse lente. Il s'agit de ne pas perturber la zone compactée, si des mesures supplémentaires (profils de masse volumique par exemple) ou des prélèvements doivent être effectués.

E. Améliorations du prototype

1. Vitesse de mise en pression nominale :

La réduction du temps d'accès à la pression nominale dépend soit d'une augmentation du débit, soit d'une diminution du volume de la chambre (A).

En pratique il semble que l'on ne puisse plus augmenter le débit avec la technologie choisie. On peut par contre, en acceptant de diminuer la gamme possible de pressions applicables au sol, diminuer le volume de la chambre (A), en diminuant le diamètre du piston utilisé.

En se limitant à une pression maximale de $2 \cdot 10^2$ kPa, ce qui, compte tenu du diamètre de la plaque actuelle (250 mm), correspond à un charge au sol de 9817 N, le piston le plus petit disponible chez le constructeur (annexe 1) possède un diamètre de 125mm. Dans l'hypothèse où le temps de mise en pression est proportionnel au volume de la chambre (A), on pourrait escompter ramener le temps de mise en pression à 5/8 du temps actuel.

En réduisant de surcroît le diamètre de la plaque à 150mm, on pourrait encore atteindre une pression au sol de $2.26 \cdot 10^2$ kPa, avec un piston de 80mm de diamètre. On pourrait dans ce cas escompter ramener le temps de mise en pression à 2/5 du temps actuel.

Dans les deux cas le gain de temps est appréciable, mais on reste encore loin des temps de contact rencontrés lors des roulages (quelques 1/10èmes de seconde).

2. Mesure directe de la déformation du sol, suppression des corrections :

Le mode de correction du déplacement total semble actuellement satisfaisant, il serait préférable néanmoins d'accéder à une mesure directe de la déformation du sol. Deux solutions apparaissent pour l'instant relativement simple à mettre en oeuvre :

- La première, la moins onéreuse, mais aussi la plus problématique au niveau pratique, consiste à désolidariser le capteur de déplacement du vérin pour le fixer sur une potence solidaire du sol. Cette solution présente l'inconvénient d'alourdir les manipulations sur le terrain, puisque l'ensemble du système n'est plus intégralement porté, et augmente les risques d'endommager le matériel lors de fausses manoeuvres.

- L'autre solution consiste à fixer un second capteur sur le bâti de la machine, pour mesurer son déplacement par rapport au sol. L'acquisition de données actuelle permettrait d'envisager cette solution en offrant en outre la possibilité de traiter les données en temps réel, ce qui limiterait la place mémoire à utiliser, ainsi que les traitements ultérieurs.

3. Automatisation de la chaîne de restitution des données :

L'utilisation de cet appareil en routine nécessiterait de simplifier la chaîne de restitution et de traitement des données. Un programme à caractère général et offrant un interface utilisateur simplifié, permettrait de gagner du temps et d'éviter les erreurs inévitables lors de manipulations de fichiers en routine.

V. ETUDE IN SITU :

A. Objectifs :

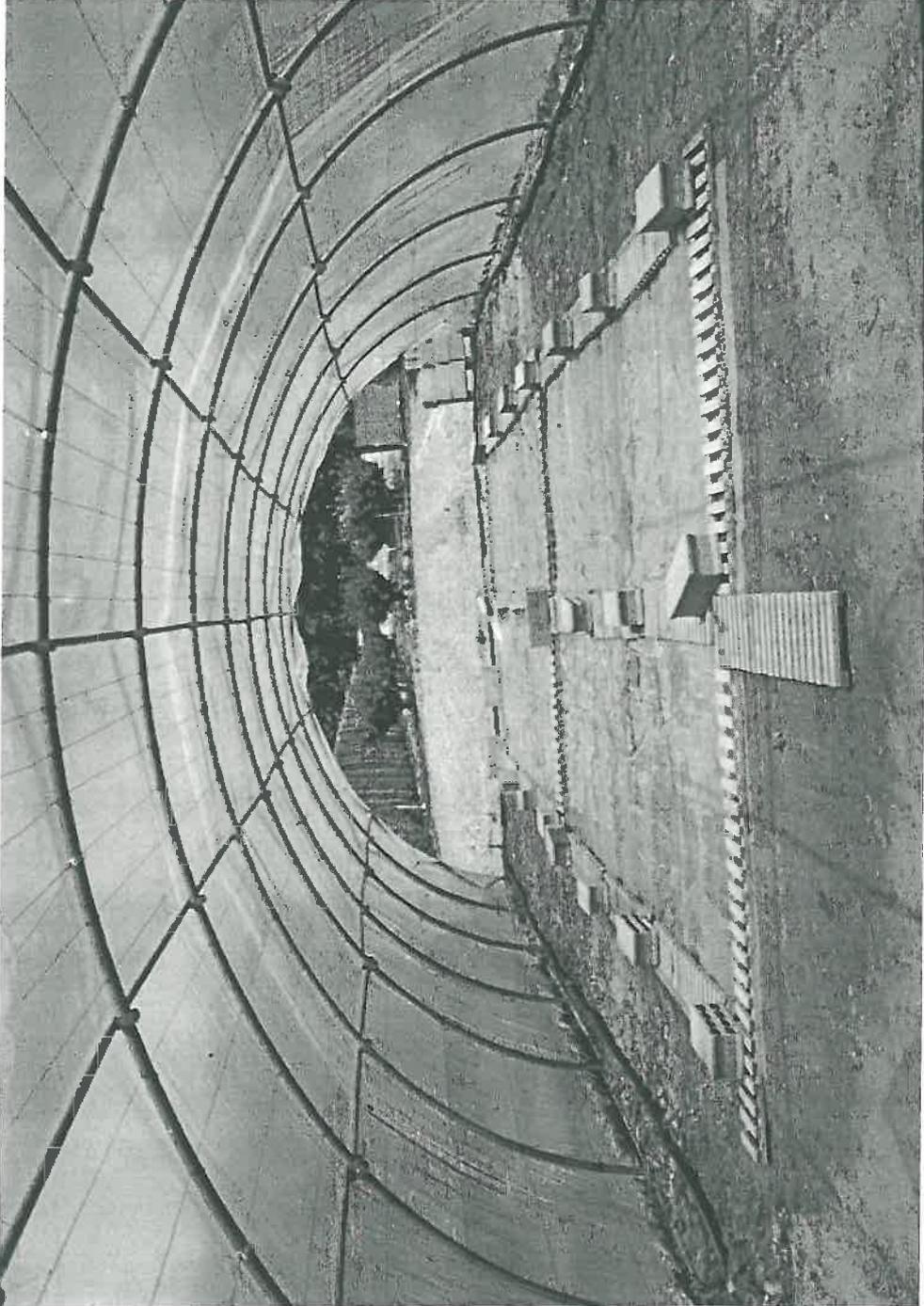
Après avoir mis en évidence quelques caractéristiques générales intrinsèques au prototype, nous avons étudié son comportement *in situ*. Nous avons choisi de réaliser des parcelles expérimentales qui correspondent à des états physiques extrêmes.

Ceux ci d'une part, permettront de mieux percevoir les divers comportements possibles du pénétromètre, en fonction des situations réalisées.

D'autre part, d'un point de vue strictement pratique, ces situations extrêmes sont plus faciles à réaliser, et les techniques employées permettent généralement de minimiser, de manière satisfaisante les hétérogénéités spatiales.

Dans tous les cas les parcelles ont été conduites de manière à ce que les horizons de surface soient (au moins au départ) aux voisinages de la capacité de rétention.

Les trois situations visées correspondent à :



PARCELLE BACHEE SOUS ABRI

Photo 5

- un sol compacté, homogène (ne présentant pas d'éléments structuraux distincts) continu (ne présentant pas d'horizons distincts, ni de discontinuités verticales) et isotrope (présentant les mêmes propriétés dans toutes les directions), vis à vis de sa structure, comme de sa teneur en eau,

- un sol hétérogène, discontinu et isotrope, le travail du sol induisant l'hétérogénéité (mottes et terre fine) et la discontinuité (distinction entre la couche travaillée et la couche sous jacente).

- un sol hétérogène, discontinu et anisotrope, l'anisotropie étant due à un gradient de teneur en eau. Celui ci est induit par évaporation.

B. Matériel et méthode :

1. Le sol :

Les parcelles expérimentales se situent Domaine St Paul (INRA d'AVIGNON). Ils s'agit de sol bruns calcaire d'origine alluviale dont les caractéristiques sont présentées Tableau 1.

TABLEAU 1

GRANULOMETRIE :

- Argile.....	33.2%
- Limon fin	39.9%
- Limon grossier	11.6%
- Sable fin	13.3%
- Sable grossier	2.0%

CARBONE ORGANIQUE (Méthode d'Anne)0.89%

MATIERES ORGANIQUES.....1.53%

CALCAIRE TOTAL.....34.50%

CAPACITE D'ECHANGE (METSON)9.8 milliéquivalent pour 100g.

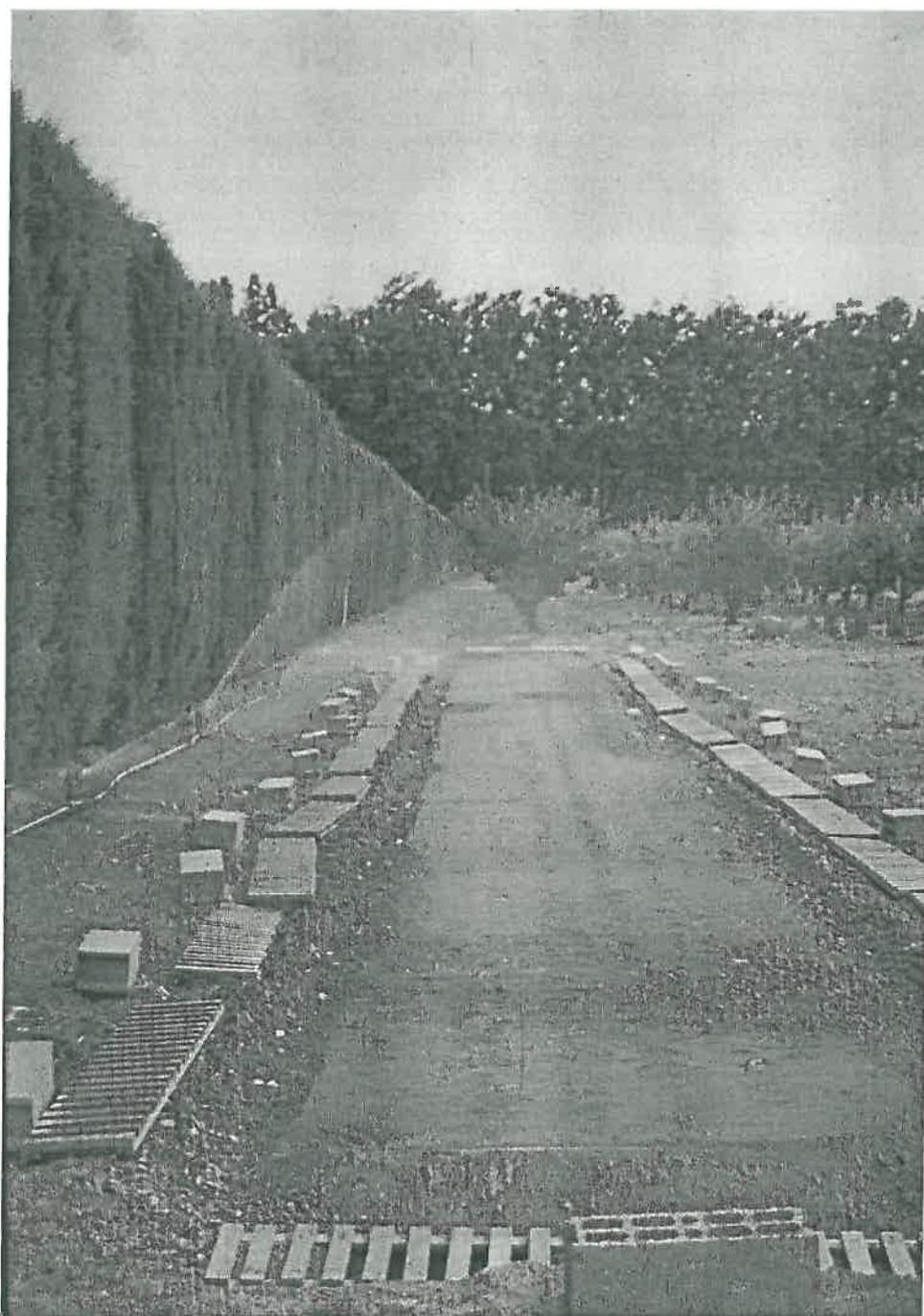
2. Préparation des parcelles expérimentales :

Les outils utilisés sont des outils animés rotatifs comme le rotavator ou la bêche rotative, ils évitent en effet de créer des discontinuités verticales, comme le font les socs de charrue. Les humectations ont été effectuées avec des asperseurs de type "sprinkler", qui permettent un arrosage relativement homogène de la surface.

a) Parcelle compactée (Photo 5) :

Depuis 6 ans la parcelle ne subissait qu'un travail superficiel au rotavator, et le profil était généralement bien rappuyé. Un compactage superficiel était nécessaire pour obtenir un état homogène.

Un arrosage a été réalisé après un passage de rotavator destiné à ouvrir la surface, et ainsi permettre une pénétration relativement homogène de l'eau d'arrosage.



PARCELLE TRAVAILLEE EN COURS D'IRRIGATION

Après un ressuyage de 24 heures la parcelle a été compactée au rouleau compresseur, puis irriguée à nouveau.

L'homogénéisation du profil hydrique a été obtenue en favorisant une redistribution sans évaporation, en couvrant la surface de la parcelle d'une bâche plastique.

Pour réaliser les tests on débâche progressivement la parcelle sur la surface nécessaire à un point de mesure. On évite ainsi une dérive de la teneur en eau des sites par une dessiccation éventuelle par évaporation.

La qualité du résultat peut s'apprécier au regard des profils hydriques et des profils d'indices des vides structuraux consignés Fig. 8.

- On constate une très faible variabilité des profils hydriques entre répétitions, et ce sur toute la profondeur (0-35cm). La comparaison des profils point par point, montre qu'à une profondeur donnée, l'écart entre deux profils n'est, compte tenu de l'écart type sur la mesure, jamais significatif.

Pour un profil donné la variabilité maximale le long du profil est de 5 points (soit 5% d'eau ramenés à la masse de solide). On peut considérer que les profils hydriques sont pratiquement isotropes. La gamme de variation des teneurs en eau (20-25%), correspondant à des potentiels supérieurs à -100hPa (annexe 1), est telle qu'elle n'induit pas de variation sensible des propriétés mécaniques. On peut s'attendre donc à une isotropie des comportements mécaniques du sol.

- On constate l'existence de deux groupes de profils d'indice des vides structuraux, placettes 2 et 3, d'une part placettes 1 et 4 d'autre part. L'écart entre les profils reste cependant de faible amplitude (par exemple : à $Z=-21\text{cm}$, $\text{écart}(es)=0.157$), il est de surcroît de l'ordre de grandeur des écarts type de la mesure estimés pour chaque points des profils (soit pour $Z=-21\text{cm}$, 0.134 et 0.159). Bien que réelle cette différence reste toute relative.

Les tests effectués sur ces 4 placettes pourront donc, au vu de ces résultats, être considérés comme des répétitions.

b) Parcelle travaillée :

Une bande de terre d'environ 30m de long, et de la largeur d'un passage d'outil, a été travaillée par les passages successifs et alternés d'une rotobèche et d'un rotavator.

L'humectation du profil et son homogénéisation par redistribution a été conduite comme précédemment. De même on procède à chaque test après débâchage progressif.

La qualité du résultat peut être appréciée Fig. 9 à partir des profils hydriques et des profils d'indices des vides structuraux.

Les profils hydriques des deux placettes diffèrent légèrement mais encore une fois, l'amplitude de la différence, compte tenu de la gamme des teneurs en eau dans laquelle on se situe, n'est pas suffisante pour induire des comportements mécaniques très différents. On se situe en effet généralement dans une gamme de potentiels de l'eau supérieurs à -300 hPa (Annexe 1).

Qualité du résultat obtenu
Parcelle compactée

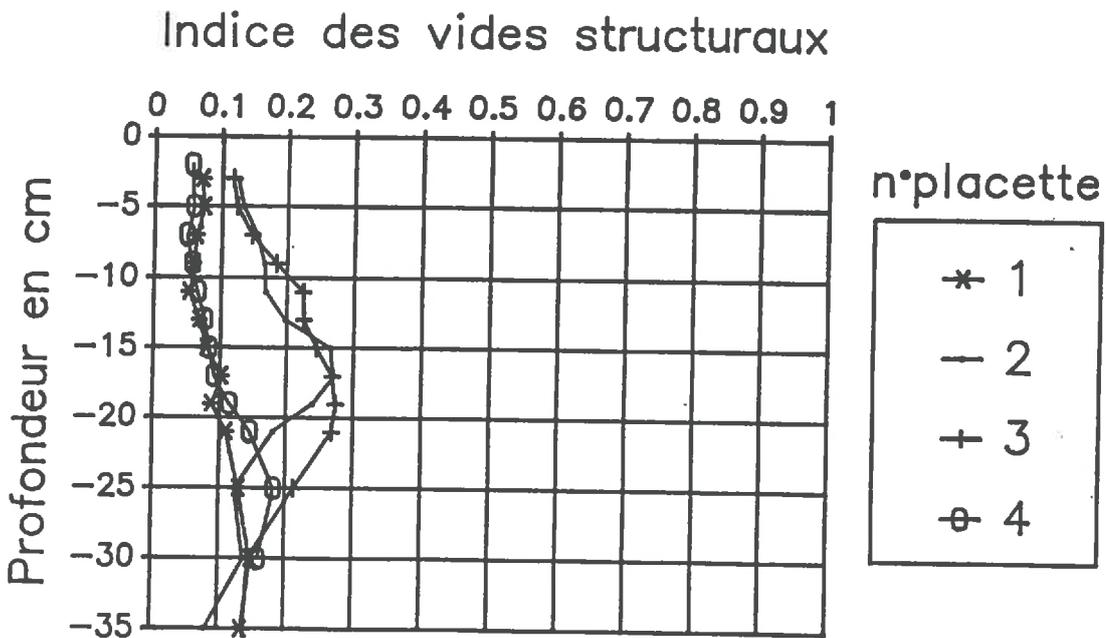
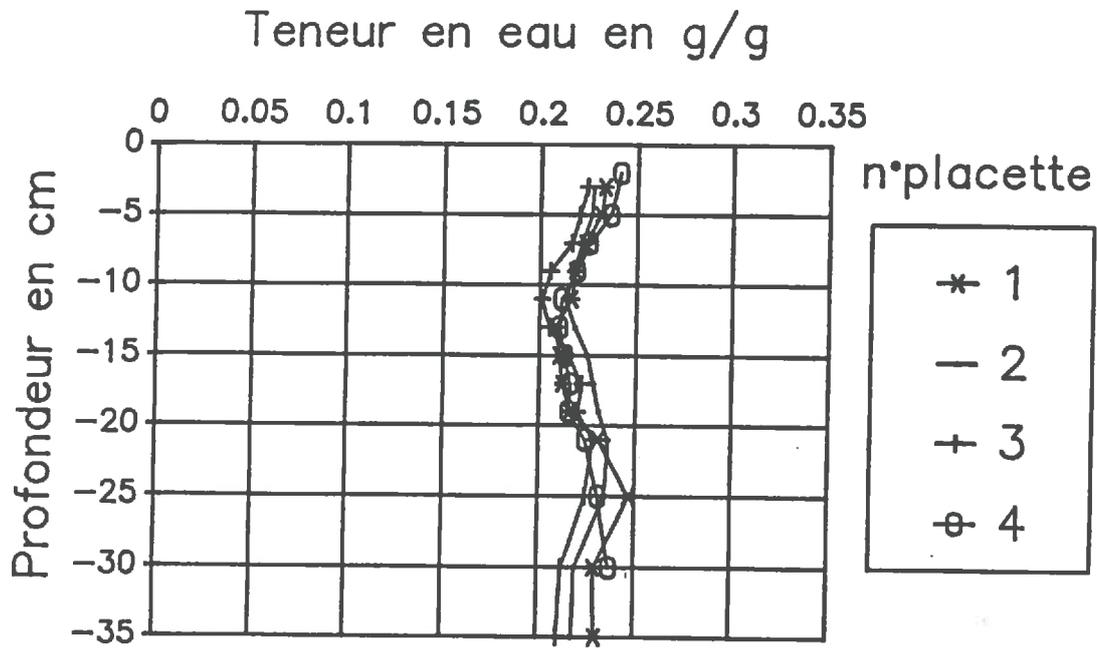


Fig. 8

Qualité du résultat obtenu
Parcelle travaillée

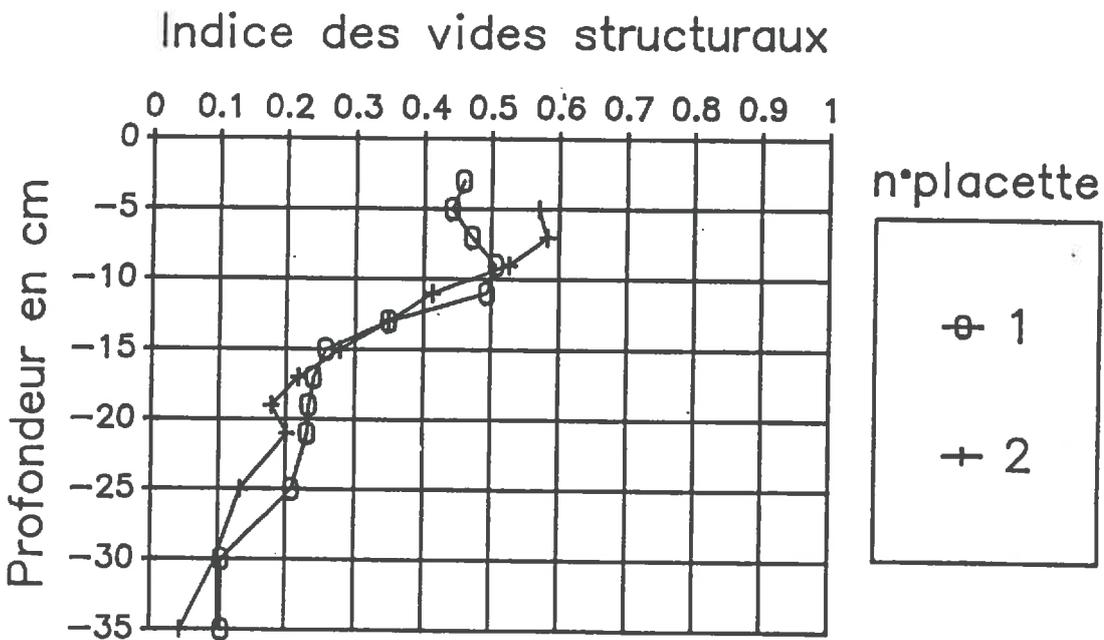
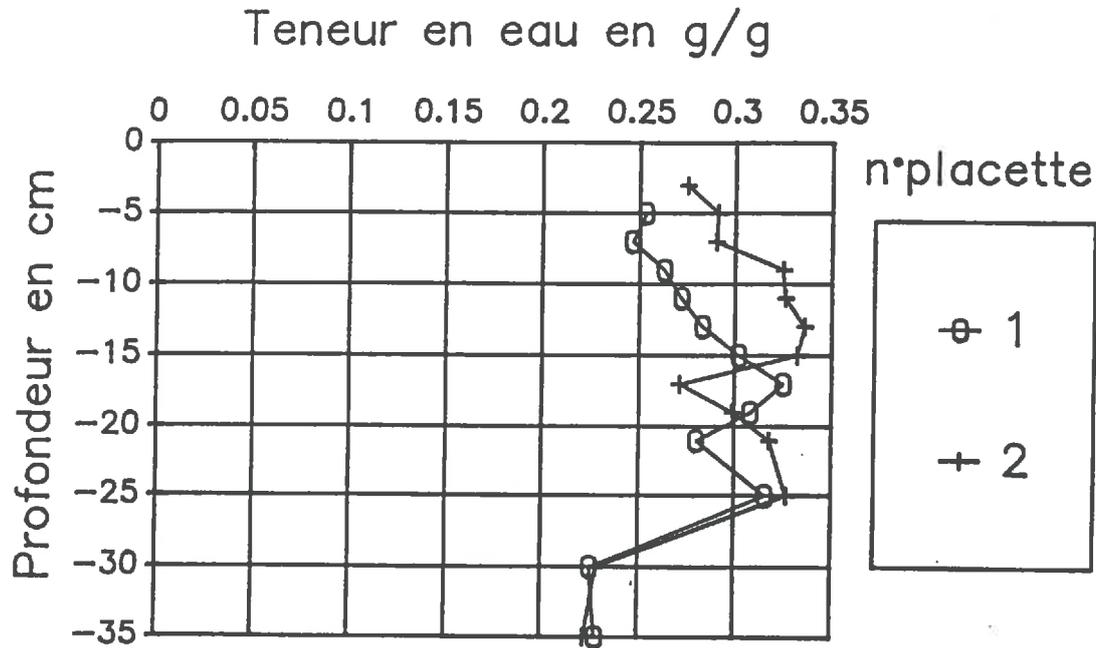


Fig. 9

La couche travaillée est à une humidité supérieure, en moyenne, à la capacité de rétention. La couche sous-jacente présente à la fois, une teneur en eau moyenne relativement plus faible et un faible indice des vides structuraux. Elle aura donc un effet plancher par la discontinuité mécanique qu'elle induit.

Les profils d'indice des vides structuraux des deux placettes ne sont pas significativement différents. Ils présentent un gradient inévitable dû à la succession des outils et à la répartition mottes-terre fine avec la profondeur.

c) Parcelle en dessiccation :

La préparation de cette parcelle est en tout point semblable à celle décrite précédemment, qui constitue l'état initial de cette série de placettes.

La dessiccation a été obtenue par évaporation, en découvrant simultanément l'ensemble des placettes, afin de laisser un gradient hydrique se mettre en place. Les tests d'enfoncement sont échelonnés dans le temps pour suivre l'évolution des comportements. Les placettes sont classées de la plus humide (état initial : Dessi0) à la plus sèche (Dessi4).

En règle générale les profils hydriques sont bien différenciés (Fig.10). Cependant les mesures de teneurs en eau ne sont pas assez fines pour percevoir les différences du début de la dessiccation. Ainsi Dessi1 et Dessi2 semblent identiques au vu des profils hydriques ou des humidités moyennes des couches (0-35cm) Tableau 2. En fait ces deux situations se distinguent par leur état de surface. Dessi1 a seulement changé de couleur en surface (potentiel hydrique $< 1.10^2$ kPa), alors que Dessi2 présente une couche sèche de 1 à 2cm (potentiel hydrique $< 10.10^2$ kPa). Dessi3 et Dessi4 présentent en surface une couche de sol "sèche à l'air" de quelques centimètres, mais aussi une dessiccation générale du profil d'environ 5 à 7 points.

TABLEAU 2

	Dessi1	Dessi2	Dessi3	Dessi4
W% moyen (0-35cm)	28.0	28.20	25.00	22.00

C. Résultats et discussion :

1. Comportement du prototype dans des matériaux dépourvus de gradient hydrique :

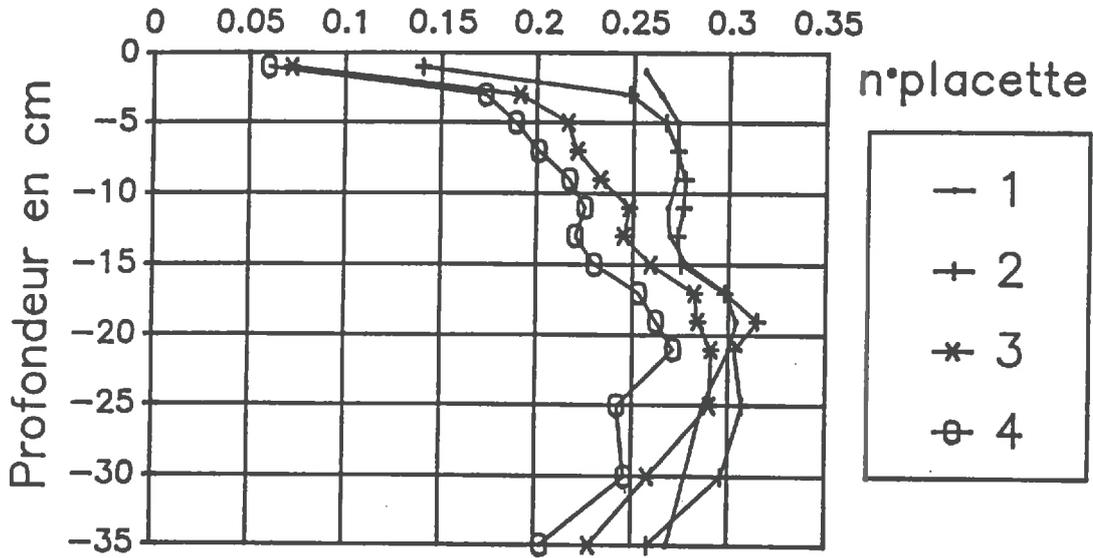
Dans ce qui suit on désignera par "Ti" le traitement i. le Tableau 3 donne les correspondances traitement / pression.

TABLEAU 3

Numéro de traitement	P _{SOL} (en kPa)	P _{PISTON} (en kPa)
T0	27.4	78.1
T1	75.6	156
T2	170.6	312
T3	266.1	469
T4	361.6	625

Qualité du résultat obtenu
Parcelle en dessiccation

Teneur en eau en g/g



Indice des vides structuraux

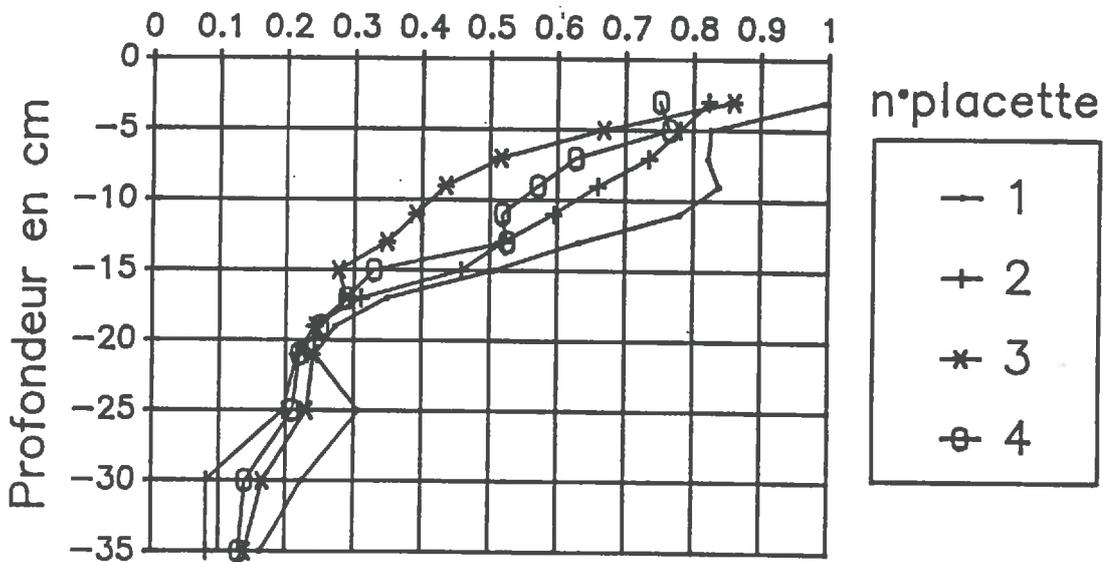


Fig. 10

a) Analyse de la déformation à l'équilibre

(1) Principe d'analyse de la sensibilité du test :

Compte tenu de nos objectifs il est nécessaire, de mesurer les déformations du sol à 1cm près, et de contrôler la pression au sol au mieux à 1% près.

Les erreurs possibles peuvent être liées aux capteurs, à la chaîne d'acquisition, ou au processus lui-même.

On ne peut pas tester en toute rigueur la répétabilité du test, car nous ne disposons pas d'un nombre suffisant de répétitions dans un matériau parfaitement défini. Cependant nous allons vérifier que les fluctuations du signal (déformation, ou pression) au cours d'un test restent insignifiantes, et ce sur quelques répétitions.

Nous avons choisi de présenter à titre d'exemple :

Pour le sol compacté : 3 répétitions pour le traitement T3.

Pour le sol travaillé : 5 répétitions pour le traitement T0.

Quelque soit le capteur (déplacement ou pression), on observe une oscillation du signal autour d'une valeur moyenne. Le temps d'intégration du signal étant de $250 \cdot 10^{-6}$ s, et le nombre d'acquisitions étant de 10 mesures par seconde, en une seconde on échantillonne donc 10 mesures sur 4000. On peut considérer, si le piston est à l'équilibre, que ces mesures sont indépendantes et sont autant de répétitions pour un même enfoncement à une pression donnée.

Pour chaque répétition et pour chaque variable X mesurée (pression ou déplacement) on considère les valeurs observées $x_{i1} \dots x_{ij}$, relatives à la population i et d'effectif j. Ces échantillons sont extraits de l'enregistrement des données via le capteur de déplacement ou de pression pour un intervalle de temps de 4 secondes pris après stabilisation du piston à partir d'une origine t_0 du temps identique pour tous les tests. Les variables aléatoires correspondantes X_{ij} sont indépendantes, du fait du rythme de scrutation précisé ci-dessus.

On utilisera pour comparer deux à deux les moyennes obtenues, un test t de Student. Celui-ci suppose réalisées les hypothèses suivantes :

- normalité des populations ou effectif supérieur ou égal à 30, (nos effectifs sont de 40 individus et les normalités vérifiées).

- caractère aléatoire et simple des échantillons.

On a vérifié de plus que les variances des échantillons sont égales, condition non réellement nécessaire quand les effectifs sont égaux.

On teste l'hypothèse :

$$H_0 \text{ telle que } m_i = m_j$$

en calculant la quantité:

$$t_{\text{obs}} = (x_i - x_j) / ((SCE_i + SCE_j) / (j+j' - 2) \cdot (1/j + 1/j'))^{1/2}$$

où x est la moyenne, i et j les numéros des répétitions, SCE la somme des carrés des écarts, j et j' les effectifs respectifs des deux populations.

On rejette l'hypothèse nulle lorsque :

$$t_{\text{obs}} \geq t_{1 - \alpha/2}$$

Pour un seuil de signification de 5% on obtient une valeur de $t_{0,975}$ (D.L.=80) égale à 1.990.

(2) Estimation de la déformation du sol :

Les profondeurs atteintes, pour les différentes répétitions du traitement T3 dans la parcelle compactée, sont résumées dans les Tableau 4 celles atteintes pour les différentes répétition du traitement T0 dans la parcelle travaillée sont consignées Tableau 5. On constate que les déformations diffèrent de moins d'un centimètre, (ce qui correspond à la norme fixée) dans des placettes que nous considérons comme semblables d'après nos moyens de caractérisation (teneur en eau et indice des vides structuraux).

TABLEAU 4

Répétitions	1	2	3
Moyenne(mm)	67.86	60.97	57.23
Ecart type	1.537	1.824	1.569

TABLEAU 5

Répétitions	1	2	3	4	5
Moyenne(kPa)	59.69	66.37	66.73	67.61	59.26
Ecart type	1.045	1.218	1.202	1.272	1.396

Les Tableaux 6 et 7 présentent, respectivement, les résultats du test t sur chacune des répétitions prises deux à deux, pour la parcelle compactée - traitement T3, d'une part, et pour la parcelle travaillée - traitement T0, d'autre part. On notera par le signe "+" les moyenne significativement différentes. Il apparaît que ces mesures sont significativement différentes les unes des autres, pour un écart supérieur environ à 0.4mm. Les oscillations de la mesure à l'équilibre restent donc négligeables. Le système est donc suffisamment sensible pour détecter des différences de déformations de l'ordre du centimètre.

TABLEAU 6

Répétitions	1/2	1/3	2/3
t_{obs}	18.48	31	9.97
Conclusion	+	+	+

TABLEAU 7

Répétitions	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3
t _{obs.}	26.63	28.67	30.80	1.60	1.34
Conclusion	+	+	+	-	-
Répétitions	2/4	2/5	3/4	3/5	4/5
t _{obs.}	4.53	24.58	3.24	25.96	28.33
Conclusion	+	+	+	+	+

(3) Contrôle de la mise en pression du piston :

Pour la mise en pression le problème se pose légèrement différemment, il faut vérifier d'une part, comme précédemment que l'oscillation de la mesure observée reste négligeable, mais d'autre part il faut vérifier que le réglage reste constant.

Les tableaux 8 et 9 contiennent, respectivement, les moyennes des pressions atteintes :

- dans la parcelle compactée, traitement T3 : $P_A = 469\text{kPa}$

- dans la parcelle travaillée, traitement T0 : $P_A = 78.12\text{kPa}$

TABLEAU 8

Répétitions	1	2	3
Moyenne(kPa)	439	455	462
Ecart type	0.098	0.108	0.935

TABLEAU 9

Répétitions	1	2	3	4	5
Moyenne(mm)	74.86	74.33	79.91	80.95	81.32
Ecart type	0.799	0.768	0.746	0.885	0.551

Pour les deux traitements T3 et T0 on constate que les différences relatives entre les moyennes et la pression visée sont de l'ordre de 5 à 6% soit toujours supérieures à la différence de 1% acceptée (pour T3 cette différence acceptable est de 4.7kPa pour T0, elle est de 0.8kPa). On doit incriminer le mano-détendeur qui ne semble pas fiable vis à vis du cahier des charges.

TABLEAU 10

Répétitions	1/2	1/3	2/3
t _{obs.}	114.74	129.09	33.37
Conclusion	+	+	+

TABLEAU 11

Répétitions	1/2	1/3	1/4	1/5	2/3
t _{obs.}	3.06	29.58	32.69	42.62	33.36
Conclusion	+	+	+	+	+
Répétitions	2/4	2/5	3/4	3/5	4/5
t _{obs.}	36.15	47.33	5.73	9.72	2.27
Conclusion	+	+	+	+	+

Les tableaux 10 et 11 rendent compte, respectivement des test t pour les traitements T3-compacté et T0-travaillé. On constate que des écarts de 5 à 6% sont considérés comme significativement différents. Il pourrait ne pas en être de même dans le cas d'une différence relative de 1% pour le traitement T0, celle-ci est en effet de l'ordre de grandeur de l'écart type de la mesure.

b) Analyse des cinétiques :

La vitesse de déformation du sol dépend :

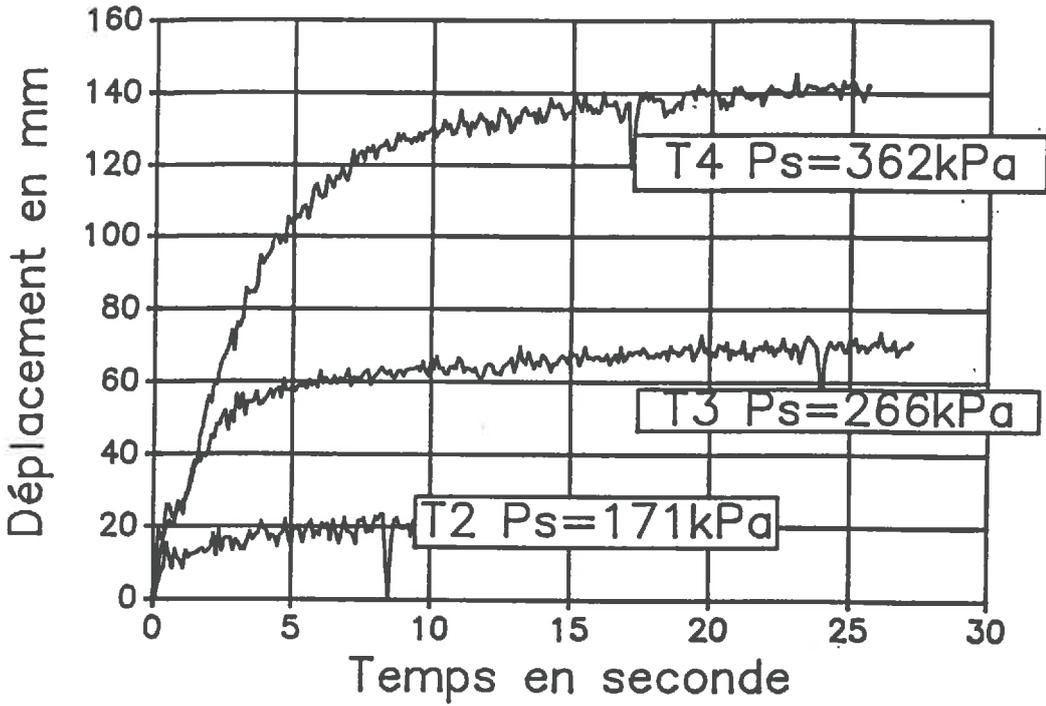
- de sa viscosité, et donc de sa densité et de son humidité,
- de la cinétique de mise en pression.

La vitesse de mise en pression dépend :

- du débit d'air comprimé, qui ne dépend significativement de la pression, que pour des faibles pressions ($P_A < 100\text{kPa}$).
- du volume de la chambre (A), et de la vitesse de déplacement du piston, et donc de la déformabilité du sol et de sa viscosité.

Ainsi, on constate Fig. 11, que dans le cas de la parcelle compactée, la déformabilité relativement faible du sol et sa viscosité élevée ont pour conséquence un temps d'accès à l'équilibre élevé. Cette faible déformabilité, et cette faible vitesse de déformation du sol, entraînent de faibles variations du volume de la chambre (A), et, ce relativement lentement, vis à vis du débit d'alimentation en air comprimé. On enregistre alors une montée relativement rapide de la pression. Le temps de mise à l'équilibre croît avec la pression visée, il est compris dans cet exemple entre 3 et 6s.

Déformation du sol



Mise en pression

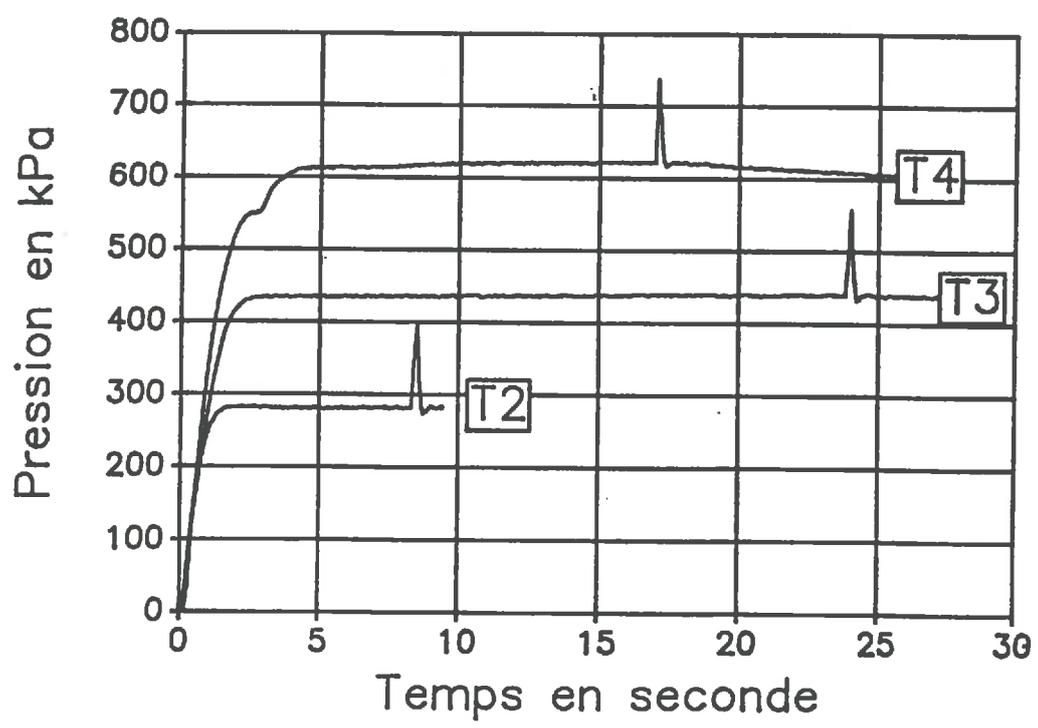


Fig. 11

Dans des matériaux compactés, et à la capacité de rétention, la vitesse de déplacement potentielle du piston permet sans ambiguïté d'enregistrer la déformation du sol, cependant le temps de mise en pression visée ne peut pas être considéré comme négligeable. L'étude de temps d'application de pressions inférieures à la seconde est inaccessible dans ces conditions.

La parcelle travaillée présente l'état physique pour lequel la déformabilité et la vitesse de déformation peuvent être les plus grandes. En comparant (Fig. 12) avec la cinétique du piston dans l'air, on peut vérifier que le prototype permet d'accéder à l'enregistrement de la déformation du sol soumis à l'action du vérin.

La viscosité du matériau est cependant suffisamment importante, pour que la vitesse de variation de volume de la chambre (A), soit faible relativement au débit d'air comprimé.

On enregistre donc en fait une mise en pression plus rapide et plus régulière que dans l'air, cette dernière marquait une discontinuité consécutive au déplacement rapide du piston et à son arrêt en butée. Le temps d'accès aux pressions visées est supérieur à 6s. Pour chaque pression il correspond aux temps d'accès enregistrés dans l'air.

Contrairement aux matériaux à faible déformabilité, le temps d'accès à la pression visée est d'autant plus court que la pression est faible. En effet quand la pression visée augmente la déformation augmente de telle sorte que le débit d'air soit un facteur limitant, et que la vitesse de mise en pression diminue.

En résumé le prototype permet d'accéder à une cinétique de déformation du sol sous charge ; cependant le dispositif retenu ne permet pas d'accéder à une mise en charge quasi-instantanée, et donc d'étudier le compactage en temps court d'application de la charge ($< 1s$). Le temps de mise en pression dépend en fait des conditions expérimentales (état physique du sol, pression visée). Pour mieux critiquer le prototype il faudrait disposer des cinétiques de mise en charge de volumes élémentaires de sol à l'aplomb du passage d'une roue.

D'un point de vue technique, les modifications proposées en E.1 (diminution du diamètre du cylindre du piston et de la plaque) peuvent permettre d'améliorer le prototype.

2. Comportement du prototype dans un matériau présentant un gradient hydrique induit par dessiccation à l'évaporation (Fig.13):

Les différentes situations induites par une dessiccation par évaporation sont comme on l'a vu précédemment de deux types. Dessi1 et Dessi2 se différencient de l'état initial Dessi0 essentiellement par la présence d'une mince couche plus ou moins sèche en surface. Dessi3 et Dessi4, outre une couche sèche "à l'air", présentent une dessiccation générale du profil de 5 à 7 points.

Parcelle travaillée

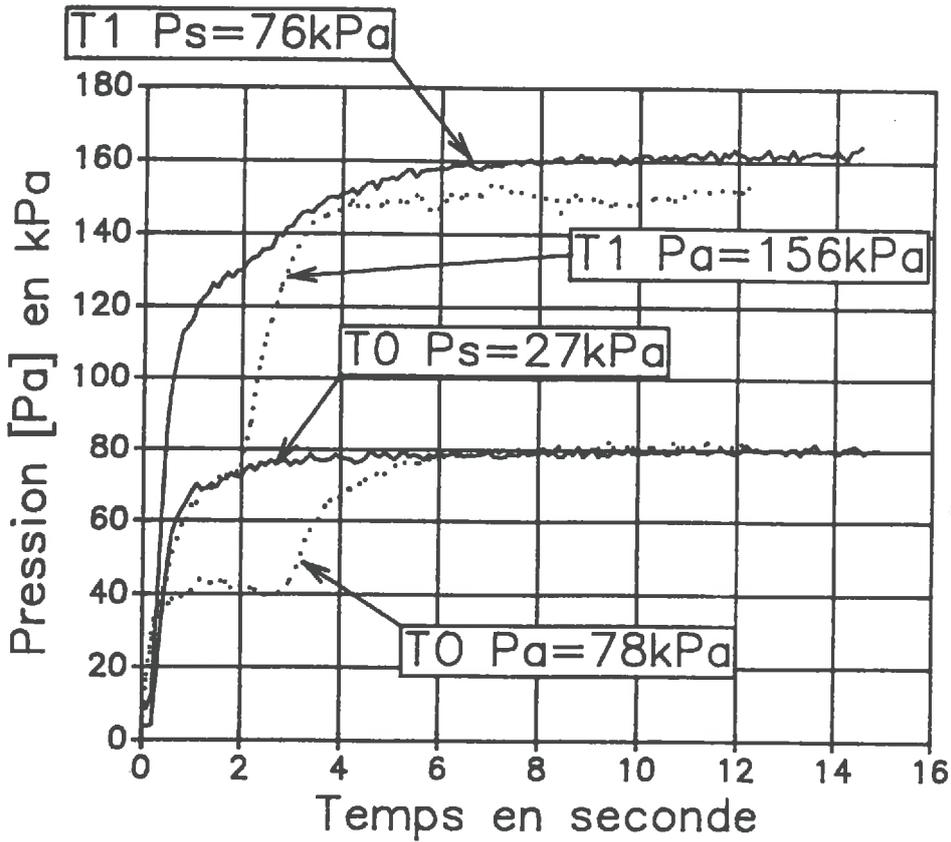
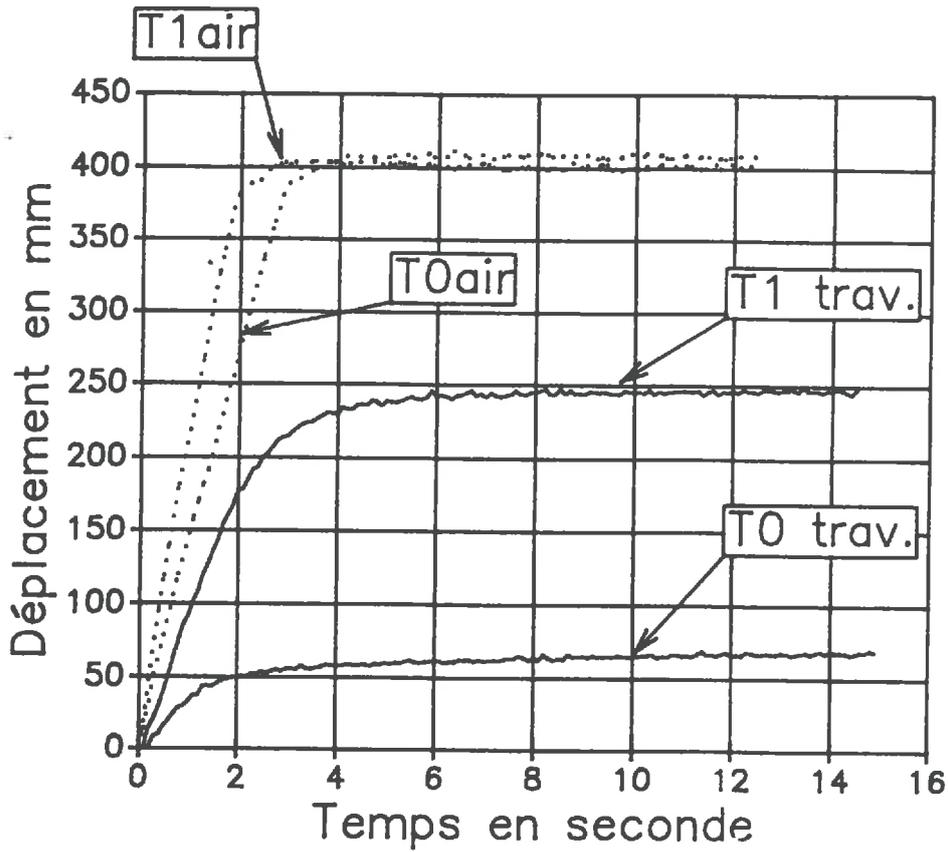


Fig. 12

Parcelle en dessiccation

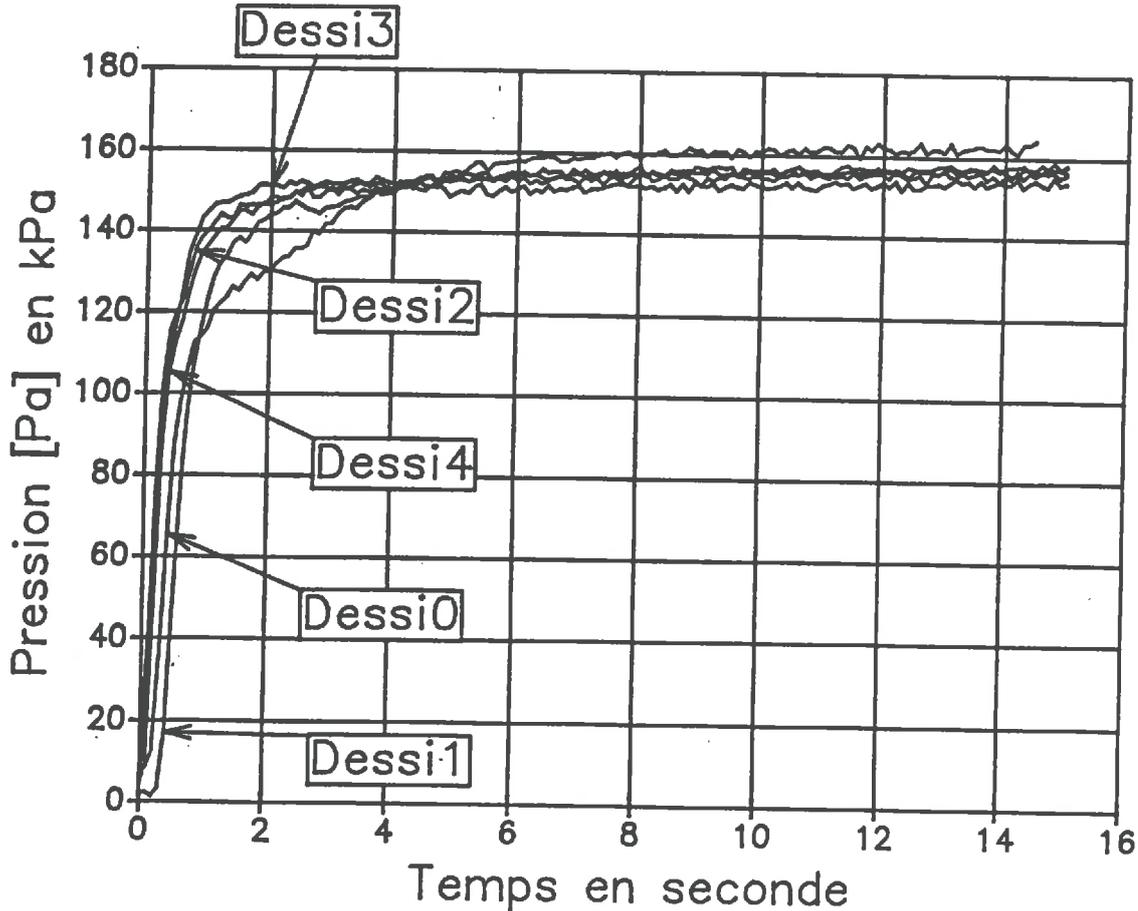
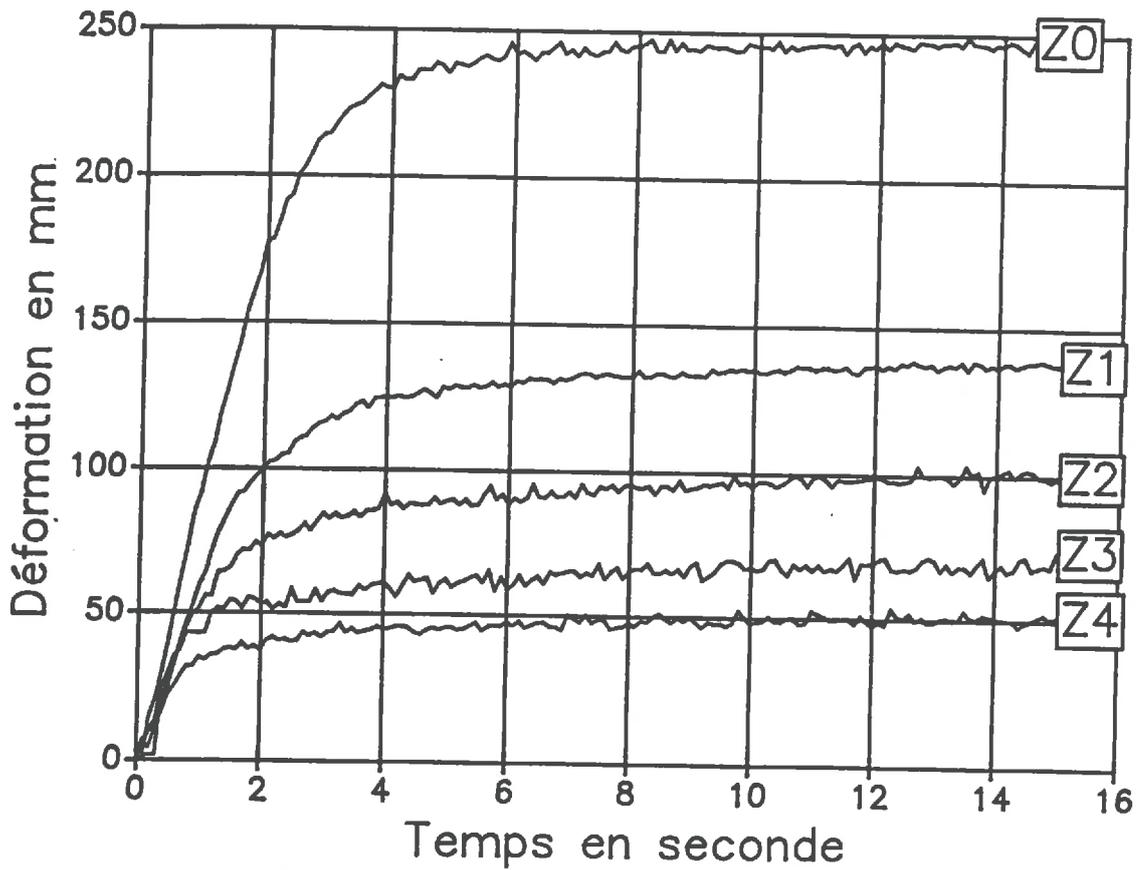


Fig. 13

a) Déformations à l'équilibre :

Quelques soient les situations Dessi1 à Dessi4, le temps de mise en équilibre est, pour le traitement T1 effectué, supérieur à 16s. En Dessi0 par contre l'équilibre est atteint en 8s, le piston venant prendre appui sur le fond de travail.

Les déformations à l'équilibre enregistrées pour les différents traitements se différencient clairement. Les changements de teneurs en eau qu'accompagne le blanchiment de surface, bien qu'imperceptibles avec notre mode de prélèvement pour la mesure de la teneur en eau, provoquent pratiquement une diminution de moitié de la déformation du sol par rapport au témoin.

b) Mises en pression :

Le temps d'accès à la pression visée, est de l'ordre de 6 à 8 secondes, et les cinétiques de mise en pression n'apparaissent pas significativement différentes. Seule la mise en pression en Dessi0 est sensiblement ralentie à partir de 120kPa, l'alimentation en air comprimé devenant limitante vis à vis de l'amplitude et de la vitesse de déplacement du piston.

c) Relations pression-déformation :

La représentation des graphes de la relation pression - déformation est plus synthétique que les représentations précédentes. On verra dans le paragraphe suivant la typologie des comportements qu'elle permet.

Le développement d'une couche sèche à la surface d'un sol soumis à évaporation se traduit par une diminution de la déformation.

Dans le cas de Dessi0, Dessi1, et Dessi2, les profils hydriques ne se différencient que par la présence d'une couche de sol, d'humidité décroissante, dont l'épaisseur n'excède pas 1 ou 2 cm. Les propriétés mécaniques de la couche sous-jacentes ne sont donc pas en cause.

On peut envisager deux mécanismes susceptibles d'expliquer l'influence de ces couches sèches sur la portance :

- soit la croûte de surface présente une résistance importante au poinçonnement, cette hypothèse ne peut expliquer que les légers décalages des pressions à partir desquelles la déformation devient maximale.

- soit, tout se passe comme si la couche sous-jacente à la couche sèche n'était soumise qu'à une pression inférieure à la pression effectivement appliquée en surface. De façon analogique, on peut calculer quelle devrait être la surface d'une plaque équivalente susceptible d'entraîner la déformation à l'équilibre effectivement enregistrée mais, dans un matériau dépourvu de couche sèche "protectrice".

Pour utiliser les données dont nous disposons il convient d'admettre en première approximation, que la relation pression-déformation est indépendante du diamètre de la plaque. Tant que la gamme des diamètres calculés restera faible, cette hypothèse sera acceptable.

La charge au sol F_S se calcule à partir de l'équation (4) :

$$F_S = F - f = 0.03 P_A \cdot 10^3 \dots\dots\dots(9)$$

où P_A est la pression à l'équilibre dans la chambre (A)

En Dessi1 la déformation à l'équilibre est telle que $Z = Z_1$.

On peut estimer graphiquement la pression P_{A-H} qu'il faudrait appliquer, dans le cas de Dessi0 (matériau sans couche sèche), pour atteindre le point H, correspondant à l'enfoncement $Z = Z_1$ (Fig. 14).

On peut alors calculer la pression que l'on aurait au sol P_{SOL-H} avec la plaque du prototype :

$$P_{SOL-H} = (0.03 P_{A-H} - 10^3) / S_{PLAQUE} \dots \dots \dots (10)$$

De (9) et de (10) on tire la surface de la plaque équivalente S'_{PLAQUE} :

$$\begin{aligned} S'_{PLAQUE} &= F_S / P_{SOL} \\ &= (0.03 P_{A-0} - 10^3) S_{PLAQUE} / (0.03 P_{A-H} - 10^3) \end{aligned}$$

Dans ce cas particulier, avec

- $P_{A-0} = 156 \text{ kPa}$
- $S_{PLAQUE} = 490.87 \text{ cm}$, pour un diamètre de 25 cm
- $P_{A-H} = 125 \text{ kPa}$

on obtient une surface de plaque équivalente de 0.066m, soit un diamètre de 28.9cm .

Pour atteindre la déformation $Z = Z_1$, dans un matériau comparable à Dessi0, il suffirait d'accroître le diamètre de la plaque actuelle d'environ 3cm.

On peut envisager que l'effet "couche sèche", s'explique par la présence d'un disque de terre relativement peu déformable, comparativement à la couche sous-jacente, et dont la surface de contact avec celle-ci détermine, la pression effective transmise en profondeur. Dans la situation Dessi1 la surface de contact de ce disque de terre serait de l'ordre de 30cm . Cette surface irait en augmentant avec l'épaisseur de la couche sèche.

3. Typologie des relations pression-déformation :

a) Parcelle en dessiccation

L'étude des courbes donnant la profondeur d'enfoncement en fonction de la pression dans la chambre (A) montre, lorsque l'on ramène les courbes à des bi-droites (Fig. 15), que l'on peut déterminer deux phases dans la déformation du sol.

Celui-ci oppose tout d'abord une résistance à l'enfoncement (segment OA), jusqu'à ce que la pression appliquée atteigne une valeur qui permette de la vaincre (P0).

Au delà de P0, la déformation est de forte amplitude (segment AB) et dépend dans de forte proportion de la pression.

Au-delà du point B, la déformation diminue. Cela s'explique par la présence d'une couche bien différenciée, par sa teneur en eau plus faible et par sa faible porosité structurale à la profondeur de 25 cm (cf. Fig.10)

Relation pression déformation
pour les profils en dessiccation
éléments d'interprétation

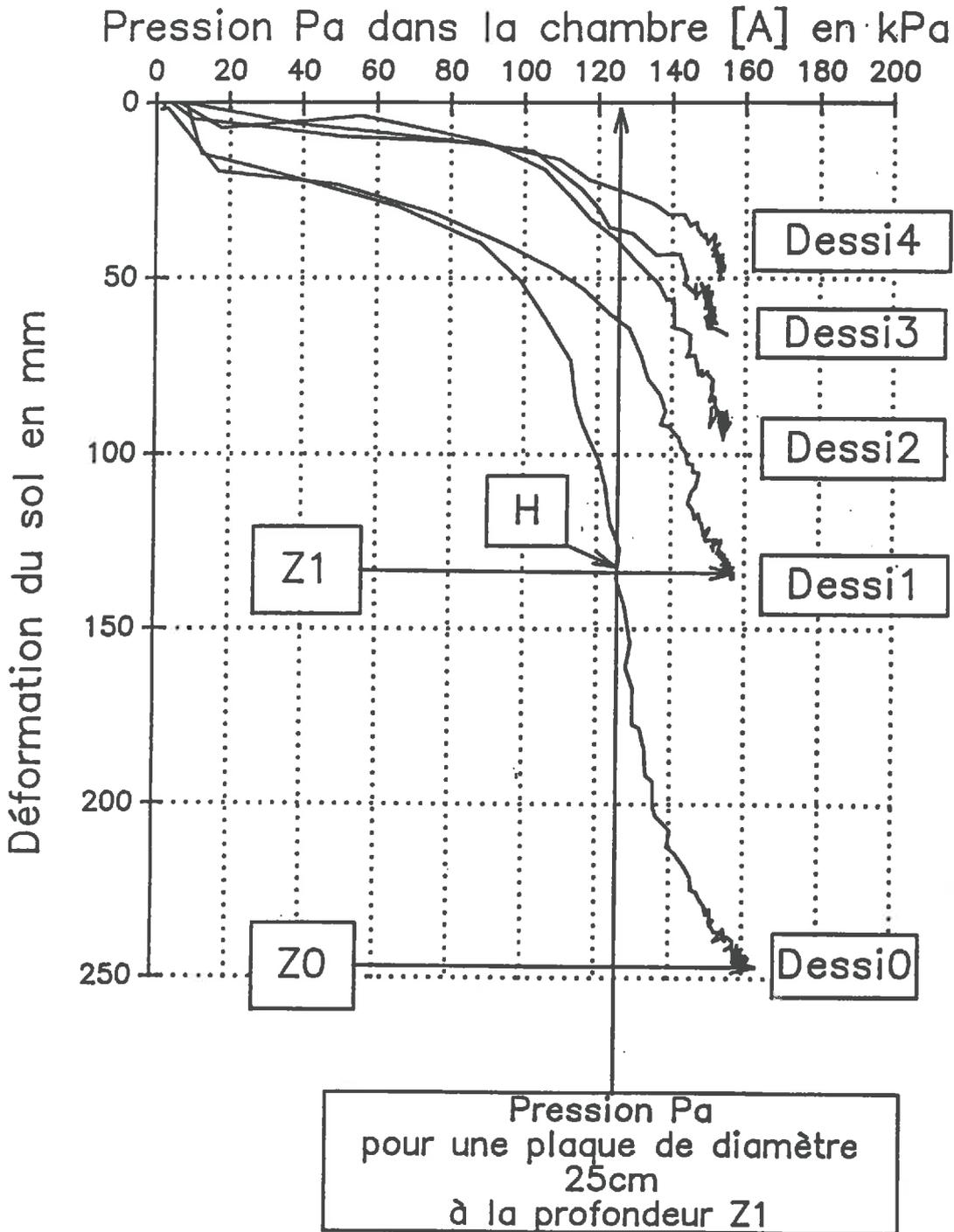


Fig 14

Relation pression déformation pour les profils en dessiccation : éléments d'interprétation

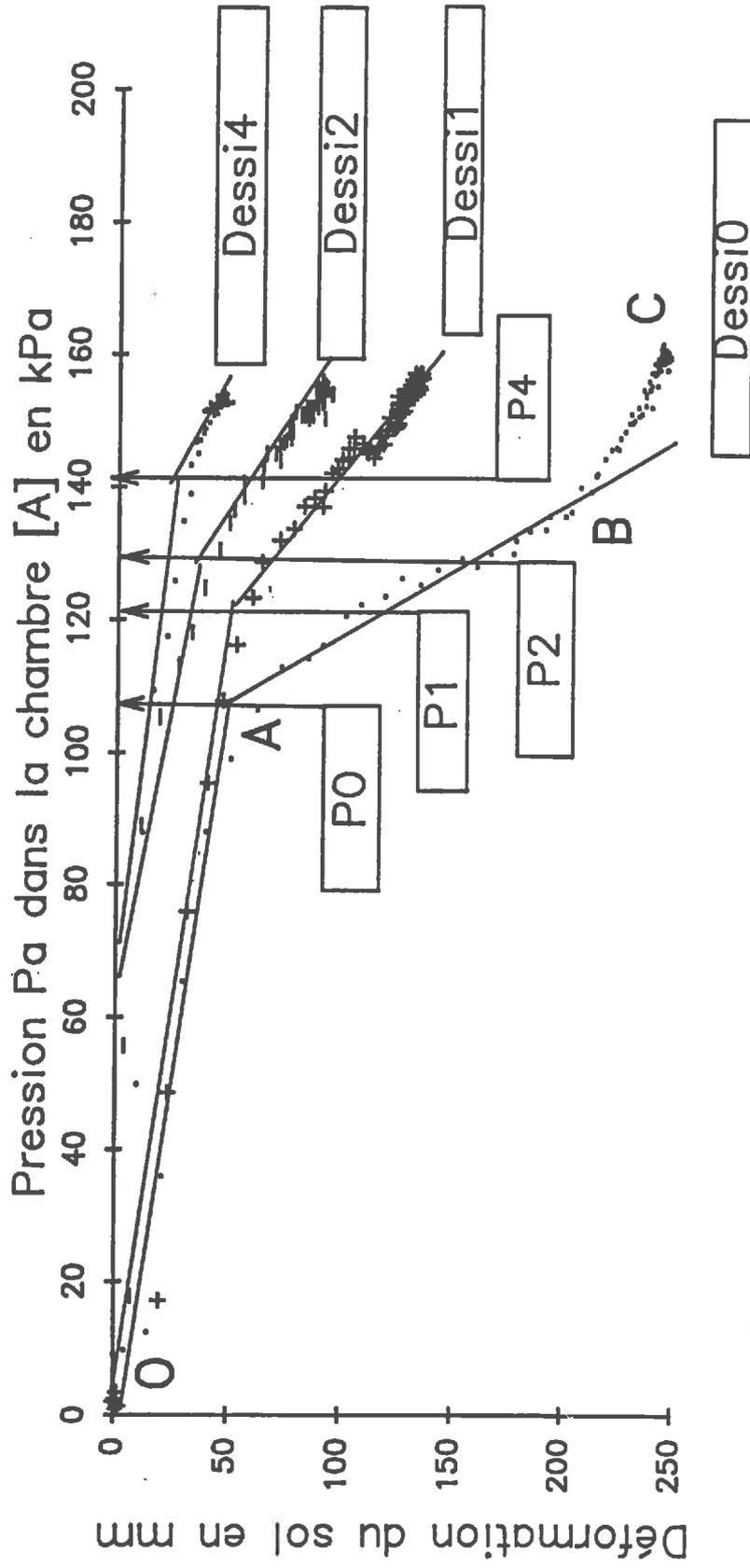


Fig. 15

On constate que le changement de comportement, qui se manifeste au point A pour Dessi0 apparaît pour des pressions de plus en plus fortes au fur et à mesure que le profil s'assèche.

Ces points se situent grossièrement à la même profondeur, on peut invoquer un effet de poinçonnement de la couche sèche, il est en effet plausible que les forces de cisaillement nécessaires pour rompre une éventuelle plaque terreuse augmentent avec son épaisseur.

Il semble, pour Dessi1 et Dessi2, que l'hypothèse la plus plausible soit celle évoquée précédemment, et mettant en cause l'augmentation, avec l'épaisseur de la couche sèche, de la surface de contact entre un volume de terre indéformable, poussé par le piston, et la couche sous jacente, qui elle a conservé toutes ses propriétés de déformation (tassement et fluage). Pour Dessi3 et Dessi4 l'ensemble du profil hydrique étant modifié ses propriétés mécaniques ont probablement évoluées parallèlement.

b) Parcelle compactée + Parcelle travaillée (Fig. 16)

Le même type d'analyse que précédemment peut être mené.

On retrouve en ramenant les courbes à des bi-droites les points limitant les deux zones de comportement (A-B-C-D-E).

Les deux situations présentées, du fait des états relativement extrêmes qu'elles représentent, résument bien les comportements que l'on peut rencontrer. Elles montrent la capacité du prototype à rendre compte des pressions de "précompression" qu'il faut dépasser pour provoquer une déformation significative du sol.

Ce type de représentation graphique devrait permettre de différencier dans des essais comparatifs aussi bien des situations extrêmes que des situations à différenciations plus difficilement perceptibles.

VI. CONCLUSION

Le prototype réalisé présente, par rapport au cahier des charges fixé, un certain nombre de qualités mais reste susceptible d'améliorations.

Ses qualités essentielles sont :

- La possibilité d'accéder à la cinétique de déformation du sol
- La répétabilité satisfaisante de la mesure de déplacement par rapport à la précision requise
- Une totale autonomie sur le terrain.

Les améliorations souhaitables dans un premier temps tiennent en trois points principaux :

- La nécessité d'obtenir une mise en charge, plus fiable, en changeant le système de régulation (mano-détendeur), et surtout plus rapide, si l'on veut étudier les temps courts d'application des pressions, en modifiant les caractéristiques dimensionnelles du piston et de la plaque..

Relation pression—déformation
éléments d'interprétation

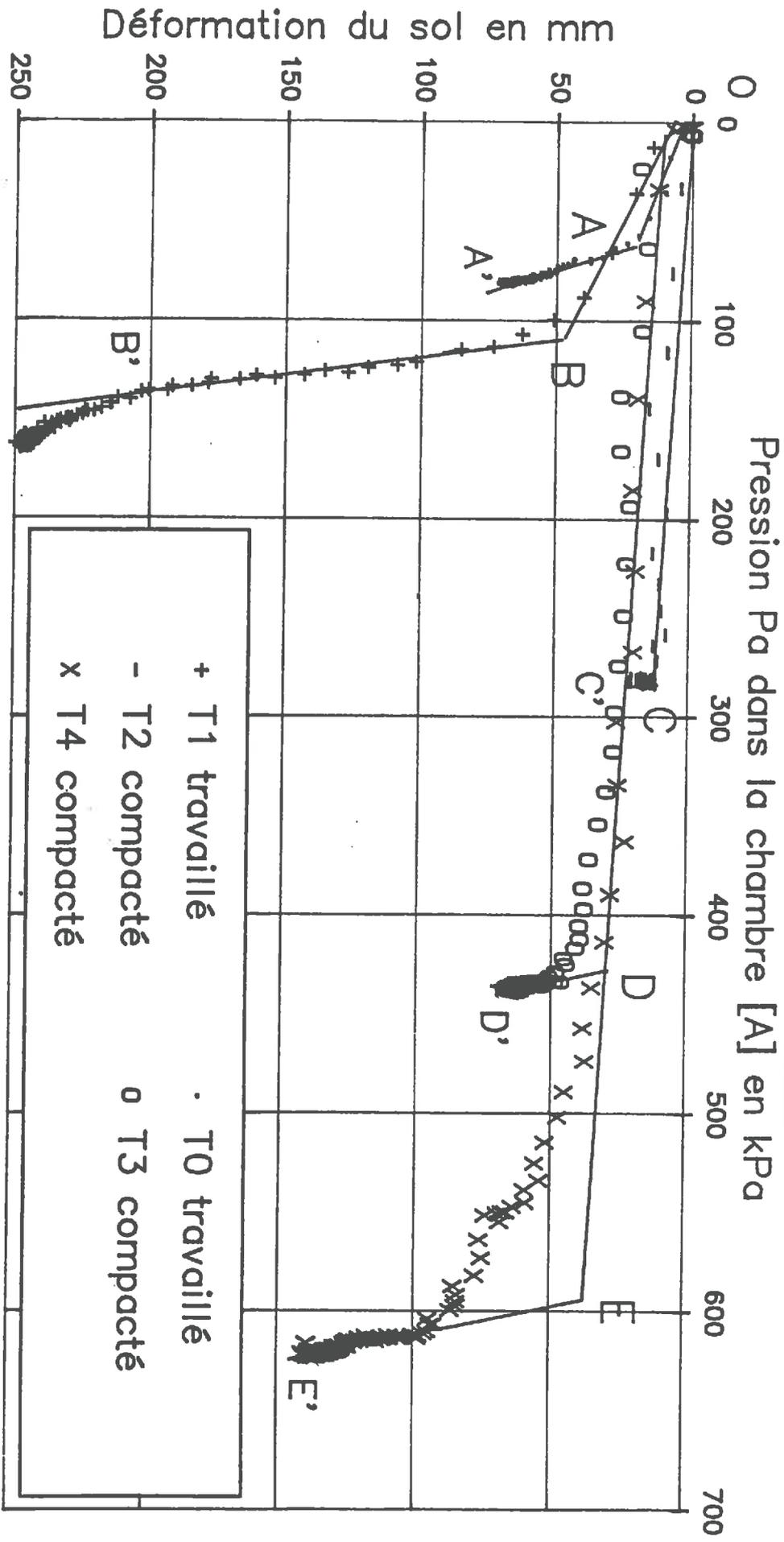


Fig. 16

- L'adjonction, afin de mesurer directement la déformation, d'un second capteur de déplacement pour apprécier le déplacement du point d'appui, (soulèvement du tracteur et élasticité du système trois point).

- L'automatisation de la chaîne d'acquisition et de traitement des données pour une utilisation en routine.

En ce qui concerne l'aptitude du prototype à apprécier la portance d'un sol, il faut d'abord souligner sa bonne sensibilité à des profils hydriques, même faiblement différenciés. D'autre part, l'étude des graphes des relations profondeur d'enfoncement - pression appliquée au sol permet d'avancer des hypothèses comportementales concernant les mécanismes de déformation à partir des profils d'humidité et d'indice des vides structuraux.

Le prototype, avec les quelques améliorations proposées, est tout à fait susceptible de servir de base à l'élaboration d'un test de portance. Mais la définition d'un protocole précis à mettre en oeuvre pour parvenir à quantifier l'amélioration de portance dans des essais comparatifs (de type parcelle drainée/non drainée, par ex.) suppose l'acquisition préalable d'un jeu d'essais à partir de situation réelle et fera l'objet d'un travail ultérieur.

ANNEXE 1 : ANALYSE DES SYSTEMES DE POROSITE

PRINCIPE

FIES et STENGEL (1971-1982) ont proposé un système de référence où l'hypothèse de base consiste à admettre qu'une fraction de l'espace poral résulte de l'assemblage des particules élémentaires constitutives du sol. Cette fraction est appelée espace poral textural. Son complément dans l'espace poral total est appelé espace poral structural.

1/ Espace poral textural.

Pour un matériau donné, la porosité texturale :

- à l'état sec varie peu au cours du temps,
- est liée à la teneur en eau par une courbe de retrait gonflement que l'on peut également considérer comme stable. Celle-ci a été réalisée sur des agrégats de la parcelle expérimentale (cf. fig. 17).

Pratiquement, on estime, par bilan de volume, la part relative du volume des pores et du volume de solide. On mesure la masse volumique d'agrégats (μ_d) de 2-3 mm par pesée et poussée d'Archimède dans du Kerdane, et la masse volumique du solide (μ_s) par pycnométrie à eau. On en déduit alors l'indice des vides textural :

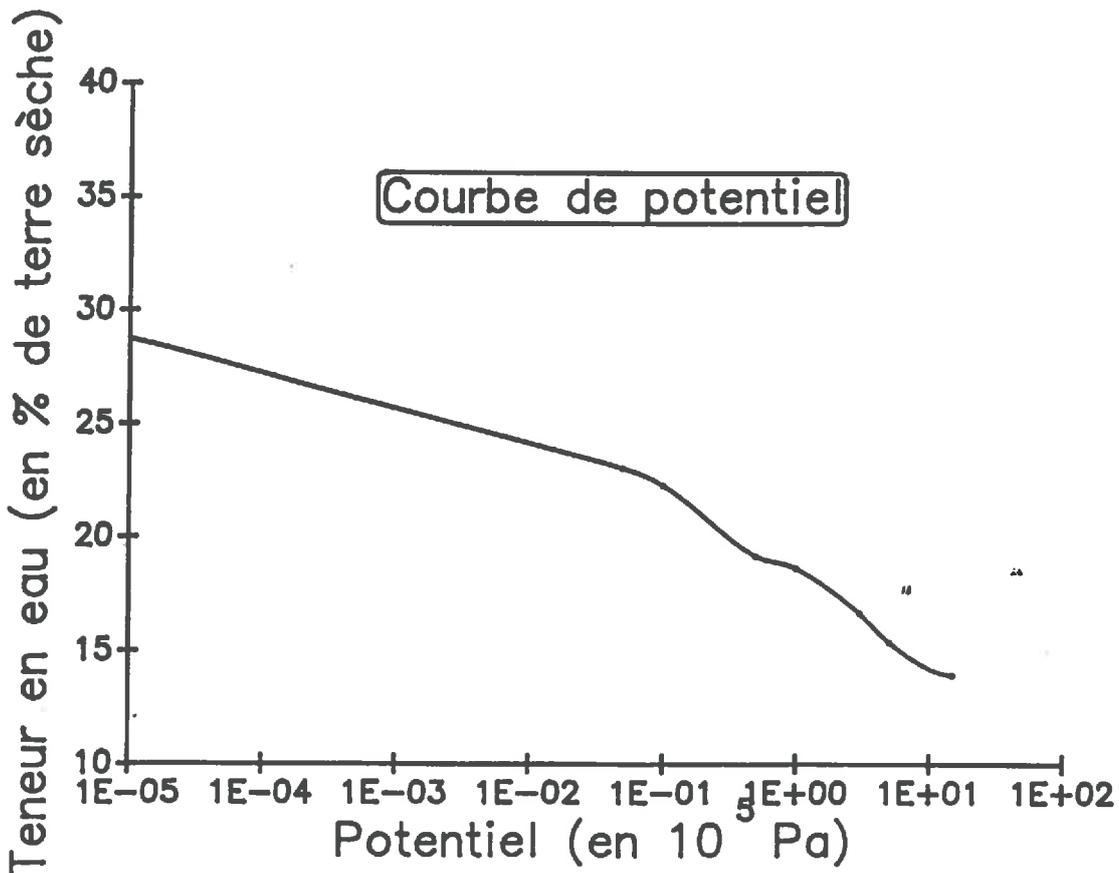
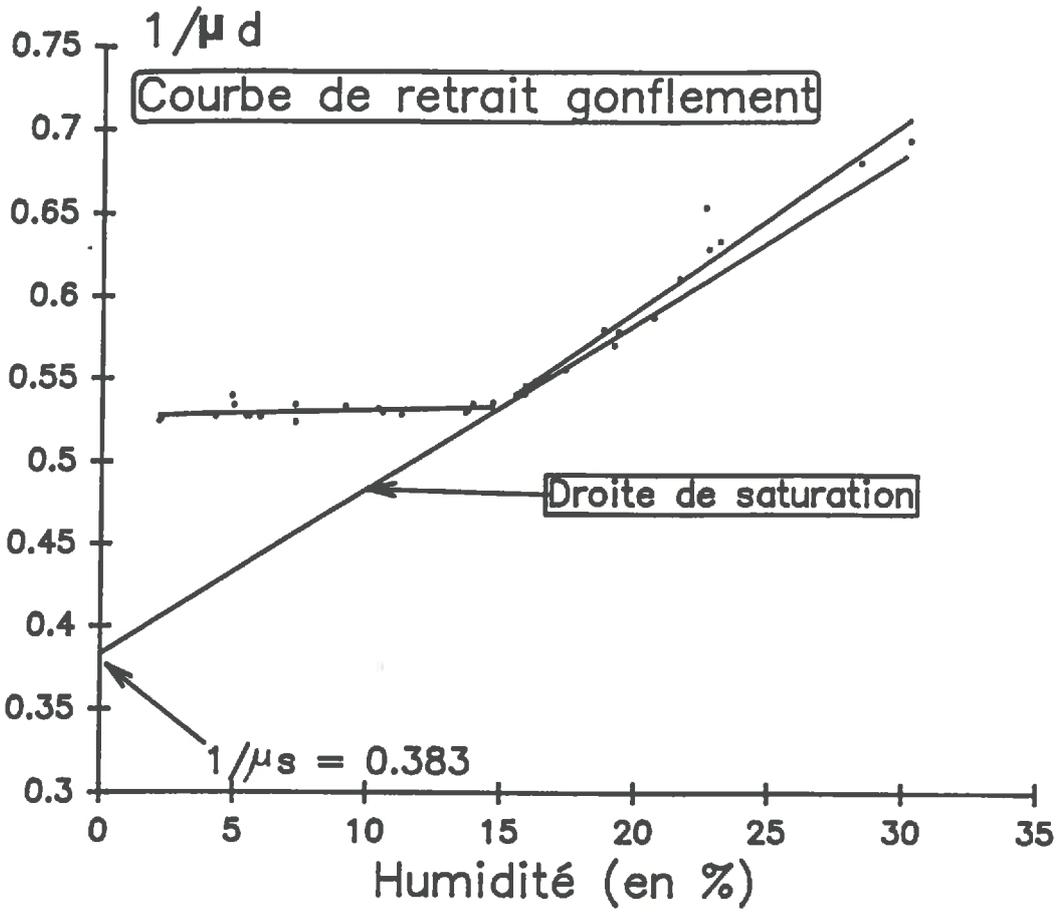
$$e_t = \mu_s / \mu_d - 1$$

2/ Espace poral structural

Par différence avec l'indice des vides total obtenu par la mesure à la sonde gamma, on obtient l'indice des vides structural et ceci pour chaque humidité

$$e_s(w) = e_T(w) - e(w)$$

La possibilité d'utiliser la partition textural/structural est particulièrement intéressante du fait que l'espace poral structural est seul, ou de façon très prédominante, affecté par des actions mécaniques. L'indice des vides structural est donc une meilleure variable descriptive de l'effet de ces actions que l'indice des vides total.



nota: 1E-01 = 10⁻¹

ANNEXE 2 : SONDE LPC-INRA

PRINCIPE

La mesure de la masse volumique par la sonde LPC-INRA revient à la mesure d'un comptage de photons gamma. La sonde est constituée de deux pals :

- le tube porte source : contient la source radioactive émettrice du rayonnement gamma,
- le tube porte détecteur : contient la chaîne de détection du rayonnement après transmission.

Le nombre de photons gamma détectés est fonction de la densité humide du matériau. Il est donné par la loi d'atténuation d'un faisceau mono énergétique dite loi de BEER.

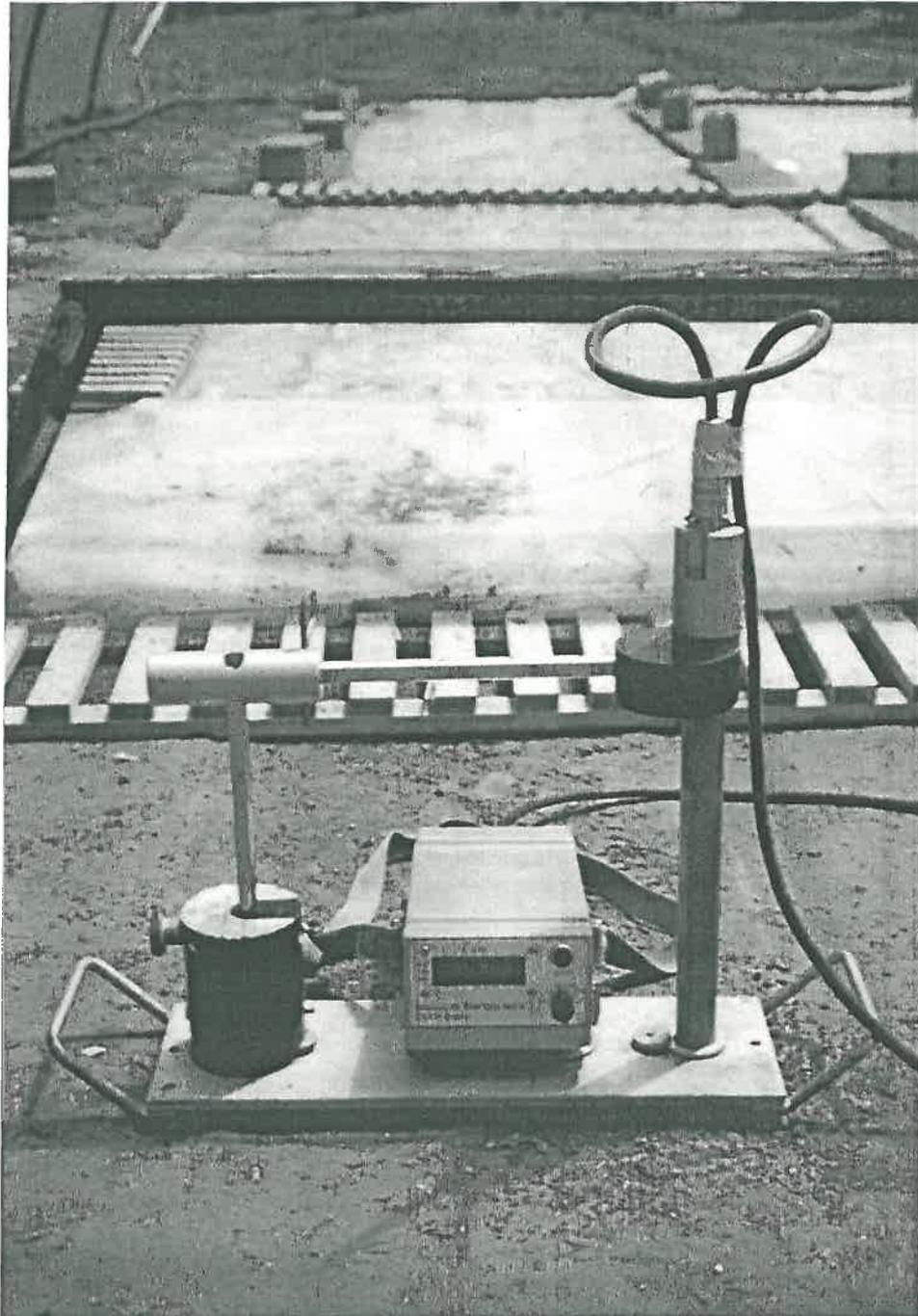
Les photons gamma détectés sont supposés conserver leur énergie initiale lors de la transmission et ne subir aucune interaction avec le matériau qu'ils traversent.

Pratiquement :

On procède tout d'abord à la mise en place des tubes d'aluminium, destinés à recevoir les deux pals du gamma-densimètre. Lors du perçage des trous à la tarière, on réalise les prélèvements d'échantillons (de 5 en 5 cm jusqu'à 35 cm), destinés à l'établissement du profil hydrique. Les mesures d'humidité sont effectuées par gravimétrie après séchage à 105°C pendant 24 heures.

Les comptages sont ensuite effectués en descendant les pals dans les tubes d'aluminium par pas de 5 cm jusqu'à 35 cm.

Le résultat de ces comptages est exploité par un programme informatique (LPC3) mis au point à la Station de Science du Sol d'Avignon) (BERTUZZI, BRUCKLER, 1984).



A - GAMMADENSIMETRE L.P.C.-I.N.R.A.

BIBLIOGRAPHIE

- BILLOT J.F. and MARIONNEAU A.** July 1988. Soil compaction: analysis of field and lab experiments. International Soil Tillage Research Organisation .11th International Conférence. Edinburgh, Scotland. (1), 197-203.
- BLACKWELL P. S., SOANE B. D.** 1981. A method of predicting bulk density changes in field soils resulting from compaction by agricultural traffic. *Journal of Soil Science*, 32 (1), 51-65
- COLLAS PH.** Juin 1987 .Une méthode pénétrométrique pour étudier la traficabilité pour les opérations culturales.
- DURET J.L. SEP.** 1984 .Essai du pénétromètre pour estimer la portance des prairies permanentes paturées. Mémoire de fin d'étude E.N.I.T.A. de Dijon.
- GUERIF J.** 1984. The influence of water-content gradient and structure anisotropy on soil compressibility. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 29 , 367-374
- O'SULLIVAN M.F., DICKSON J.W., HENSHALL J.K., ANDERSON G.** 1983. Electronic collection and storage of data from a hand-held recording soil penetrometer. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 28 , 175-178
- PERDOK U. D.** 1978. A prediction model for the selection of tyres for towed vehicles on tilled soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23 (4), 369-383
- PERDOK U. D.** 1978. A prediction model for the selection of tyres for towed vehicles on tilled soil. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 23 (4), 369-383
- POPE R. G.** 1971. Effect of wheel speed on rolling resistance. *Journal of Terramechanics* v 8 n 1 1971 p 51-8
- SELA A. D., EHRLICH I. R.** 1971. Load support capability of flat plates of various shapes in soils. Stevens Inst Technol, Davidson Lab, Rep-1510 Jan 1971, 18 p
- SELA A. D., EHRLICH I. R.** Sep 71. Stevens Inst of Tech Hoboken N J Davidson Lab. Prediction of Rigid Wheel Performance from Plate Sinkage Tests. Final rept. , 71p
- SELA A. D., EHRLICH I. R.** Jan 71. Stevens Inst of Tech Hoboken N J Davidson Lab. , 30p9
- SELA A. D., ERLICH I. R.** 1972. LOAD SUPPORT CAPABILITY OF FLAT PLATES OF VARIOUS SHAPES IN SOILS. *Journal of Terramechanics* v 8 n 3 1972 p 39-69
- SIMONNIN X.** Oct. 1985 .Essais de pénétromètres sur prairies drainées .INRA Le Pin au Haras
- SUDAKOV A.B., OKHYTIN A.A.** 1987. Appareil d'enregistrement du compactage provoqué par les déplacements sur les sols. (en russe), *Zemlediele* 9: 23-25.
- WIENDIECK KLAUS W.** Dec 68. Army Engineer Waterways Experiment Station Vicksburg Miss. Stress-Displacement Relations and Terrain-Vehicle Mechanics: A Critical Discussion. Final rept. *Jnl. of Terramechanics* v5 n3 p67-85 1968., 23p
- ZAKO T., BEKKER M. G.** May 58. Army Tank-Automotive Command Warren Mich Land Locomotion Div. Determination of Vehicle Sinkage Parameters by Means of Rigid Wheels, Part I. , 39p