

Les applications agronomiques de la pénétrométrie à l'étude de la structure des sols travaillés

J.-F. BILLOT

Centre National du Machinisme Agricole du Génie Rural
des Eaux et Forêts
C.E.M.A.G.R.E.F., 92160 ANTONY

SOMMAIRE

Jusqu'à ces dernières années la pénétrométrie était utilisée aussi bien en génie civil qu'en agriculture pour définir le comportement mécanique du sol considéré soit comme point d'appui pour la locomotion ou la traction, soit comme matériau à travailler. On constate au fil des publications que cette technique est de plus en plus employée dans des études à caractère plus spécifiquement agronomique. Cet article en présente une application particulière qui complète les observations visuelles des profils culturaux par le biais d'une cartographie des micro-hétérogénéités du sol. Le matériel de mesure utilisé, présenté ici, est un pénétromètre électronique automatique que nous employons nous-mêmes pour l'étude de l'action des outils de travail du sol et l'analyse du compactage du sol par les engins agricoles.

INTRODUCTION.

En machinisme agricole, lorsqu'on étudie les relations sols/outils et sols/tracteur, on éprouve le besoin de caractériser l'état physique du terrain avant et après le passage de l'ensemble tracteur/outils par des indices permettant de comparer les diverses situations entre elles. Les paramètres physiques du sol étant nombreux et les lois qui les lient complexes, on a cherché à employer des tests synthétiques simples et, parmi eux, la mesure de la résistance opposée par le sol à l'enfoncement d'un outil normalisé : la pénétrométrie. L'évolution a porté à la fois sur le type d'outil et sur le mode opératoire.

Vers 1840, GASPARIN propose une « **bêche dynamométrique** » pour mesurer la « **ténacité** » des terres. Cette bêche pesant 2,7 kg s'enfonce dans le sol lorsqu'on la laisse tomber de 1 m de haut. Moins la bêche s'enfonce, plus la ténacité de la terre est élevée. L'enfoncement est ainsi de 0,03 m pour une terre « **marneuse, durcie et piétinée** », de 0,06 m pour une terre sableuse bien ressuyée et de 0,08 m quand cette même terre est gorgée d'eau par une pluie. La bêche s'enfonçant difficilement en sols caillouteux, on la rempalce par une fourche de même poids à trois pointes « **modérément aiguisées** »

dont le taux d'enfoncement par rapport à la bêche est de 10/7. On peut ainsi comparer les terres entre elles. En 1913, BERNSTEIN semble être le premier à évaluer la portance des sols en y enfonçant des aiguilles. En 1933, PROCTOR, cherchant à mesurer la compacité des sols pour des études de génie civil, normalise un test utilisant des aiguilles — de pointe plus large que la tige — que l'on enfonce dans le sol à une vitesse bien définie. En 1936, DEMOLON et HENIN mettent au point une « **sonde dynamométrique** » enregistreuse qui fournit des courbes de résistance en fonction de la profondeur de mesure. Hénin propose alors un « indice d'ameublissement », rapport entre l'énergie fournie pour faire pénétrer la pointe à une certaine profondeur dans un sol infiniment meuble et celle correspondant au sol étudié.

Pour une profondeur de 0,20 m, cet indice atteint des valeurs de 0,9 m en sol sableux à 0,35 en sol battant croûté. En sol de limon, on obtient 0,55 en sol non travaillé et 0,92 après passage d'un outil rotatif. En 1942, SHAW, HAISE et FARNSWORTH utilisent un pénétromètre pour étudier la nature et l'étendue des changements physiques dans des profils de sols de l'Ohio et en déduisent les effets de diverses méthodes de préparation des sols ainsi que ceux d'apports d'eau sur les caractéristiques physiques des sols. Puis, l'ASAE normalise une pointe de pénétromètre (ASAE 313.1) qui doit être poussée dans le sol à une vitesse de 0,03 m/s pour donner la « **résistance à la pénétration** » ou « **cône index** », CI, caractéristique du sol et de son état. Cette pointe est constituée par un cône à 30° d'angle au sommet et de 1/2 pouce carré de section maximale — on obtient la valeur de CI correspondant à une couche de terrain en faisant la moyenne des valeurs obtenues dans cette couche. La valeur correspondant à la surface est celle lue au moment où la section maximale de la pointe atteint ce niveau. Depuis, ce « CI » est fréquemment utilisé comme valeur référence de l'état physique du sol, ou dans des relations empiriques caractérisant le comportement des roues d'un engin agricole ou les efforts de traction des outils de travail du sol.

Plus récemment, le développement des méthodes d'observation visuelles du profil cultural décrites par HENIN (1969) pour caractériser l'état physique du sol « in situ » en vue d'étudier sous l'angle agronomique les relations physiques outils-sol et sol-racines, et les facilités nouvelles offertes par l'électronique et l'informatique ont permis d'accroître le champ d'utilisation de la pénétrométrie à des fins agronomiques.

Après une présentation rapide des divers pénétromètres, nous nous proposons de présenter une application particulière de la pénétrométrie destinée à affiner les observations visuelles du profil cultural en les rendant plus objectives et plus comparables par le biais d'une cartographie automatique des micro-hétérogénéités du sol.

I. — DIVERS TYPES DE PÉNÉTRIMÈTRES.

Les pénétromètres utilisés actuellement sont de deux types : à enfoncement progressif ou à percussion.

Les pénétromètres à enfoncement progressif :

Ces pénétromètres sont poussés dans le sol soit manuellement (l'effort vertical étant alors pratiquement limité à 50 daN), soit mécaniquement si l'appareil est fixé à un véhicule (tracteur agricole ou voiture tout terrain). La force verticale est transmise à la pointe par l'intermédiaire d'un dispositif de mesure mécanique (compression d'un ressort), hydraulique (manomètre) ou électronique (capteur extensométrique). Cet effort est lu ou enregistré pour différentes profondeurs de pénétration. On obtient ainsi des profils pénétrométriques plus ou moins continus. Cet effort rapporté à la section maximum de la pointe est lu comme une pression, c'est la résistance à la pénétration. Les pointes de diamètre important (> 20 mm) seront utilisées de préférence en sol meuble, où les mottes peuvent bouger les unes par rapport aux autres, et chaque fois que l'on désira surtout obtenir des données globales caractérisant l'état du sol.

La forme de la pointe n'est alors pas indifférente. Dans ce dernier cas, on emploiera une pointe relativement aiguë (30° d'angle au sommet) qui aura tendance à « **lisser** »

les courbes d'enregistrement. Au contraire, si l'on s'intéresse surtout à la mise en évidence des micro-hétérogénéités verticales, on utilisera une pointe moins aiguë (90° d'angle au sommet), (figure I).

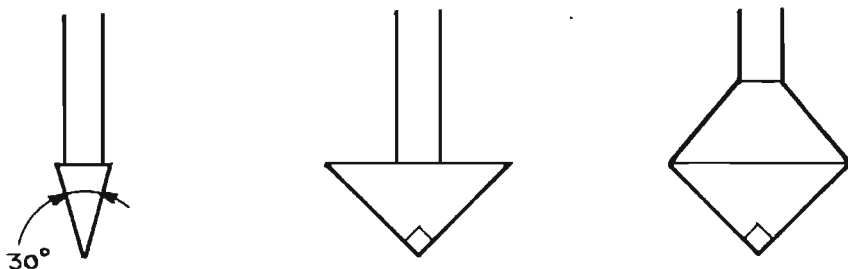


FIGURE I. — Divers types de pointes utilisés sur les pénétromètres, l'emploi du troisième type provoque moins de bouleversement de la structure du sol au moment du retrait

Some pointes used on penetrometers, the third one causes less damage to soil structure in its coming up

Quelquefois, la « pointe » est cylindrique. C'est le cas pour un petit pénétromètre de poche (CN 970 Soil Test). Il permet de mesurer la résistance à la compression simple d'un sol qui est lue directement en face d'un index après enfoncement d'un embout cylindrique jusqu'à un trait repère. Cette valeur P est reportée sur un diagramme de Mohr en même temps que la résistance au cisaillement pur S , mesurée avec un petit scissomètre. On obtient ainsi rapidement une valeur approchée de la cohésion et de l'angle de frottement interne du sol (figure II).

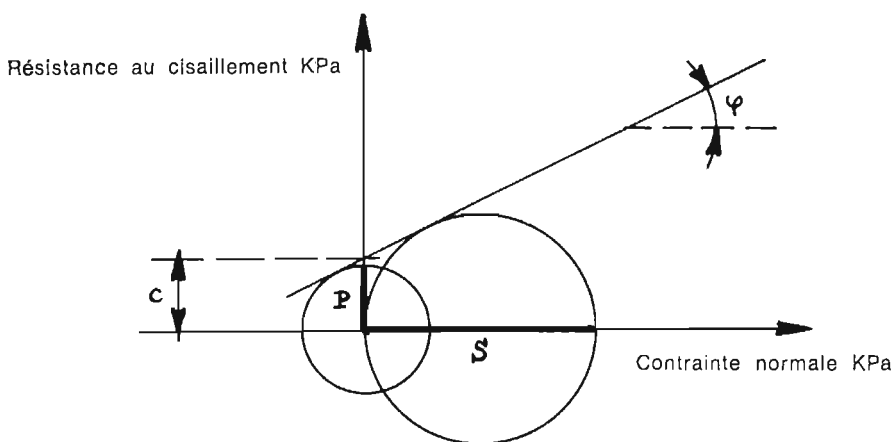


FIGURE II. — Diagramme de MOHR - MOHR diagram

Ce petit pénétromètre employé horizontalement sur des profils pédologiques ou culturaux mesure rapidement la consistance relative des zones homogènes mises en évidence au couteau.

On a créé une échelle de consistance selon la valeur mesurée :

résistance à la compression simple	25	50	100	200	400	KPa
consistance	molle	mi-consistante	consistante	très consistante	extrêmement consistante	

Les pénétromètres à percussion :

De construction très simple, ils sont composés d'une tige verticale terminée par la pointe. Une masselotte coulisse autour de la tige. On la remonte manuellement et on la laisse tomber : le choc sur une butée provoque l'enfoncement de la pointe dans le sol.

En reportant sur un graphique les enfoncements successifs et les nombres de coups correspondants, on obtient un profil pénétrométrique en énergie de pénétration.

En utilisant la formule empirique dite « **des Hollandais** », on obtient les valeurs correspondantes de la résistance à la pénétration.

$$RP = \frac{M^2 \cdot h}{2 (M + m) S} \cdot \frac{n}{\Delta Z}$$

RP : résistance à la pénétration en kg/cm²

M : masse de la masselotte en kg

m : masse du reste du pénétromètre en kg

h : hauteur de chute de la masselotte en cm

S : section maximum de la pointe en cm²

n : nombre de coups (sans unité)

ΔZ : enfoncement correspondant en cm

Ce type de pénétromètre est souvent utilisé lorsque le sol est très dur (cas des sols secs des pays méditerranéens ou tropicaux).

II. — EMPLOI DES PÉNÉTRIMÈTRES.

Ces divers pénétromètres ont été surtout employés pour obtenir des données numériques caractérisant le sol.

En sol homogène sur toute sa profondeur, la résistance à la pénétration dépend du comportement mécanique global du sol :

— pour les sols dont les propriétés mécaniques dépendent essentiellement de la cohésion (argiles saturées en eau par exemple), la résistance à la pénétration est constante quelle que soit la profondeur. La valeur de la cohésion d'un tel sol est immédiatement déduite en multipliant celle de la résistance à la pénétration par un simple coefficient ;

— pour les sols dont la caractéristique mécanique principale est le frottement interne des particules qui les constituent (sable sec ou dans une certaine mesure sol très émiétté en conditions sèches), la résistance à la pénétration est nulle en surface et croît régulièrement avec la profondeur. Le gradient de résistance à la pénétration dépend alors directement du poids volumique du sol et de son angle de frottement interne.

Dans ces deux cas particuliers, une mesure au pénétromètre permet de rendre compte du comportement mécanique du sol.

Mais dans la majorité des sols agricoles de nos régions, le comportement mécanique est mixte ; il est difficile de séparer ce qui, dans la valeur de la résistance à la pénétration, est dû à la cohésion et/ou à l'angle de frottement interne. On ne peut alors espérer avoir une connaissance complète du comportement mécanique du sol à partir de simples données pénétrométriques, des tests plus complexes (mesure de la résistance au cisaillement sous diverses contraintes normales, mesure de portance...) doivent être alors mis en œuvre pour en déduire les possibilités de locomotion ou les efforts de traction lors des interventions culturales.

Aussi dans les études à caractère agronomique utilise-t-on les pénétromètres plus pour obtenir des données relatives que pour les valeurs de résistance à la pénétration elles-mêmes. On peut citer ou imaginer leur emploi pour divers tests :

— Tests d'aide à la décision.

On pourrait imaginer que les agriculteurs utilisent des pénétromètres enregistreurs rustiques pour évaluer les capacités de portance d'un champ. Les courbes ainsi obtenues seraient plus précises qu'une simple évaluation « à la botte » et renseigneraient mieux sur l'état du sol en profondeur et notamment sur l'évolution du ressuyage. Ils auraient ainsi des éléments plus sûrs pour décider de l'opportunité d'interventions culturales généralement réalisées aux périodes critiques pour le sol : épandages et traitements en cours d'hiver, reprise des labours et récolte des fourrages au printemps (DALLEINNE, 1974) :

— Tests comparatifs en cours de prospection.

Avant l'implantation d'un drainage, une exploration de la parcelle au pénétromètre met en évidence les hétérogénéités verticales du sol. On pratique alors les mesures complémentaires indispensables (densité, etc.) uniquement sur les couches homogènes ainsi repérées. Cela permet de gagner du temps et de travailler moins à l'aveuglette.

De même, pendant la phase d'implantation d'un essai aux champs, de nombreux relevés pénétrométriques sur le site choisi donnent rapidement une idée de son hétérogénéité horizontale. Ce peut être un guide précieux pour la localisation du dispositif expérimental.

Jusqu'ici, nous avons présenté une utilisation des pénétromètres selon une maille de mesure très grande — de l'ordre de la dizaine de mètres — ; on peut aussi les employer selon une maille beaucoup plus serrée pour décrire les micro-hétérogénéités du sol.

III. — UTILISATION DE LA PENETROMETRIE POUR L'ETUDE DU TRAVAIL DU SOL ET DU COMPACTAGE.

1. MATERIEL ET METHODE.

L'appareil que nous employons est un pénétromètre électronique enregistreur de précision que nous avons conçu et mis au point (figure III).

Il comprend trois parties principales :

- la tige de 50 cm de long que l'on enfonce dans le sol est terminée par une pointe conique (90°) de 0,25 cm² de section maximum ;
- un capteur extensométrique de traction-compression de 50 daN est intercalé entre la tige et une crémaillère. On enfonce verticalement la pointe dans le sol en tournant une manivelle qui agit sur la crémaillère par l'intermédiaire d'un pignon ;

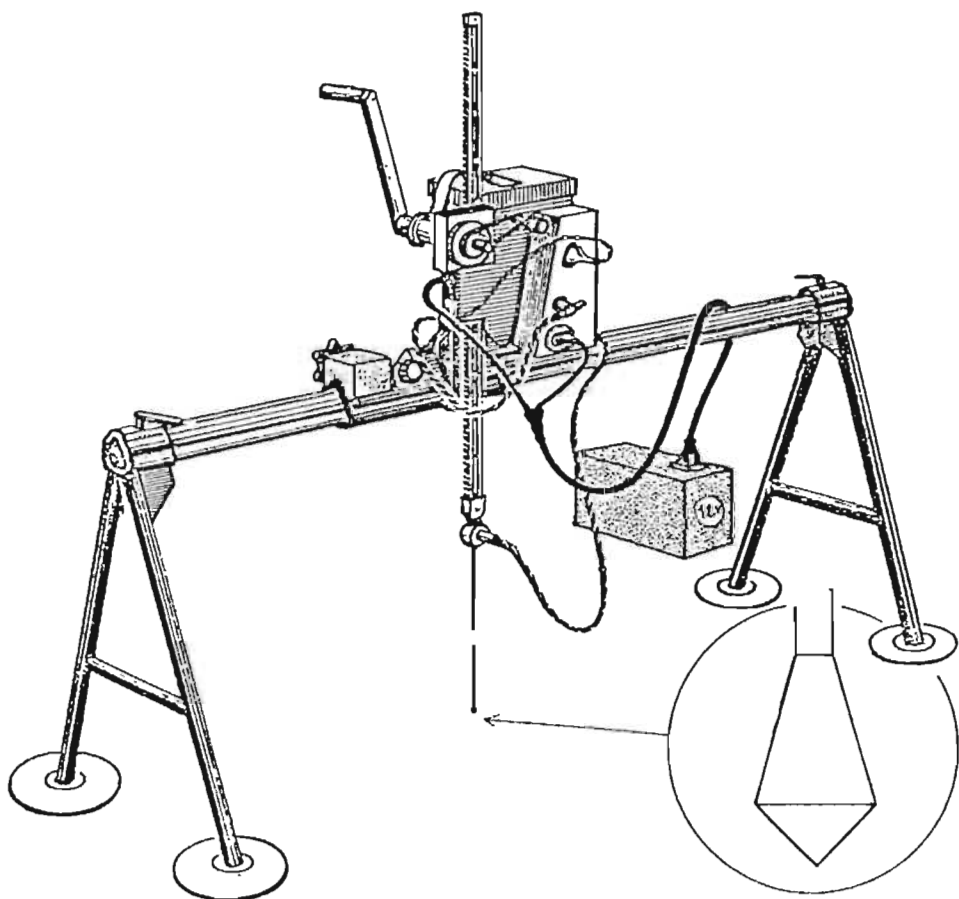


FIGURE III. — Le pénétromètre du CEMAGREF

The CEMAGREF soil penetrometer

— un enregistreur à papier sensible à la chaleur Inscrit, grâce à une plume chauffante, les variations de résistance à la pénétration ressenties au niveau du capteur : le déroulement du papier, commandé par la rotation de la manivelle, est proportionnel à l'enfoncement de la pointe dans le sol.

Une petite batterie de 12 volts alimente l'ensemble, lui assurant une autonomie d'environ 6 heures.

Ce dispositif — monté sur un chariot — peut être déplacé horizontalement sur un rail muni d'une crémaillère.

On peut ainsi enregistrer une série de courbes pénétrométriques selon des verticales régulièrement espacées (tous les 2 cm). (Les observations effectuées sur des coupes de sols, en limon, montrent qu'en sol pas trop sec l'influence latérale de la pointe ne se fait pas sentir à une distance supérieure à un diamètre de pointe de part et d'autre du trou.)

Chaque courbe comporte un niveau de référence (1), une partie verticale de résistance nulle (2) (la pointe n'a pas encore touché le sol) et la partie correspondant au cheminement de la pointe dans le sol (4). Le niveau de la surface (3) est enregistré en même temps (figure IV)

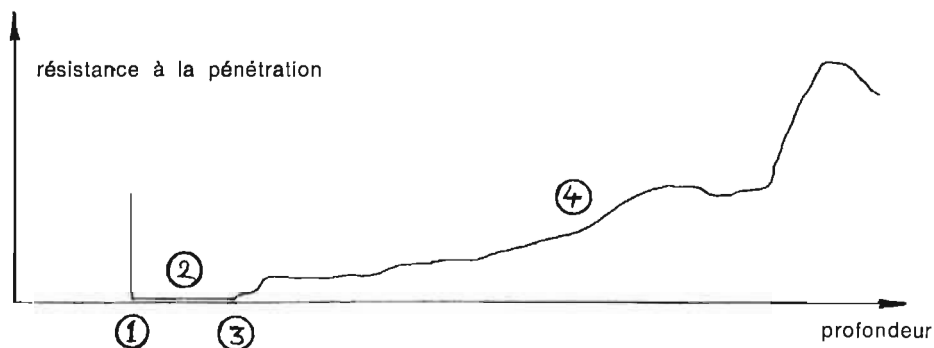


FIGURE IV. — *Courbe pénétrométrique élémentaire - Basic curve*

On déduit de cette série de courbes un relevé précis de la surface et la représentation cartographique, dans le plan vertical contenant tous les trous pratiqués par le pénétromètre, des variations de la résistance du sol à la pénétration.

Le mode de représentation cartographique le plus classiquement utilisé (même s'il aboutit souvent à une idéalisation du rendu) consiste à tracer des lignes isobares. MALLET (1982) l'emploie dans une étude des modifications apportées à l'état physique d'un sol agricole d'Afrique du Sud par la pratique de diverses façons culturales. Il en est de même pour EHLER (1982) quand il analyse l'évolution de la compacité du sol sous l'effet de la sécheresse de 1976 (il s'agit d'ailleurs là de la traduction de l'évolution dans le temps d'une courbe pénétrométrique plutôt que de la cartographie d'un profil cultural) (figure V).

On peut aussi présenter le profil sous forme d'une mosaïque de surfaces élémentaires noircies de manière d'autant plus intense que la résistance à la pénétration est plus élevée dans la zone correspondante du profil cultural. C'est ce mode de représentation que nous avons adopté car il est aisément automatisable et ne nécessite aucune intervention arbitraire de l'opérateur (ou du programmeur) dans le processus de tracé.

Nous utilisons couramment ce pénétromètre lors d'études de l'action des outils de travail du sol et du compactage par les pneumatiques des engins agricoles.

2. Application de la pénétrométrie à l'étude du compactage :

En agriculture, le compactage s'exerce sur un milieu hétérogène — le sol agricole — comprenant des mottes plus ou moins sèches, des zones humides très sensibles et des zones riches en matière organique (paille) enfouie très peu sensibles. Le tassement résiduel est très variable et, à niveau de compactage égal, dépend beaucoup de la structure initiale du sol.

Les figures VI, a et b, relatives à une préparation de lit de semences de betteraves avec des tracteurs équipés de pneus larges ou de pneus jumelés, montrent :

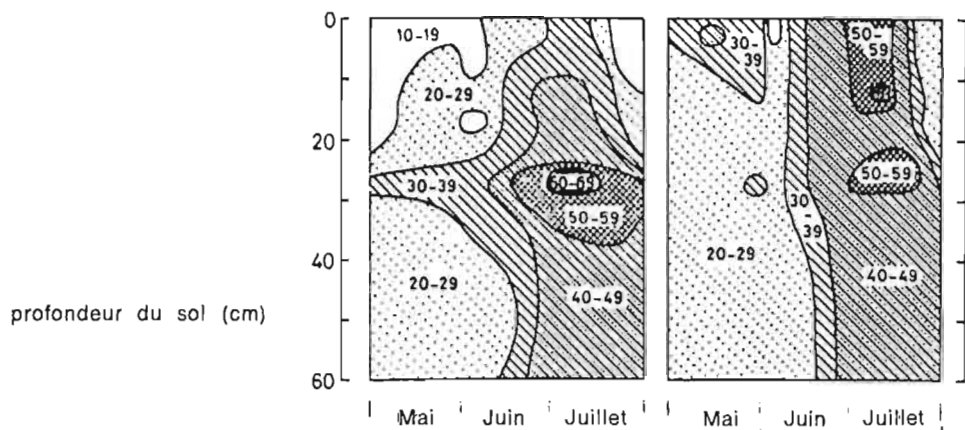


FIGURE V. — Représentation de la résistance à la pénétration en terrain travaillé (a) et non travaillé (b) en 1976 en fonction de la profondeur et du temps (d'après EHLERS, 1982)

Penetrometer soil strength of tilled (a) and untilled soil (b) in 1976 as a function of soil depth and time. From EHLERS (1982)

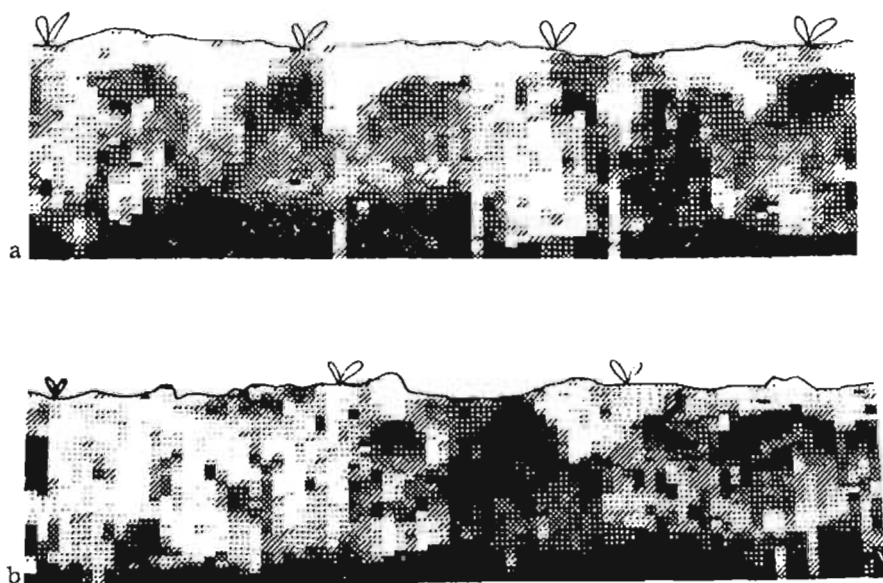


FIGURE VI. — Préparation d'un lit de semence à betterave avec un tracteur équipé de pneus larges (a) ou de roues jumelées (b à droite), deux passages dans chaque cas. Aucun passage en b à gauche

Sugar beet seed bed preparation with tractor large tyres (a) and dual wheel arrangement (b, right), two passes in each case. No pass on b left part

- une influence considérable des « noyaux » du labour dans le compactage par des pneus larges (figure VIa) ;
- une limitation en profondeur du compactage occasionné par les passages de tracteurs lors des préparations superficielles du sol comparé à celui, très profond, dû à la roue d'un appareil de traitement (figure VIb, à droite comparée à cette même figure partie centrale).

Si l'on veut étudier plus finement le compactage provoqué par divers types de pneumatiques, il vaut mieux opérer sur un milieu plus homogène, par exemple un sable argileux légèrement ameubli à grande profondeur. La figure VII, relevé pénétrométrique transversal à l'ornière laissée par le passage d'un pneu large, met en évidence l'action dissymétrique des barrettes (partie gauche).

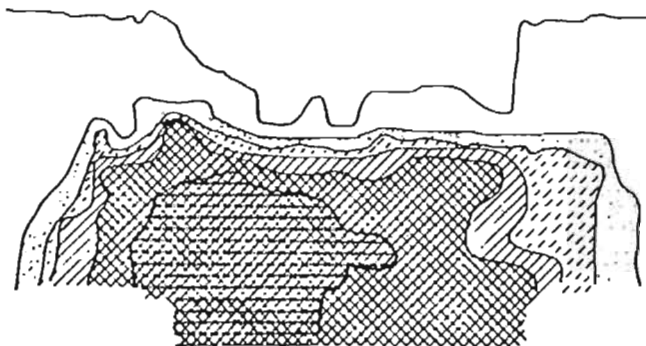


FIGURE VII. — Coupe transversale d'une ornière en milieu homogène

Cross section of a rut in a homogeneous medium

On serait tenté d'interpréter les variations de pression enregistrées au pénétromètre comme un compte rendu fidèle des variations de masse volumique du sol : plus la pression est élevée, plus la masse volumique est élevée et plus fort a été le compactage. Il y a effectivement une relation entre la résistance à la pénétration de la pointe et la masse volumique du sol, mais son humidité intervient aussi pour beaucoup. Ainsi EHLERS (1982) propose-t-il une équation de régression, obtenue à partir de mesures effectuées en sol limoneux travaillé (figure VIII) et non travaillé : $RP = 4,72 H + 162,6 D - 4,61 DH - 173,4$ (coefficient de détermination $R^2 = 0,81$) avec RP résistance à la pénétration en bars,

H humidité en % de matière sèche,

D densité apparente (sans unité).

Il faudrait établir de telles relations pour les divers sols intéressés. Si l'on connaît l'humidité d'un sol, on peut alors déduire la valeur de sa masse volumique d'une mesure de résistance à la pénétration. De même, si l'on utilise la pénétrométrie pour rendre compte des différences de masse volumique dans un profil cultural, il faut opérer dans un sol bien ressuyé, d'humidité la plus homogène possible. MALLET (1982) propose d'effectuer les relevés pénétrométriques lorsque l'ensemble du profil cultural est à la capacité aux champs.

Résistance à la pénétration (bars)

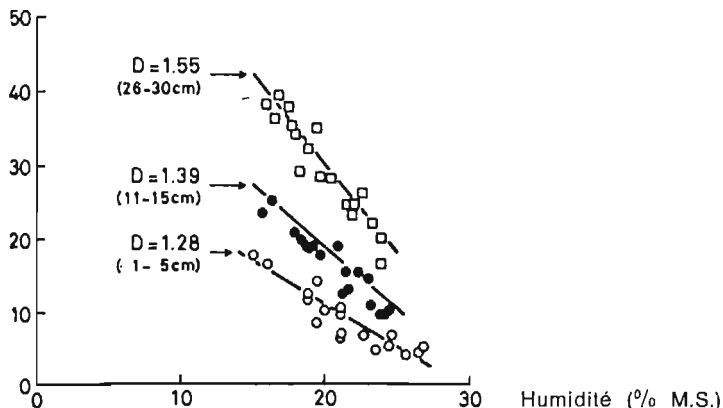


FIGURE VIII. — Valeur de la résistance à la pénétration (RP) comme fonction de l'humidité et de la densité apparente (D) pour trois horizons d'un sol limoneux travaillé. L'horizon 26-30 cm correspond à la « semelle » de labour. D'après EHLERS (1982)

Penetrometer soil strength (RP) as a function of moisture content and bulk density (D) for three layers of a silty tilled soil. On the 26-30 cm layer the presence of a traffic pan is evident. From EHLERS (1982)

3. Application de la pénétrométrie à l'étude de l'action de travail du sol :

On compare des relevés pénétrométriques enregistrés avant et après passage de l'outil. Les figures IX, a et b, montrent le parti que l'on peut tirer de cette méthode pour l'étude de l'action globale d'une herse animée sur un labour.

Au moyen de relevés pénétrométriques, on peut aussi mettre en valeur l'action complexe d'une succession d'outils. Ainsi, la figure X montre-t-elle la coupe d'un lit de semence pour betterave réalisé en sol labouré préalablement sous solé (passage d'une herse animée suivi de celui d'un rouleau crosskill).

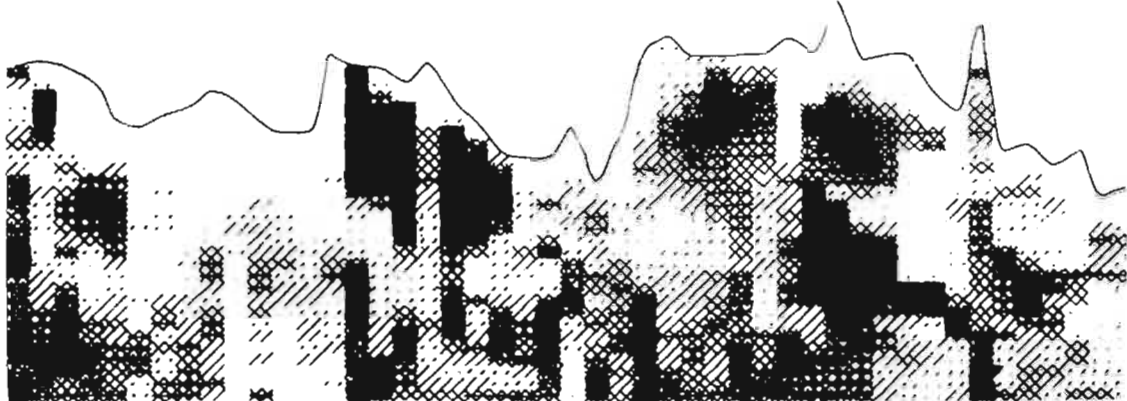
On y voit nettement le fond du labour (localement émietté par la sous-soleuse), la zone intérieure du labour (avec ses bandes de terre inclinées vers la droite), rattachée et l'action du rouleau crosskill sur la couche très creuse laissée par la herse animée : retassement et émiettement d'une couche très superficielle par écrasement des mottes.

Quand les données pénétrométriques sont stockées sur support magnétique, on peut obtenir automatiquement les représentations graphiques (figure XI) et calculer la résistance globale moyenne à la pénétration correspondant à des horizons particuliers du sol ou à des zones homogènes ainsi repérés (ANDERSON *et al.*, 1980, MALLETT, 1982).

CONCLUSION.

La pénétrométrie semble avoir un certain avenir en agronomie. Pas tellement d'ailleurs, pour les possibilités qu'elle offre de caractériser l'état physique du sol par un indice (CI) que parce qu'elle décrit assez bien les micro-hétérogénéités du sol.

FIGURE IX. — Relevés pénétrométriques d'un sol labouré avant (a) et après (b) un passage de herse animée. On voit nettement le fond de labour et sa structure générale. Après passage de la herse (b), on constate un nivelage très net de la surface, un émiettement poussé de la couche superficielle, un relassement général de la partie inférieure du labour sous l'action du poids de la herse et des vibrations engendrées par son mode d'animation



Penetrometer soil strength print-outs of a ploughed soil (cross section) before (a) and after (b) one pass of a p.t.o. driven harrow. We clearly see the general ploughed soil structure and the bottom level on the two drawings. After the tillage work of the harrow we notice a leveling of the soil surface, a crumble of the superficial layer, and a general settling down of the lower part of the ploughed soil caused by the weight of implement and above by vibrations.



50cm

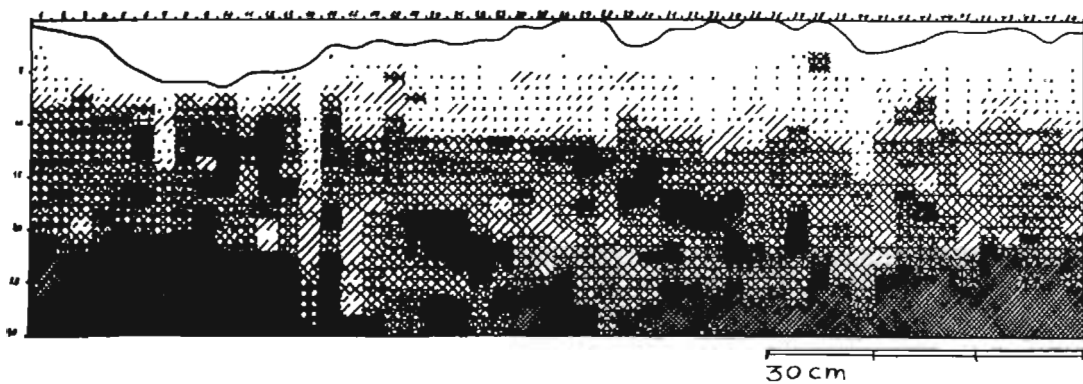


FIGURE X. — *Lit de semence pour betterave préparé avec une combinaison d'outils*

Sugar beet seed bed preparation with combined tillage tools

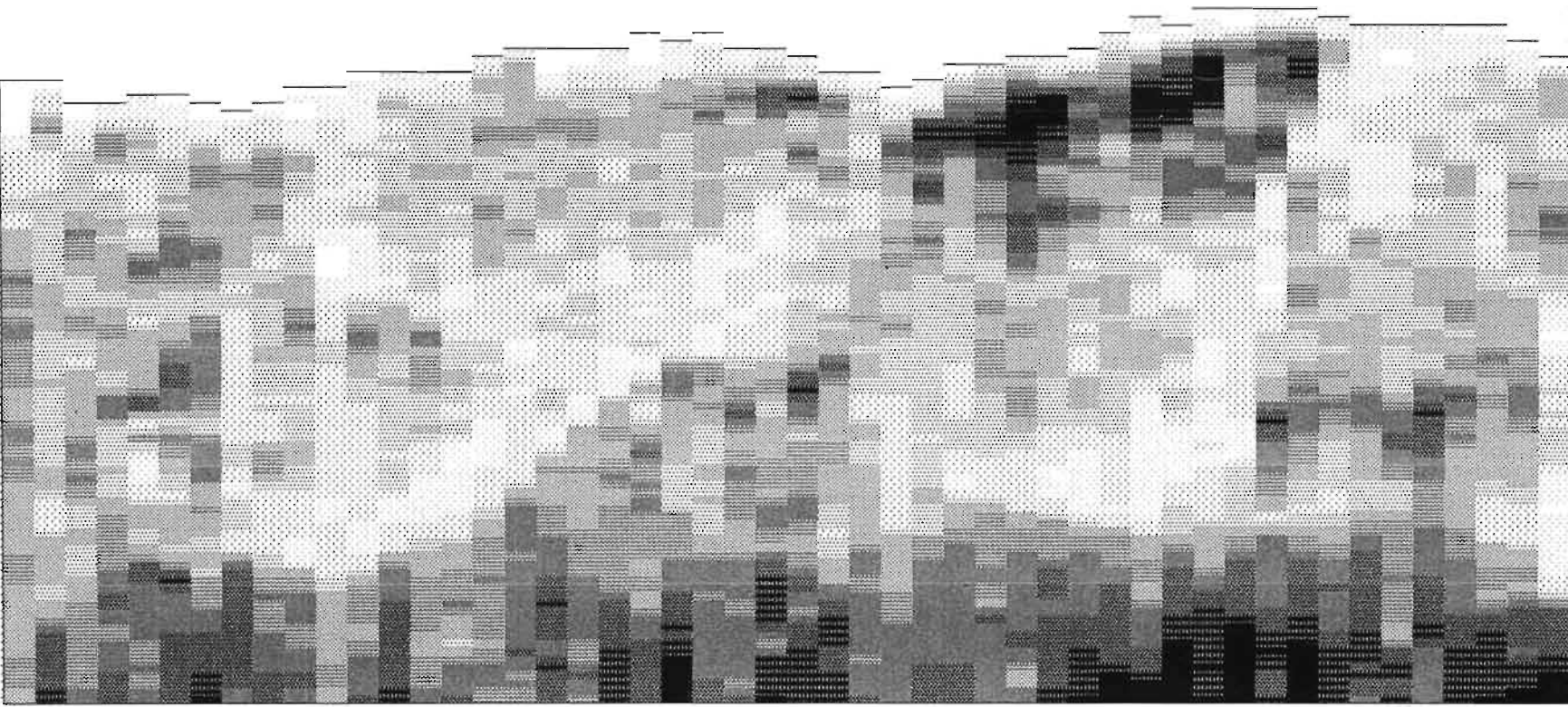


FIGURE XI, — *Représentation graphique automatique à partir de données enregistrées sur un support magnétique (cassettes) : décompaction par un « paraplow » (outil à lames parallèles inclinées à 45°)*

Automatic computer print-out obtained from magnetic tape: decompaction by a paraplow tool (with 45° parallel blades)

Dans cette optique, elle vient compléter la méthode d'observation visuelle du profil cultural décrite par HENIN *et al.* (1969), très utilisée chaque fois que l'on aborde les relations travail du sol — état physique — enraccinement. Elle peut même y suppléer (pour les éléments de description non spécifiquement visuels) lorsqu'il est impossible de pratiquer des tranchées en trop grand nombre — car trop destructives dans des essais en petites parcelles — ou lorsqu'on manque de temps.

Compte tenu du grand nombre de mesures nécessaires, une telle application de la pénétrométrie n'est envisageable qu'avec des pénétromètres entièrement automatisés aussi bien pour la partie « prise de données » sur le terrain que pour le dépouillement et la présentation cartographique des résultats en laboratoire. D'autre part, la possibilité d'obtenir sur le terrain, au moment même de la mesure, une représentation cartographique sommaire du profil cultural éclaire d'un jour nouveau l'étude des outils et techniques de travail du sol ainsi que celle du compactage des sols agricoles. On peut alors placer le lieu de mesure de manière à bien rendre compte du phénomène à observer (limite d'un bulbe de compactage, épaisseur d'une couche émietlée, etc.) en éliminant les phénomènes parasites (traces de roues).

Les données obtenues ont surtout un caractère descriptif, toutefois si les conditions sont favorables — sol d'humidité et de texture homogène —, on pourra aussi tenir compte des données numériques obtenues.

Deux types de sols ne semblent pas convenir à cette application de la pénétrométrie : les sols caillouteux et les sols argileux plastiques.

SUMMARY

AGRONOMIC USES OF PENETROMETERS FOR TILLED SOILS STRUCTURE STUDY

ASAE standard S 313.1 describes a soil cone penetrometer recommended as a measuring device to characterize the penetration resistance of soils, but many different types of penetrometers were used by searchers. Some ones are very simple others more sophisticated and accurate ones. Commonly penetrometers provide an index of general mechanical conditions for a studied soil. As it is quite impossible to deduce mechanical behaviour of an agricultural soil only from penetrometer's data, agronomists are using penetrometers more to obtain relative data than to have soils strength value. Some types of penetrometer are quickly presented, different by their penetration mode and by the cone point aspect. In agronomy they are used as help for decision and in testing field survey.

As we frequently use the S. Henin's observation method of « profil cultural », to study soil structural variations under tillage implement and wheel impact, we decided to operate with a penetrometer to add numerical non subjective data to qualitative descriptions. New methodological perspectives can thus be derived from that approach.

1. MATERIAL AND METHOD.

We use a special electronic recording penetrometer designed and developed at CEMAGREF (Figure III).

From a series of penetration curves (Fig. IV) a precise survey of the soil surface level and the penetration resistance of the different soil layers, is then manually or semi-automatically drawn up on the very vertical plane which bears the cone-made holes.

Different graphical representations may be used: we may connect points of equal pressure, form isobar lines and areas so defined are darkened as pressure increases (figures V and VII) or have a « scanner » type graphical representation (figures VI, X and XI).

2. USE OF GRAPHICAL REPRESENTATION.

When we want to study the soil macro-structure in a test field, we dig a trench and observe the walls after we have revealed such macro-structure with a knife; then we can analyse it. Such an analysis which requires highly qualified observers is often to long and sometimes considered as a subjective method, so research workers are now codifying it. Using our penetrometer we work quickly (half an hour for a 1 m wide soil profile), we don't destroy neither soil structure nor crops and experts are required only for result interpretation and for some complementary trench observations of peculiar places considered as typical and interesting taking the penetrometer data into account (to complete numeric penetrometer data by qualitative informations such as root implantation, presence of polished zones and of asphyxiating areas).

We have used that technique for the last years to carry out different soil studies.

ANALYSIS OF SOIL COMPACTION.

When we try to study in the field the action of different types of tyres on soil compaction, we can see that soil heterogeneity influence on compaction is important (figure VI).

As for as theoretical studies on compaction are concerned we try to work on a homogeneous medium. It should be enticing to read penetration resistance variations directly as soil bulk density changes: more the soil is resistant, bigger is the bulk density and more important is the soil compaction. There is a close connection between penetration resistance and soil compaction but moisture plays an very important part (figure VIII). So when we study compaction variations with a penetrometer, homogeneous moisture conditions are required.

ANALYSIS OF TILLAGE IMPLEMENT EFFECT.

We compare penetrometer graphical data before and after one pass of the implement under study (figure IX, a and b), or analyse the revealed soil profile heterogeneity (figure X et XI).

CONCLUSIONS.

1° An accurate penetrometer may be used in agronomic studies, to objectively show structure heterogeneity of a soil area, using graphical data of numerous regularly spaced penetration resistance versus depth curves.

2° With such a aim, precautions should be taken to carry out measurements in good conditions: homogeneity of soil moisture, neither stony nor adhesive clay soil.

3° The graphical representation obtained may be help full to explain general and particular action of tillage implements upon the soil, and make known the relative intensity and extension of soil compaction.

4° This quick, non destructive method is a valuable one much appreciated by those who carry out comparisons of tillage techniques on plots.

5° On-field automatic analyzing and recording on magnetic tape for further drawing and calculation will increase the interest of the method and related equipment.

Bibliographie

- ANDERSON, PIDGEON, SPENCER, Parks (1980). — A new hand-held recording penetrometer for soil studies : *The Journal of Soil Science*, vol 31, n° 2 : 279-296.
- A.S.A.E. R. 313. I. — Soil cone penetrometer. *Agricultural Engineers Yearbook 1978* : 306-307.
- BAVER L.D. — *Soil Physics*. Edit. John Wiley & Sons, Inc. New York.
- BEKKER M.G. — *Theory of Land Locomotion*. Edit. The University of Michigan Press/ann arbor.
- BILLOT J.-F., PALOMO J., MARIONNEAU A. (1977). — Utilisation d'un pénétromètre enregistreur de précision pour l'étude du tassement du sol par les roues des engins agricoles. *C.N.E.E.M.A. B.I. n° 237* : 47-50.
- BILLOT J.-F. (1982). — Use of penetrometers for showing soil structure heterogeneity, application to study of tillage implement impact and compaction effects : *OSIJEK - Proceedings of the 9th Conference ISTRÖ*.
- DALLEINNE E. (1974). — Le pénétromètre, outil indispensable pour juger un ensemble de façons culturales à l'échelle d'une parcelle. *C.N.E.E.M.A. B.I n° 202* : 41-44.
- HENIN S. (1936). — Quelques résultats obtenus dans l'étude des sols à l'aide de la sonde dynamométrique de Demolon-Hénin. *Soil Research*, vol. 5, n° 1.
- HENIN S., GRAS R., MONNIER G. (1969). — *Le profil cultural*. Edit. Masson & Cie. Paris.
- MALLET J.B. (1982). — Tillage and its effects upon the physical properties of some southern african soil. *OSIJEK - Proceedings of the 9th Conference ISTRÖ*.
- O.S.I., Division Terrestre. — *Documentation*.
- SHAW B.T., HAISE H.R., FARNSWORTH R.B. (1942). — Four year's experience with a soil penetrometer. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 7 : 48-55.