

# La stabilité de la structure du sol

## Originalité et actualité de l'approche de Stéphane Hénin

*Gérard Monnier*

*Directeur de recherches Inra (Avignon)*

*Jean Boiffin*

*Directeur de recherches Inra (Laon)*

Fondateur de la physique du sol en France et principal inspirateur des travaux sur la structure du sol au cours des dernières décennies, S. Hénin a produit une œuvre considérable de recherche et d'enseignement dans cette discipline.

De cet ensemble, on peut dégager deux thèmes, abordés dès le début de sa carrière : la stabilité structurale puis, par un enchaînement sur lequel nous reviendrons, le statut organique des sols et ses conséquences physiques, qui apparaissent particulièrement représentatifs de l'approche qu'il a eue de problèmes d'autant plus difficiles qu'ils étaient à l'époque mal définis.

Ces deux axes ont un intérêt scientifique commun : ils portent sur des propriétés et des constituants qui illustrent le caractère fondamentalement dynamique du sol.

Par ailleurs, la réunion de ces thèmes débouche sur la connaissance et les possibilités d'amélioration de comportements du sol, d'une importance très actuelle dans les domaines de l'agronomie et de la protection de l'environnement.

C'est donc à partir de travaux relevant de cet ensemble que nous nous efforcerons de montrer l'originalité des démarches de S. Hénin, le caractère fondamental de ses contributions théoriques et méthodologiques, puis de mettre en évidence leur influence sur les développements actuels des recherches en physique du sol.

## Les mécanismes de désagrégation

Au début des années 30, la physique du sol mondiale se cherchait autour d'une conception de la structure fondée sur l'existence, alors majoritairement admise, d'unités élémentaires et permanentes d'agrégation. L'« analyse d'agrégats » avait pour objectif de séparer ces particules complexes et d'en déterminer la distribution dimensionnelle. Les procédures utilisées à cette fin s'inspiraient de celles mises en œuvre dans l'analyse granulométrique des particules élémentaires (argile, limons,

sables), mais en excluant la destruction des ciments ou revêtements organiques et la dispersion par traitement physico-chimique des colloïdes minéraux. Appliquées à un échantillon de particules terreuses, ces « analyses » permettaient de distinguer des agrégats qualifiés d'absolus par Pigulevski ou de vrais par Demolon, ou plus simplement de stables, par opposition aux agrégats respectivement conditionnels ou faux ou instables, selon qu'ils résistaient ou non à des actions mécaniques ou physico-chimiques considérées comme modérées, par opposition à celles appliquées dans la préparation de l'échantillon à l'analyse granulométrique proprement dite (HÉNIN, 1934).

Les limites de ce type d'approche apparaissaient à ceux-là même qui les pratiquaient : les résultats et la signification de l'analyse d'agrégats étaient liés aux méthodes mises en œuvre. De façon corollaire, les particules complexes isolées ont été progressivement appréhendées, moins comme le produit d'un processus d'agrégation que comme la résultante des opérations de destruction réalisées au cours du protocole et, finalement, comme l'expression de la résistance de la terre aux actions de désagrégation par l'eau, c'est-à-dire de sa stabilité structurale. Deux voies s'offraient alors.

La première voie consistait à rechercher des procédures satisfaisant à des critères de sensibilité et de reproductibilité des résultats du test. Cette orientation pragmatique a été suivie par de nombreux laboratoires ; elle a entraîné une prolifération de méthodes – 26 ont pu être répertoriées en 1967 pour la seule Europe de l'Ouest – différant notamment sur trois points essentiels : le degré de fragmentation de l'échantillon initial soumis au test, son niveau de dessiccation et les modalités d'action de l'eau. Au-delà des particularismes de laboratoire, une telle multiplicité de méthodes traduit une diversité de conceptions, d'objectifs et de situations pédoclimatiques et culturelles, difficilement réductible en l'absence d'une théorie englobant les différentes actions intervenant dans les processus de désagrégation par l'eau.

C'est précisément la recherche d'une explication générale de la désagrégation qui constituait la seconde voie et que S. Hénin s'est donné comme objectif.

Deux hypothèses avaient alors été avancées. Dès 1885, SCHLOESING accordait un rôle déterminant à la dispersion des ciments assurant l'agglomération des particules du squelette limono-sableux. Cette hypothèse correspondait bien au comportement comparé des terres sodiques et calciques, mais elle rendait moins aisément compte de l'action d'autres facteurs tels que les matières organiques. Surtout, elle conduisait dans de nombreux cas à des contradictions avec des comportements observés au champ : désagrégation très poussée sans apparition de phase dispersée pour de nombreux matériaux terreux et/ou certaines modalités d'action de l'eau.

D'autres auteurs, dont YODER (1936), ont alors expliqué la désagrégation par la compression, au cours de l'humectation, de l'air inclus dans l'espace poral des assemblages terreux. Dans son mémoire de thèse publié en 1938, HÉNIN a analysé les mécanismes impliqués par cette hypothèse et en a tiré les conséquences vis-à-vis du processus de désagrégation.

La stabilité d'un assemblage résulte du niveau comparé de deux termes : les contraintes qui se développent dans l'agglomérat sous l'action des forces capillaires comprimant l'atmosphère interne, la résistance qui leur est opposée, provenant des liaisons interparticulaires, variables avec le degré d'hydratation.

En explicitant les tensions qui déterminent l'angle de raccordement sol-eau et en extrapolant à la phase solide certaines formulations vérifiées dans le cas des liquides,

S. Hénin a construit une typologie faisant correspondre aux différentes conditions physico-chimiques théoriquement possibles la réalisation ou non des phénomènes d'éclatement et/ou de dispersion entraînant l'instabilité ou la stabilité des assemblages.

A défaut d'une vérification directe des hypothèses sur lesquelles repose cette typologie, S. Hénin puis plusieurs de ses collaborateurs ont confronté les conséquences de la théorie qui la fonde à de nombreuses observations et données expérimentales. Le niveau de stabilité est évalué simplement en mesurant le taux de particules conservant une dimension minimale (200  $\mu\text{m}$ ) à l'issue des traitements appliqués. Cet indicateur permet de confronter le sens et l'ampleur des variations de stabilité qu'il exprime aux conséquences théoriques de variations des conditions physico-chimiques d'humectation induites par les traitements comparés.

Nous nous limiterons ici à quelques éléments de validation fournis par cette démarche.

Les données du tableau I permettent d'évaluer l'importance de l'air inclus dans l'agglomérat en comparant les résultats de stabilité obtenus par humectation à la pression atmosphérique et sous vide.

Tableau I. Influence de la pression de l'air lors de l'humectation sur le taux d'agrégats stables (> 200  $\mu\text{m}$ ).

Nature de la terre	Echantillon humecté	
	A la pression atmosphérique	Sous vide
Limon argileux (sous-sol)	18,0	76,0
Limon moyen $\text{Ca}^{++}$ (sol)	20,0	62,5
Terre argilo-calcaire (sol)	50,0	71,0
Limon sodique (sol)	2,0	9,0

On constate bien un accroissement très marqué de stabilité sous vide. Ce résultat est obtenu dans tous les cas étudiés. Il est toutefois particulièrement sensible dans le cas du sous-sol et plus faible dans le cas d'un limon partiellement saturé en sodium échangeable.

L'importance du rôle actif de l'air piégé dans le mécanisme d'éclatement qui apparaît ici a également été mise en évidence par S. Hénin en procédant à des imbibitions ménagées, dans le but de limiter le volume d'air inclus et/ou de faciliter son échappement au cours de l'humectation.

Mais la voie la plus originale proposée, pour la vérification expérimentale du rôle des conditions physico-chimiques dans la désagrégation, a consisté en l'imbibition des fragments terreux par des liquides organiques préalablement à leur mise au contact de l'eau.

Dans le cas de liquides miscibles à l'eau en toutes proportions, comme l'alcool éthylique, le prétraitement revient à chasser l'air sans éclatement, du fait d'une baisse limitée de la cohésion des ciments en présence d'alcool. La pénétration ultérieure de l'eau n'exerce aucune pression ; seule la cohésion baisse dans le système au fur et à mesure qu'il s'hydrate. La stabilité ne dépend, dans ces conditions, que de la résistance opposée à l'état humide aux actions mécaniques

liées à la procédure opératoire. Le mécanisme de protection par ce type de prétraitement s'apparente étroitement à une humectation sous vide ou à une présaturation par une imbibition ménagée.

Dans le cas de liquides non miscibles à l'eau et non fixés par les constituants minéraux, comme le benzène, deux situations peuvent se présenter :

- en l'absence de matière organique, l'apport d'eau aux agglomérats prétraités provoque un éclatement immédiat et intense du fait de la conjonction de l'incompressibilité de la phase liquide qui sature l'espace poral, du maintien de l'affinité pour l'eau des surfaces solides et de la baisse brutale de cohésion d'un système immédiatement hydraté ;

- lorsque les parois des pores sont revêtues de composés organiques affines pour le liquide de prétraitement, le film de benzène formé accentue fortement le caractère hydrophobe des surfaces, avec pour conséquence la diminution voire l'annulation des forces exercées par les ménisques d'eau.

En bref, le premier type de prétraitement diminue ou annule dans tous les cas le terme « pression interne » dans le processus de désagrégation ; la stabilité ne dépend alors que de la résistance des liaisons interparticulaires au sein du système hydraté aux actions mécaniques subies par les fragments saturés. Le second, en interaction avec les propriétés de surface de la phase solide, en accentue les conséquences ; il pourra de ce fait fournir un indicateur sensible de l'influence des revêtements hydrophobes organiques ou organo-minéraux sur le comportement des matériaux terreux.

Les données rassemblées dans le tableau II illustrent le parti que l'on peut tirer de la mise en œuvre conjointe de ces prétraitements dans l'analyse des facteurs principaux du comportement à la désagrégation de sols à constitution minérale organique et ionique contrastée.

Les matériaux qui, tel l'échantillon n° 1, ont simultanément une cohésion à l'état humide très élevée et une mouillabilité faible sont très stables en conditions naturelles et réagissent peu aux prétraitements.

Tableau II. Comportement comparé de différents types de matériaux pédologiques sous l'influence de prétraitements par des liquides organiques.

Nature des échantillons	Propriétés liées à la constitution	Taux (%) d'agrégats stables (> 200 µm)		
		Sans prétraitement	Alcool éthylique	Benzène
Sol argilo-humique sur alluvion (1)	Cohésion élevée à l'état humide, difficilement mouillable	76,5	79,0	68,1
Horizon B fersiallitique (2)	Cohésion élevée à l'état humide, aisément mouillable	73,2	77,1	0,3
Horizon profond argileux (landes de Gascogne) (3)	Cohésion faible à l'état humide, aisément mouillable	2,3	47,6	0,7
Marne du plaisancien partiellement sodique (4)	Cohésion nulle à l'état humide, aisément mouillable	0,7	1,5	0,4

Les matériaux cohérents, mais aisément mouillables parce que pauvres en matières organiques, ne se distinguent des précédents que par une désagrégation intense en présence de benzène, en dépit du maintien à un niveau élevé de leur cohésion humide, assurée ici par les ciments à base d'oxydes de fer (échantillon n° 2).

Certaines argiles ou argiles marneuses ont, du fait de leur nature minéralogique, une cohésion humide trop faible pour résister au phénomène d'éclatement : la suppression de ce dernier par le prétraitement à l'alcool éthylique limite fortement leur désagrégation.

Le cas des matériaux sodiques représentés ici par le comportement de l'échantillon n° 4 mérite un commentaire particulier. On constate, en effet, qu'en présence de sodium échangeable la limitation et même la suppression du phénomène d'éclatement ne modifient pas ou très peu (tabl. I) le taux d'agrégats stables, qui reste très faible. Dans ce cas, en effet, la seule agitation, même ménagée dans l'eau, provoque une dispersion suffisante des ciments argileux pour que les assemblages se disloquent : l'explication de Schloesing suffit alors, quelles que soient les autres caractéristiques du matériau.

On est amené à ce propos à discuter la nature de la cohésion qui intervient dans les deux types de processus. Dans l'un et l'autre, il s'agit d'une propriété à l'état humide. En l'absence de cations alcalins, les liaisons entre particules d'argiles responsables de la cohésion des assemblages diminuent au fur et à mesure de l'hydratation et du gonflement du système mais ne s'annulent pas. La résistance des fragments tend vers une valeur plancher, fonction du taux, de la nature et de la disposition des constituants argileux et des ciments organiques et minéraux ; elle peut conserver un niveau suffisant, dans le cas de certaines terres argileuses et/ou riches en oxydes de fer, pour limiter la désagrégation.

En présence de sodium ou de potassium échangeables en quantité suffisante (plus de 10 % de la capacité d'échange en cations, en ordre de grandeur), le gonflement à l'hydratation se poursuit jusqu'à l'annulation des liaisons entre particules argileuses : il y a dispersion. La cohésion de la phase argileuse elle-même s'annule, entraînant une dislocation complète des assemblages et rendant possible la ségrégation des particules élémentaires. Ainsi, l'hypothèse de Schloesing n'apparaît pas comme un mécanisme en soi, mais comme une modalité particulière d'un processus plus général. Les conditions dans lesquelles cette modalité de désagrégation prévaut expliquent l'importance déterminante que lui attribuent les laboratoires étudiant l'influence des cations sur le comportement des minéraux argileux et ceux qui s'intéressent au comportement des sols salés et/ou sodiques.

Ce travail d'analyse et de théorisation de S. Hénin a été prolongé sous sa direction par CONCARET. Cet auteur, dans un mémoire publié en 1967, reprend l'analyse de l'influence sur la désagrégation des conditions d'établissement de la pression interne de l'air au sein d'un agglomérat terreux. Il met en avant l'importance de la vitesse d'avancement des ménisques qui, en relation avec l'architecture des assemblages, détermine la quantité d'air piégée et sa mise en pression. Il vérifie le bien-fondé de cette explication en évaluant la stabilité dans des solutions de viscosité variable. Ce travail vient donc confirmer et compléter, en lui conférant une dimension dynamique explicite, la théorie de la désagrégation de S. Hénin.

# Méthode d'évaluation du comportement des sols

C'est en s'appuyant sur les acquis exposés ci-dessus que S. Hénin a élaboré dans les années 50 une méthode originale d'évaluation de la stabilité structurale.

Il en présente les principes en 1955. En 1956, devant le sixième congrès de l'AISS, il décrit et justifie les modalités de leur mise en œuvre dans un ensemble de tests – il ne s'agit plus d'analyses d'agrégats mais de tests de comportement – et propose deux indices synthétiques complémentaires permettant le classement des matériaux en accord avec leur comportement comparé observé *in situ* (HÉNIN et MONNIER, 1956).

La méthode, qui a bénéficié d'une amélioration technique (FEODOROFF, 1960) facilitant son utilisation en routine, a été, et est encore aujourd'hui, utilisée par de nombreux laboratoires français et étrangers. Elle est suffisamment connue pour qu'il soit possible de se limiter à un commentaire sur ses caractéristiques principales et sur ses domaines d'application.

L'échantillon soumis aux différents tests est préalablement séché et fragmenté de façon standardisée. De ce fait, le résultat est peu dépendant de l'état structural et hydrique lié à la date et au point de prélèvement. La méthode évalue un comportement intrinsèque du matériau et ceci a des conséquences importantes quant à l'utilisation qui peut être faite des résultats :

- évaluation d'un niveau moyen de risque de désagrégation plutôt que paramétrage d'un modèle d'évolution structurale ;

- adaptation à l'étude de l'influence de la constitution des sols et de son évolution : classement de matériaux de composition différente ; évolution à moyen et long terme du comportement des sols sous l'influence du système de culture.

La méthode comporte la mise en œuvre d'une série de tamisages sous l'eau précédés ou non par des prétraitements par des liquides organiques. Ceci permet, comme on l'a vu précédemment, de nuancer l'action de l'eau pour obtenir une évaluation sensible et discriminante dans toute la gamme de variation des facteurs qui modifient la stabilité.

Les résultats de cette première série de tests sont combinés dans un indice unique dont la construction a été calée sur des comparaisons d'évolutions structurales observées *in situ*. L'aptitude de cet outil à rendre compte de comportements particuliers, allant de la stabilité des drains taupes à l'érosion de versants, en passant par de nombreuses propriétés plus globales d'un grand intérêt agronomique, a été montrée par de nombreux auteurs, notamment HÉNIN et FEODOROFF (1958), GRAS (1961), PERIGAUD (1963), BOYER et COMBEAU (1960), MONNIER (1965), TOUTAIN (1970), dans des situations pédoclimatiques et culturelles variées. Cet indice et cet ensemble de travaux ont permis d'établir une grille d'interprétation en termes de risques (MONNIER *et al.*, 1982).

Indépendamment de cette interprétation globale, la prise en considération de chacun des tests autorise une analyse plus poussée de l'importance relative des différents facteurs et conditions de stabilité. Nous avons mentionné plus haut la relation entre l'action du prétraitement à l'alcool éthylique et la cohésion de la terre humide et entre celle du prétraitement au benzène et la mouillabilité. Ces performances ont permis de rechercher des explications aux relations empiriques entre stabilité structurale et constitution physique des sols ; nous y reviendrons plus loin en prenant comme exemple le rôle des matières organiques.

La panoplie méthodologique proposée par S. Hénin comporte enfin un test destiné à extérioriser les conséquences de la force ionique de la solution du sol sur le gonflement de l'argile et sa cohésion à l'état humide. L'effet protecteur lié à la présence, à de faibles concentrations, de sels peu solubles n'apparaît pas aux dilutions correspondant aux tamisages sous l'eau. La mesure de percolation préconisée parvient dans de nombreux cas (terres plâtrées ou surchaulées) à rendre compte au laboratoire de modifications de comportements manifestes sur le terrain. Les résultats sont cependant irréguliers et leur interprétation malaisée en raison des diverses transformations à cinétiques différentes et à conséquences contradictoires que subit le massif au cours de sa mise en place et pendant la période de percolation. Ces difficultés sont probablement responsables du moindre intérêt accordé en France, jusqu'à une période récente, à l'utilisation de ce test pour rendre compte de l'action des amendements calciques.

## **Influence des matières organiques sur la stabilité structurale**

L'action sur la structure des sols de cet ensemble hétérogène de constituants a été longtemps et est encore fréquemment envisagée comme relevant d'un processus particulier de formation des sols : l'agrégation. Dans cette conception, les substances organiques présentes dans le sol jouent un rôle de liant entre les constituants minéraux et participent directement à la formation d'éléments structuraux – mottes ou agrégats – relativement stables à l'eau. La synthèse bibliographique établie par KONONOVA (1961) sur ce sujet ne fait état que de cette fonction de cimentation des matières organiques, sans que les travaux disponibles à cette époque lui permettent d'en préciser les mécanismes.

L'approche théorique de la stabilité structurale amène à distinguer les notions d'agrégation et de stabilisation des ensembles agrégés. Elle conduit à considérer plus particulièrement le rôle des matières organiques dans les propriétés de surface des particules, dont elles diminuent fréquemment l'affinité pour l'eau.

A l'aide des prétraitements qu'il a proposés, S. Hénin a pu apprécier l'importance relative de ces deux mécanismes de stabilisation ; dès ses premiers travaux, il a montré que l'abaissement de mouillabilité était, pour les cas étudiés, le principal responsable des accroissements de stabilité enregistrés en présence de matières organiques. Ce mode d'action lui suggère très tôt que la localisation des substances organiques hydrophobes en différentes situations à la périphérie ou au sein des agrégats doit influencer sur leur efficacité. Les abaissements considérables de mouillabilité qu'il observe pour des apports faibles de matière organique et l'influence à cet égard des modalités d'apport et de fixation l'amènent, dès 1944, à expliquer cet ensemble de résultats par la disposition des substances organiques les plus actives sous forme d'enduits à la périphérie des agrégats.

Par la suite, l'importance de la localisation – considérée à différents niveaux d'organisation – des matières organiques pour la stabilité structurale a été confirmée et précisée (MONNIER, 1965) et cette conclusion a été étendue à d'autres propriétés physiques ou mécaniques (GUERIF, 1979).

D'autres résultats obtenus à la même époque ont permis à S. Hénin d'ouvrir une deuxième voie fructueuse. Les accroissements remarquables de stabilité enregistrés

après incubation du sol en présence de glucose le conduisent à mettre en cause dans la diminution de mouillabilité observée la biomasse microbienne développée sur ce substrat énergétique. De nombreuses recherches seront développées dans cette direction. Conduites au laboratoire ou sur le terrain et à différentes échelles de temps, elles confirmeront l'efficacité, au moins temporaire, des apports de matières organiques aisément biodégradables sur la stabilité ; elles feront apparaître le rôle successivement joué dans cette amélioration par la biomasse microbienne puis par les substances transitoires de l'humification et, en fin d'évolution, par les composés humiques les plus stables, qui présentent une efficacité spécifique sensiblement inférieure.

Il apparaît, en définitive, qu'à un niveau de stabilité de base lié à des caractéristiques permanentes (texture) et quasi permanentes (composés humiques stables) vient s'ajouter l'action complémentaire souvent très importante et variable dans le temps de ce qu'on pourrait appeler une « quantité de transformation » des apports culturaux saisonniers de matière organique fraîche (résidus de récolte, amendements aisément biodégradables, engrais verts, etc.).

Les perspectives ouvertes par la prise en compte de la dynamique et de la localisation des matières organiques dans le sol ne sont pas indépendantes. Même lorsqu'ils apparaissent, à l'échelle macroscopique, bien répartis dans le sol, les apports de carbone organique et les colonies de microorganismes qui utilisent ce substrat énergétique sont en fait très localisés si on se place à l'échelle des assemblages élémentaires. De plus, la plupart des substances organiques extracellulaires et produits de décomposition diffusent très peu dans le sol en raison de leur masse moléculaire et de leur réactivité avec les surfaces minérales et organiques. Cet ensemble néoformé est, de ce fait, très localisé sur des éléments de surface à proximité desquels il existe simultanément des matières biodégradables et des conditions favorables au développement des microorganismes ; c'est-à-dire, dans le cas général, dans les espaces poraux de grande dimension situés à la périphérie des unités structurales. On a pu dire qu'il s'agissait là de positions stratégiques tant pour l'efficacité physique des matières organiques que pour leur contribution au « turn-over » de l'azote.

Le développement de ces conceptions s'est accompagné d'une évolution des méthodes de caractérisation des matières organiques du sol. Dans une première étape, HÉNIN et TURC proposaient en 1949 une sorte d'analyse immédiate de la matière organique permettant de séparer et de doser séparément des matières organiques libres juxtaposées aux constituants minéraux, et majoritairement constituées de matières figurées récemment apportées au sol, et les matières liées correspondant aux matières humifiées à évolution plus lente. Ce fractionnement permit de concevoir un modèle d'évolution à deux compartiments (HÉNIN *et al.*, 1959) venant compléter le modèle à un compartiment de HÉNIN et DUPUIS (1945).

Plus récemment, les méthodes de fractionnement densimétrique des matières organiques couplées à la définition et à l'évaluation de compartiments cinétiques traduisent des préoccupations du même ordre de la part des chercheurs travaillant dans ce domaine.

Enfin, et d'une façon plus générale, à une approche de l'étude des matières organiques du sol fondée presque exclusivement sur le taux et la composition chimique des constituants organiques s'est progressivement substituée une démarche fondée sur la notion de statut organique ; cette notion regroupe un ensemble de

composantes interactives telles que le stock total et la répartition des teneurs dans le profil, la nature chimique des constituants, leur localisation par rapport aux systèmes minéraux organisés et la situation des différents compartiments sur une cinétique d'évolution.

## Développements actuels des recherches sur la désagrégation

Après une période de ralentissement au cours des années 70, les travaux sur la stabilité structurale en France ont été relancés au cours des dernières années. Cette recrudescence d'intérêt a des raisons d'ordre agronomique, à savoir l'importance accrue accordée à la réussite de l'implantation des cultures semées et, par là, à l'évolution de la structure du lit de semence ; elle tient également à la nécessité mieux ressentie de protection du milieu et notamment du sol (contrôle de l'érosion) et des eaux (maîtrise du ruissellement et de la qualité des eaux superficielles).

Les objectifs des recherches sur la dégradation structurale ont, de ce fait, sensiblement évolué. Il s'agit moins désormais de classer des propriétés intrinsèques de matériaux et de les relier à leur constitution que de décrire et de prévoir l'évolution structurale de la surface du sol en conditions et en temps réels sous l'action du climat.

Les comportements des matériaux agrégés au contact de l'eau sont une composante essentielle des systèmes que ces objectifs conduisent à définir et à étudier ; mais ils y interviennent dans des conditions différentes de celles mises en œuvre au laboratoire dans les études expérimentales. Au champ, ces conditions sont à la fois plus complexes et plus variables. L'agent de dégradation intervient à la fois par l'énergie libre de l'eau mise au contact des fragments terreux et par l'énergie cinétique des gouttes de pluie. Son action ne se limite pas à une désagrégation plus ou moins poussée, mais provoque des déplacements de particules et leur réorganisation à la surface du sol. Elle est progressive au cours d'une pluie et, dans la généralité des cas, discontinue : l'état hydrique et structural du sol est donc variable au début de chaque évènement pluvieux. Il est en conséquence nécessaire de prendre en compte de façon explicite les dimensions spatiale et temporelle des phénomènes étudiés.

On est alors fondé à s'interroger sur la résistance des bases théoriques établies par S. Hénin à un changement aussi important de la nature et des conditions de l'évolution structurale. Les travaux de J. Boiffin sur la dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies et ceux de Y. Le Bissonnais apportent, par des voies très différentes, des éléments de réponse à cette question.

LE BISSONNAIS (1988), en utilisant dans un premier temps des procédures peu différentes dans leur principe de celles mises en œuvre par S. Hénin, a précisé les domaines, hydrique notamment, dans lesquels les différents mécanismes de désagrégation sont dominants ; il en a aussi précisé les conséquences sur la distribution granulométrique des particules produites qui apparaît caractéristique de chacun d'entre eux. Il a ensuite montré que ces conclusions restent valides lorsque les fragments terreux sont soumis à l'impact de gouttes d'eau ; il a mis en évidence l'interaction des caractéristiques de la pluie, de l'état initial des fragments et de la constitution du matériau avec la réalisation de tel ou tel type de désagrégation et il en a proposé des éléments d'explication.

C'est ainsi qu'au début d'une pluie tombant sur un sol sec le phénomène de désagrégation par éclatement est dominant et instantané. L'énergie cinétique des gouttes n'influe pas sur l'intensité de la désagrégation, qui dépend à ce stade de la probabilité de piégeage d'air (mouillabilité du sol et flux pluvial) et de la baisse de cohésion au cours de l'hydratation (texture et garniture ionique). Au contraire, dans les stades ultérieurs ou pour des fragments humides au début de la pluie, la force d'impact des gouttes qui provoque l'arrachement de particules à la surface des éléments exposés est déterminante. Son action est progressive et ses conséquences sont fonction de la cohésion humide des matériaux (texture), sans que les constituants organiques aient une influence perceptible.

Le travail publié par BOIFFIN à partir de 1984 porte sur le processus de dégradation structurale par la pluie, tel qu'il se déroule *in situ* à l'occasion d'une succession de pluies. Il fournit, tout d'abord, un descriptif d'ensemble de l'évolution d'un état structural initialement fragmentaire exposé aux pluies. Ce descriptif est établi à l'aide de critères macro- et micromorphologiques adaptés à la description d'une surface – et non plus d'un échantillon adimensionnel – et à partir du suivi d'une large gamme de parcelles expérimentales différant par l'histoire climatique, l'état initial, le taux d'interception de l'énergie cinétique, la composition du sol. Le trait invariant le plus marquant est la succession systématique de deux étapes de dégradation structurale, différenciées selon les conditions de redistribution spatiale des particules issues de la désagrégation des fragments initiaux et selon le degré de tri granulométrique qui en résulte. Au cours d'une première phase, la surface du sol est progressivement obturée par une croûte structurale au sein de laquelle les constituants granulométriques élémentaires présentent un mode d'assemblage similaire à celui observé au sein des fragments initiaux. La baisse d'infiltrabilité qui en résulte favorise le déclenchement d'une seconde phase au cours de laquelle se développent des croûtes sédimentaires à microhorizons triés et lités, caractéristiques du transport et du dépôt en phase liquide. Cette succession confirme l'appréciation qu'avait faite S. Hénin du rôle de l'hypothèse de Schloesing : même lorsque le sol est fortement pourvu en cations échangeables alcalins, la ségrégation des particules du squelette et la dispersion de l'argile sont indécélables au début du processus et ne se manifestent qu'une fois apparus des excès d'eau superficiels agités par l'impact des gouttes de pluie. La dispersion des ciments apparaît ainsi plus comme la conséquence extrême de la dégradation structurale que comme son moteur initial.

L'interprétation proposée pour rendre compte du développement des croûtes superficielles est basée sur un schéma de colmatage des interstices puis des microdépressions par les particules fines issues des fragments initiaux. Ce schéma permet de dégager un indicateur morphologique à la fois aisément accessible à l'observation et étroitement lié à la quantité de particules déplacées par les pluies : il s'agit du calibre du plus petit fragment non encore incorporé dans la croûte en extension, noté  $D_{lim}$ . Au cours du processus, il augmente de façon indépendante de la granulométrie initiale des fragments déposés à la surface du sol. Pour un site donné, cette croissance peut être représentée par une fonction linéaire de l'énergie cinétique des pluies d'intensité supérieure à un seuil  $x$  cumulée depuis la date d'exposition aux pluies :

$$D_{lim} = aKE_x + b$$

La valeur de  $x$  qui permet d'obtenir les meilleurs ajustements est d'autant plus faible que le sol est plus instable. Pour une valeur de  $x$  donnée, la pente  $a$  est une estimation statistique de la sensibilité du sol à la dégradation de surface.

La tableau III présente les valeurs de  $a$  obtenues pour deux sites dont les sols ont des textures et des stabilités structurales, estimées par la méthode de Hénin, différentes.

Tableau III. Caractérisation de deux sites vis-à-vis de leur sensibilité à la dégradation superficielle.

	Palaiseau	Montluel
Argile (%)	20,3	10,6
$\frac{MO}{A} \times 100$	10,3	16,6
Evaluation de la stabilité au laboratoire		
Ag alcool (%)	19,3	14,5
Ag eau (%)	3,1	8,9
Ag benzène (%)	5,4	10,2
Indice Hénin	1,5	1,3
$D_{lim} = aKE_5 + b$		
$a \times 10^2$	2,6	5,2

On constate que, selon cette estimation, le site de Montluel est deux fois plus sensible que celui de Palaiseau. On constate aussi que, parmi les tests proposés par S. Hénin, seul le taux  $A_{ga}$  qui exprime le comportement sous la pluie de fragments saturés n'est pas contradictoire avec ce classement. Tout se passe comme si, dans le cas des histoires climatiques plutôt humides observées sur le terrain, l'effet de la variation de la teneur en argile avait joué sur le comportement un rôle prépondérant par rapport aux différences de statut organique. L'effet de ces dernières est, au contraire, extériorisé de façon privilégiée par l'indice Hénin en raison du poids qui y est accordé aux tests avec prétraitement air et benzène.

Etendue à d'autres situations pédoclimatiques, la comparaison des sensibilités à la dégradation structurale estimée respectivement par approche morphologique *in situ* et par les tests de laboratoire confirme qu'aucun indice n'est à lui seul capable de prévoir la sensibilité à la battance telle qu'elle s'exprime lors d'un suivi de terrain. Ce résultat n'est pas surprenant : chacun des tests correspond à un comportement dans des conditions bien particulières et l'indice global est, par construction, une combinaison unique de ces conditions : il ne correspond donc qu'accidentellement aux caractéristiques climatiques variables selon les sites et les époques. Il reste désormais à vérifier cette interprétation et à rechercher des moyens d'estimation du paramètre  $a$ . Ceci peut être envisagé soit directement à partir de la constitution du matériau, soit en passant par des tests de comportement ; mais, dans les deux cas, en prenant en compte les conditions climatiques qui influent sur la succession des mécanismes dominants au long du processus de dégradation.

## Conclusion

L'ensemble théorique, méthodologique et expérimental dont nous venons d'évoquer quelques résultats a, au-delà du thème particulier de la stabilité structurale, influencé un large domaine en science du sol et en agronomie.

La conception même de la structure du sol en a été fortement modifiée : sa dimension dynamique est désormais considérée comme essentielle. La notion d'agrégat stable a été relativisée ; les travaux de S. Hénin ont montré que ces particules complexes sont le résultat contingent et le plus souvent éphémère de processus dans lesquels interviennent non seulement des mécanismes d'agrégation mais aussi des mécanismes de stabilisation, les uns et les autres pouvant porter sur des niveaux d'organisation très distincts.

L'interprétation physique de la constitution des sols a bénéficié de l'analyse de ce comportement particulier ; on pourrait citer, à cet égard, l'enrichissement du concept de texture.

Nous avons vu, par ailleurs, que le développement d'une approche moins strictement substantialiste de l'étude des matières organiques s'est montrée mieux adaptée à la compréhension de la diversité des rôles physiques et biologiques de ces constituants. Ainsi a été progressivement défini le statut organique des sols, qui relie la nature et les propriétés de ces substances à leur localisation et aux paramètres de leur cinétique d'évolution dans le sol.

D'un point de vue plus général, l'œuvre de S. Hénin fournit toujours, cinquante ans plus tard, les règles d'analyse du comportement des sols et un cadre théorique aux travaux entrepris dans le domaine de la dynamique structurale. Les progrès, que des objectifs plus contraignants rendent désormais nécessaires, semblent devoir porter davantage sur l'analyse d'un comportement complexe et sur son évaluation dans des conditions de dégradation précisées que sur les mécanismes de désagrégation à l'origine du processus.

## Bibliographie

BOIFFIN (J.), 1984. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies*. Thèse, sciences agronomiques, INA-PG, 320 p.

BOYER (J.), COMBEAU (A.), 1960. Etude de la stabilité structurale de quelques sols ferrallitiques de République Centrafricaine. *Sols Africains*, 5 (1) : 5-42.

CONCARET (J.), 1967. Etude des mécanismes de la destruction des agrégats de terre au contact des solutions aqueuses. *Ann. Agron.*, 18 (1) : 65-90.

FEODOROFF (A.), 1960. Evaluation de la stabilité structurale d'un sol (indice S). Nouvelles normes d'emploi pour l'appareil à tamiser. *Ann. Agron.*, 11 (6) : 651-659.

GRAS (R.), 1961. Relations entre les propriétés physiques du sol et la croissance du pommier dans la Sarthe. *Ann. Agron.*, 12 (2) : 207-248.

GUERIF (J.), 1979. Rôle de la matière organique sur le comportement au compactage. *Ann. Agron.*, 30 (6) : 469-480.

HÉNIN (S.), 1934. Etat actuel de la physique du sol. *Ann. Agron.* (nouvelle série), 4 : 611-625.

HÉNIN (S.), 1938. *Etude physico-chimique de la stabilité structurale des terres*. Thèse, Paris.

- HÉNIN (S.), 1944. Mécanisme de la protection de la structure des terres par la matière organique, le repos sous prairie artificielle ou le chaulage. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 26-28.
- HÉNIN (S.), 1944. Influence des phénomènes microbiens sur la formation d'une structure stable. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 373-375.
- HÉNIN (S.), DUPUIS (M.), 1945. Bilan de la matière organique des sols. *Ann. Agron.*, 1 : 17-29.
- HÉNIN (S.), FEODOROFF (A.), 1958. Sous-solage et drainage-taupe. *Ann. Agron.*, 5 : 567-591.
- HÉNIN (S.), MONNIER (G.), 1956. « Evaluation de la stabilité de la structure du sol ». In Comptes rendus du VI<sup>e</sup> Congrès de l'AISS, Paris, vol. B, p. 49-52.
- HÉNIN (S.), MONNIER (G.), TURC (L.), 1959. Un aspect de la dynamique des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Sci.*, 248 : 138-141.
- HÉNIN (S.), ROBICHET (O.), JONGERIUS (A.), 1955. Principes pour l'évaluation de la stabilité de la structure du sol. *Ann. Agron.*, 4 : 537-557.
- HÉNIN (S.), TURC (L.), 1949. Essai de fractionnement des matières organiques du sol. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 35 : 41-43.
- KONONOVA (M.), 1961. *Soil organic matter*. London, Pergamon Press, 450 p.
- LE BISSONNAIS (Y.), 1988. *Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse, Université Orléans.
- MONNIER (G.), 1965. Action des matières organiques sur la stabilité structurale des sols. *Ann. Agron.*, 16 (4) : 327-400 ; 16 (5) : 471-534.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.), GUERIF (J.), 1982. « Recherches de critères de la fertilité des sols et de son évolution en fonction du système de culture ». In Comptes rendus du Colloque CEE « Fertilité des sols et systèmes de culture », Bari, p. 35-42.
- PERIGAUD (S.), 1963. Mise en valeur des sols de la Brenne. *Ann. Agron.*, 14 (3) : 261-377.
- SCHLOESING (T.), 1885. *Chimie agricole*. Encyclopédie Fremy. Paris, Dunod.
- TOUTAIN (B.), 1970. *Contribution à l'étude de la stabilité structurale des sols limoneux de Bretagne intérieure*. Thèse 3<sup>e</sup> cycle, Université Rennes.
- YODER (A.), 1936. A direct method of aggregate analysis of soil and study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agron.*, 28 : 337-351.