

# Méthodes d'évaluation des comportements structuraux et mécaniques des sols

Gwendal Monnier

► **To cite this version:**

Gwendal Monnier. Méthodes d'évaluation des comportements structuraux et mécaniques des sols. Rapport du Groupe de travail Structure du sol, CEE, 1982. hal-02854469

**HAL Id: hal-02854469**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02854469>**

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.

## MÉTHODES D'ÉVALUATION DES COMPORTEMENTS STRUCTURAUX ET MÉCANIQUES DES SOLS

---

Les méthodes qui font l'objet de ce rapport seront présentées dans le même esprit et avec les mêmes objectifs de présentation critique et d'examen des possibilités de standardisation que celles qui ont fait l'objet du rapport "Méthodes de caractérisation de l'état physique du sol "in situ".

Les comportements étudiés traduisent la réaction des sols et, tout particulièrement, celle des matériaux constitutifs des couches de surface à un ensemble d'actions d'origine climatique ou culturelle :

- Des actions de fragmentation, accompagnées ou non du tri des éléments qui en résultent.
- Des actions de tassement, (roulage, piétinement, pressions exercées par les pièces travaillantes ou par les phénomènes de retrait différentiel).
- Des actions de désagrégation pouvant aller jusqu'à la dispersion des constituants colloïdaux.

Trois principaux groupes de propriétés commandent le comportement des sols vis-à-vis de ces actions.

Les méthodes correspondantes étaient regroupées au chapitre 6 pp. 1 à 90 de "West European Methods for structure determination" 1967, sous le titre général : "Behaviour of Soil under applied forces".

Ce chapitre distinguait :

- La stabilité structurale (aggrégate stability).
- Le comportement vis-à-vis d'actions mécaniques.
- Le comportement vis-à-vis des changements d'humidité (gonflement et retrait, influence du gel).

## I - STABILITÉ STRUCTURALE: (AGGREGATE STABILITY).

En 1967, 26 méthodes avaient été rassemblées ; cette abondance montre l'importance attachée par les laboratoires à cette époque, à ce comportement structural particulier. Elle justifie beaucoup plus que les méthodes de caractérisation d'état, le besoin ressenti d'une certaine standardisation ou, du moins, de l'établissement de termes de passage de l'une à l'autre au niveau des interprétations.

L'analyse de cette variabilité méthodologique fait apparaître que les différences portent principalement sur :

### 1. L'ECHANTILLON QUI EST SOUMIS AU TEST.

C'est là une des différences les plus fondamentales qui traduit deux grands types de conceptions.

- Pour les uns, (SEKERA et SCHNEIDER, De LEEHNEER et De BOODT, SILLANPAA, CZERALYNI .....), l'échantillon soumis au test, l'est dans l'état structural (distribution dimensionnelle des mottes) où il existait sur le terrain au moment du prélèvement. Seul, est intervenu dans la plupart des cas, un séchage à l'air permettant une certaine uniformisation de l'action de l'eau. De tels tests prennent simultanément en compte l'influence de la taille des mottes et les propriétés de stabilité intrinsèques au matériau constitutif. Son résultat est contingent à la situation culturale réelle du sol au moment du test. Sa finalité générale est donc essentiellement la prévision à court terme de l'évolution structurale sous l'action de la pluie (battance des lits de semence).

- Pour les autres, (KOEPPF, TYULIN et SAVVINOV, HENIN et MONNIER, KOENIG, etc...), l'échantillon prélevé est préalablement amené à un état structural standard par tamisage à sec, précédé ou non d'une fragmentation ménagée.

Cette conception privilégie considérablement les propriétés semi-permanentes intrinsèques au matériau (texture, teneur en matières organiques, composition ionique. Les conséquences au niveau de l'utilisation des résultats sont importantes :

A court terme, ces tests permettent d'évaluer des risques de désagrégation davantage qu'une prévision.

A moyen et long terme, ces tests sont plus adaptés que les précédents à la prise en compte d'une évolution des propriétés du sol liées par exemple à une variation de la teneur en matière organique ou de la composition ionique ( $\text{Na}^+$  par exemple). Ils facilitent la comparaison entre sols de constitution différente.

2. LE TRAITEMENT AUQUEL EST SOUMIS L'ECHANTILLON AU COURS DU TEST.

Il est généralement le plus étroitement standardisé que possible, mais sa nature est fort variable.

- Tamisage sous l'eau avec ou sans agitation préalable (technique la plus fréquente).
- Prétraitements avant l'action de l'eau.
- Utilisation de pluies artificielles permettant de prendre en compte l'énergie cinétique des gouttes.
- Utilisation de dispersants modérés.
- Mise en oeuvre d'humectations sous pression.

3. LES CRITERES RETENUS POUR EXPRIMER LE RESULTAT DE LA DESAGREGATION AU COURS DU TEST :

- Distribution dimensionnelle des particules issues du test.
- Dispersion et stabilité des suspensions.
- Accroissement de surface spécifique.
- Mesure de l'évolution d'une propriété liée à l'état d'agrégation (perméabilité par exemple).

4. LES TECHNIQUES ET DISPOSITIFS PERMETTANT D'EVALUER LES CRITERES DE DESAGREGATION :

Tamisage, néphélogéométrie des suspensions, sédimentométrie, etc....

5. L'EXPRESSION DES RESULTATS GENERALEMENT MULTIPLES A L'ISSUE DU TEST ET QUI SONT OU NON REGROUPES DANS UN INDICE UNIQUE.

Cette diversité méthodologique ne provient pas seulement de particularismes de laboratoire qui pourraient théoriquement du moins être réduits grâce à beaucoup de bonne volonté. Elle traduit une diversité difficilement réductible - et qu'il n'est pas nécessairement souhaitable de réduire - de conceptions, de buts poursuivis, de situations pédoclimatiques et (ou) culturelles.

Aussi, semble-t-il préférable à une standardisation illusoire, de rechercher des termes de passages au niveau de l'interprétation du résultat des tests.

Une première proposition pourrait donc être d'organiser une confrontation, non pas des tests eux-mêmes, mais des relations plus ou moins empiriques et formalisées qui existent entre :

1. Les résultats des tests de stabilité, d'une part,
- et 2. Les propriétés de constitution et d'état physique qui commandent le comportement évalué, par exemple : relation stabilité - matières organiques, stabilité - texture, stabilité - composition ionique, stabilité - densité des mottes ou des agrégats.
- ou 3. Les comportements réels observés in situ, tels que par exemple vitesse et intensité d'apparition de la battance en fonction de la pluviométrie.

L'établissement de telles relations toujours plus ou moins empiriques, implique que soient disponibles un minimum de résultats<sup>(1)</sup> obtenus par la méthode considérée. Ceci permettrait de limiter le travail à un plus faible nombre de méthodes.

Une deuxième proposition consisterait à retenir un petit nombre de méthodes de référence (cette qualité n'impliquant aucun jugement de valeur a priori), choisies en fonction des principes qui sont à leur base.

Une vingtaine d'échantillons - répartis dans une gamme de stabilité la plus large possible - pourraient être soumis à ces méthodes de référence et les résultats ainsi que les interprétations qu'ils autorisent, seraient statistiquement comparés. Des expériences partielles de ce genre ont déjà été conduites avec quelque succès (cf. par exemple, la comparaison des méthodes HENIN et MONNIER d'une part, KEMPER, DOUGLAS et GOSS d'autre part, in P. STENGEL, J. DOUGLAS et coll. à paraître dans Soil and tillage Research).

## II - LE COMPORTEMENT VIS-À-VIS D' ACTIONS MÉCANIQUES.

Une douzaine de méthodes seulement avaient été décrites sommairement et proposées dans l'ouvrage méthodologique édité en 1967.

Le plus grand nombre était consacré à la détermination des limites de consistance (limites d'Atterberg). Les autres concernaient des tests de compressibilité, des évaluations de "cohésion" par des essais de compression simple ou de cisaillement, et des essais de résistance à la pénétration in situ.

---

(1) Nombre de déterminations de stabilité structurale (test HENIN et MONNIER), réalisées au Laboratoire d'Analyse des Sols d'Arras en France, au cours des dernières années.

1979 → 1.100

1980 → 900

1981 → 1.250

1982 → 1.600

(Evaluation au 30.06.82).

En définitive, un petit nombre de laboratoires réalisant chacun un seul type d'essai de mécanique des sols, telle était la situation en 1967.

Depuis cette époque, on a pu constater une perception plus aiguë des risques encourus par les sols cultivés en matière de tassement notamment, perception facilitée par l'accroissement de ces risques (poids accrus des matériels de culture de traitement et de récolte, simplification des successions culturales impliquant souvent la multiplication des roulages en conditions défavorables).

Parallèlement, des principes de mesure ont été adaptés, ou sont en cours d'adaptation; à la mécanique des sols agricoles à partir de données fournies par les Laboratoires de Mécanique des Sols théoriques ou appliquées au génie civil.

En fait, de nombreux problèmes demeurent, pour l'essentiel, liées au fait, que les sols agricoles et, notamment, les couches de surface ne peuvent que difficilement être assimilés à des milieux continus, isotropes et homogènes.

Il n'en demeure pas moins que les progrès réalisés permettent désormais de considérer un ensemble de mesures - et non plus seulement de tests - dont les résultats peuvent, au moins partiellement, être interprétés en termes de déformation du sol in situ, en prenant en compte un ensemble cohérent de paramètres liés à l'état physique (densité), à l'humidité et (ou) au potentiel hydrique, et au niveau d'énergie (pression appliquée par exemple).

#### 1. APPRECIATION DES LIMITES DE CONSISTANCE.

(Limites de plasticité et de liquidité).

a) Les tests d'Atterberg présentent l'avantage d'être d'une mise en oeuvre peu onéreuse, ne nécessitant que peu d'appareillage spécialisé. De ce fait, leur emploi peut être à la fois standardisé et généralisé. Toutefois, ces tests présentent des limites importantes :

- Le niveau d'énergie mis en oeuvre est faible. (C'est ainsi que la limite de liquidité à la coupelle a une énergie cinétique équivalente à  $20 \text{ g} \times \text{cm} / \text{cm}^3$ , 50 à 100 fois plus faible que celles mises en oeuvre en moyenne lors des roulages agricoles par exemple).

- Le niveau d'énergie est différent aux deux bornes (plasticité et liquidité) au domaine de plasticité.

Aussi, doit-on considérer ces tests comme des indicateurs relatifs de comportement mécanique permettant essentiellement des comparaisons de constitution. C'est d'ailleurs ainsi que les utilisent les Ingénieurs du Génie Civil.

b) On peut, par contre, interpréter les courbes densité-humidité tirées des essais Proctor et oedométriques pour évaluer les deux limites de consistance à un même niveau d'énergie choisi à l'avance.

## 2. COMPORTEMENT AU COMPACTAGE.

Les essais applicables à la mécanique des sols agricoles relèvent de deux catégories principales.

### a) Les essais de compactage dynamique.

Le plus connu est l'essai "Proctor". Son avantage est qu'il est facile à mettre en oeuvre, et ne nécessite pas de matériel spécialisé coûteux. Il est très adapté à l'évaluation indirecte des limites de consistance. (cf. ci-dessus).

Par contre, il a l'inconvénient d'être dynamique, de fournir des éprouvettes tassées hétérogènes. Surtout, il est difficile de faire varier le niveau d'énergie de façon univoque, puisqu'on peut jouer sur le poids de la dame, le nombre de coups et la hauteur de chute. Enfin, il ne permet pas l'étude cinétique du compactage (influence de la durée d'application de la force), ni celle des phénomènes de relaxation et de recouvrance et, en particulier, du rôle important des matières organiques à cet égard.

### b) Les essais de compressibilité statique.

Ils sont "a contrario" beaucoup plus adaptés aux problèmes de mécanique des sols. Ils permettent en outre de travailler en consolidation et d'étudier de façon précise l'état physique résultant d'un compactage et de comparer de façon univoque l'action de deux niveaux d'énergie (pression appliquée et durée d'application). Son inconvénient est la nécessité de disposer d'appareillages spécialisés assez coûteux.

## 3. MESURES DES CARACTERISTIQUES MECANIQUES INTRINSEQUES.

(Cohésion et angle de frottement interne).

Elles sont basées sur l'établissement de la Droite de Coulomb, par essai triaxial ou par essai de cisaillement à la boîte de Casagrande avec leurs deux variantes à charge ou à vitesse de cisaillement imposées.

Il apparaît clairement désormais que ces méthodes de base sont des outils précieux pour l'analyse de l'évolution des comportements mécaniques en fonction de l'utilisation agricole des sols et de ses conséquences sur la teneur en matières organiques et les tassements profonds peu ou pas réversibles notamment.

Dans ce domaine également, une coordination des recherches méthodologiques permettrait de choisir en commun les essais de base, dont la standardisation serait alors très grandement facilitée.

#### 4. MESURES DE RESISTANCE MECANIQUE A LA PENETRATION - PENETROMETRIE.

Schématiquement ces méthodes sont utilisables dans deux optiques très différentes :

- On peut d'abord les considérer comme un test global permettant de prévoir, à l'aide de relations empiriques, les possibilités d'enracinement ou de travail du sol elles-mêmes liées à l'ensemble : "état d'ameublissement-humidité".

- On peut aussi les considérer comme un moyen de détection qualitative de zones tassées (profondeur et largeur, forme des joues déformées, à l'occasion d'un roulage par exemple), préalablement à des mesures de densité in situ ou à des prélèvements, dont l'échantillonnage pertinent est très facilité.

Le nombre élevé des mesures nécessaires dans l'un et l'autre cas, rend indispensable le recours aux matériels de pénétrométrie à acquisition et traitement de données désormais disponibles.

#### 5. ESSAIS DE PORTANCE, DE TRAFICABILITE ET DE "WORKABILITY" IN SITU.

Nous les citons pour mémoire, car leur emploi relève d'une thématique assez spécialisée, dont toutefois l'intérêt dans le domaine d'étude de la dégradation des sols et de la diminution des jours disponibles qu'elle est susceptible d'entraîner, peut être très important.

### III - COMPORTEMENT VIS-À-VIS DES CHANGEMENTS D'HUMIDITÉ (GONFLEMENT - RETRAIT).

Malgré l'importance à maints égards de ce groupe de comportements, une seule méthode d'évaluation directe du gonflement était présentée par KUIPERS dans l'ouvrage méthodologique de 1967.

Le problème n'est pas donc ici d'aboutir à une analyse critique et à une éventuelle standardisation des méthodes existantes, mais plutôt d'envisager les buts à atteindre et les recherches méthodologiques à entreprendre pour y parvenir.

1. Connaissance des variations de l'état physique en fonction de l'humidité.

Il s'agit essentiellement des techniques d'établissement des courbes de gonflement-retrait sur des agrégats naturels de sols.

Les données correspondantes : masse volumique - teneur en eau, sont en effet indispensables à l'analyse sommaire de la porosité (système structural versus système textural) et à la prévision de l'évolution à court terme d'un état structural à teneur en eau variable.

Les problèmes posés sont du point de vue technique :

- Mesures précises du volume d'agrégats à différentes teneurs en eau. (cf. rapport Caractérisation de l'état physique).

- Prise en compte de l'éventuel caractère hystérétique des phénomènes de gonflement-retrait pour certains sols (matériaux très humifères).

- Mise au point d'une procédure non désagrégeante d'humectation et de dessiccation.

2. Prévision de l'aptitude à la fissuration. (Volume total de fissures).

A partir du même type de données, il s'agit de prévoir l'amplitude de gonflement-retrait dans un intervalle de potentiel hydrique, dont les limites inférieures et supérieures dépendent du régime hydrique prévisible des différentes couches du sol.

3. Prévision de la maille de fissuration.

Si l'on sait que les caractérisations hydriques et mécaniques, ainsi que le régime hydrique à l'humectation et à la dessiccation interviennent, on est actuellement dépourvu de bases suffisamment établies pour concevoir une méthode d'appréciation.

## CONCLUSIONS

Les comportements rapportés ici participent tous à des processus de dégradation ou de régénération de l'état physique.

L'inventaire des méthodes disponibles en 1967 pour leur évaluation, fait apparaître deux types de situation fort différente.

1. En ce qui concerne les comportements vis-à-vis de la désagrégation (tests de stabilité structurale ou de stabilité d'agrégats), les principes d'évaluation et les modes opératoires proposés sont très nombreux et très variables.

La standardisation nous paraît un objectif irréaliste, ne serait-ce que parce que les normes d'interprétation ne résisteraient pas à une modification de la méthode.

Aussi, peut-on se borner à deux propositions :

- Rechercher des moyens de passage entre les principaux types de tests mis en oeuvre.

- Choisir un petit nombre (2 ou 3) méthodes de référence dont l'emploi pourrait être généralisé et fournirait des points de repère permettant ainsi de situer les résultats obtenus par les méthodes propres à chaque laboratoire.

2. A l'opposé, dans le cas des comportements vis-à-vis des actions mécaniques et des variations d'humidité (gonflement et retrait), le problème est plutôt de rechercher une coordination des énormes progrès méthodologiques qui restent à faire.

Avignon, Juillet 1982

G. MONNIER