

# La physique du sol vue par des agronomes

*François Papy, Marianne Cerf*

*Inra, unité Systèmes agraires et développement (Grignon)*

*Isabelle Coulomb*

*Inra, Laboratoire d'agronomie (Grignon)*

Que, dans ses œuvres multiples, Stéphane Hénin ait largement contribué à la connaissance des phénomènes physiques du sol cultivé, cela n'est un mystère pour personne. On connaît moins bien, sans doute, l'attention et l'intérêt qu'il a toujours portés « *au processus de raisonnement des praticiens* », comme le rappelle M. Sebillothe dans ce même ouvrage, en faisant référence à une note de l'Académie d'agriculture de France (1958) intitulée : « *Réflexions sur la valeur de la connaissance empirique* ».

Aussi ne doit-on pas s'étonner que, dans la famille des agronomes formée par Stéphane Hénin, il s'en trouve qui étudient le champ cultivé non seulement en tant que système de relations entre milieu, techniques et peuplement végétal, mais aussi comme le résultat d'une activité humaine, partant d'un processus décisionnel<sup>1</sup> (SEBILLOTTE, 1987). Notre projet, ici, est de montrer que, pour donner aux connaissances de physique du sol valeur opératoire (entendons par là : se traduisant en conseils pour l'action), il est nécessaire de combiner les deux objectifs suivants :

– d'une part, comprendre comment ces connaissances expliquent le comportement du champ cultivé soumis aux actions de l'agriculteur et permettent de le prévoir ;

– d'autre part, comprendre les raisons<sup>2</sup> que l'agriculteur a d'agir comme il le fait et les représentations<sup>3</sup> qu'il utilise.

---

<sup>1</sup> Cette double perspective est liée à l'appartenance des signataires à un laboratoire de recherche, qui, associé à la chaire d'agronomie de l'Ina Paris-Grignon, regroupe deux unités dépendant des départements Agronomie et Systèmes agraires et développement de l'Inra. Il est placé sous la responsabilité de M. Sebillothe. Dans une note interne au laboratoire, ce dernier a récemment relancé la réflexion sur ces deux fonctions des agronomes.

<sup>2</sup> BOUDON (1990) montre bien que, désormais, les sciences humaines s'attachent à rechercher des raisons aux comportements des hommes et n'ont plus recours à l'explication facile de causes affectives. De façon concrète, pour nous, cela signifie que des explications du type « défaut de technicité » ne sont pas recevables, sauf, en dernier recours, après qu'on ait épuisé les « bonnes raisons » de faire ou ne pas faire.

<sup>3</sup> RICHARD (1990) désigne par représentations les constructions intellectuelles que les acteurs se forgent pour agir ; elles sont souvent circonstancielles et transitoires.

Nous pouvons alors appréhender les problèmes que les agriculteurs ont à résoudre et, dans la mesure où nos connaissances (ici celles de physique du sol) peuvent y répondre, proposer des solutions et des procédures opératoires pour leur mise en œuvre. Le plan suivi ici reproduit ce déroulement.

## Eléments de physique du sol pour comprendre le fonctionnement du champ cultivé<sup>1</sup>

Le sol est un milieu poreux où la phase solide et l'espace poral, occupés par des liquides et des gaz, sont organisés de manière hétérogène et discontinue (voir article de M. Robert dans ce même ouvrage). Mais cette organisation n'est pas stable ; elle évolue dans le temps, sous l'effet d'actions diverses, climatiques et anthropiques. Aussi, conviendrons-nous de distinguer les notions d'état et de comportement physique.

Nous nous intéressons donc aux variables d'état qui permettent de caractériser le sol comme milieu de croissance pour les végétaux mais aussi comme système apte à évoluer. Cela revient à considérer essentiellement les propriétés de transfert et mécaniques (STENGEL, 1982, 1990). Elles sont liées à l'organisation de la phase solide et des pores ainsi qu'à l'état d'hydratation.

Caractériser dans un milieu hétérogène cette organisation des phases – solide, liquide et gazeuse – nécessite que l'on précise l'échelle à laquelle on se place. La figure 1 met en regard les tailles respectives de différents éléments liés au sol et d'organes biologiques (racines, semences...) ; on peut ainsi distinguer les deux

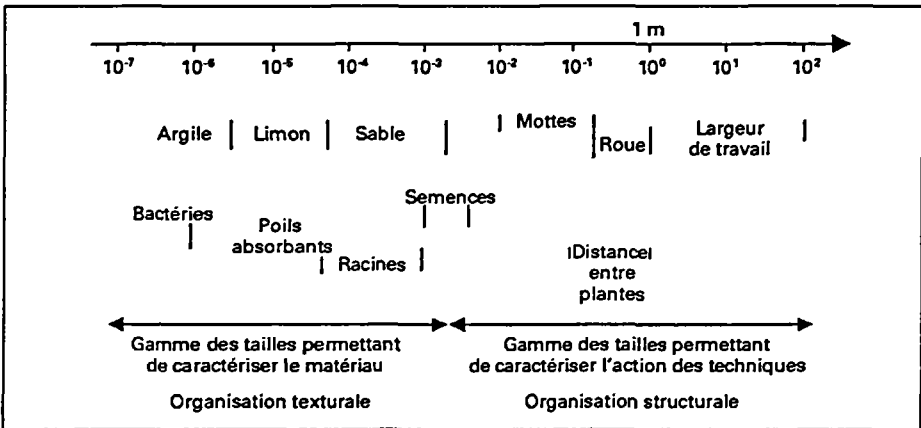


Figure 1. Les différentes échelles d'étude de l'état physique du sol (d'après DEXTER, 1988).

<sup>1</sup> Au cours de la dernière décennie, les travaux français ont fait l'objet de plusieurs publications. Citons notamment : le séminaire Inra « Comportement physique et mécanique du sol » (1982) ; le numéro spécial de *Science du sol* (1982) sur les effets du travail du sol ; le colloque Afes « Fonctionnement hydrique et comportement du sol » (1984) ; MONNIER et GOSS, 1987 ; BOIFFIN et MARIN-LAFLECHE, 1990.

niveaux que nous retiendrons : celui qui permet de caractériser le matériau terreux, et le niveau où il faut se situer pour caractériser l'action des techniques appliquées et le fonctionnement du peuplement végétal.

• La première échelle d'étude est donc celle des constituants particulaires élémentaires. Classées selon leur granulométrie, après dispersion, les particules solides du sol peuvent être sommairement séparées en deux catégories.

Les minéraux argileux ( $< 2 \cdot 10^{-6}$  m) présentent, de façon plus ou moins marquée suivant leur structure minéralogique, les propriétés suivantes : ils varient de volume selon leur teneur en eau, ils présentent une forte capacité à retenir de l'eau et à la fixer ; secs ils résistent aux pressions appliquées, humides ils se déforment aisément ; ils adsorbent les cations. Les limons (compris entre  $2 \cdot 10^{-6}$  et  $2 \cdot 10^{-4}$ ) et les sables (compris entre  $2 \cdot 10^{-4}$  et  $2 \cdot 10^{-3}$ ) constituent ce que l'on appelle le squelette du sol car ils sont inertes d'un point de vue physique.

Ainsi, selon leur taille, les particules constitutives de la phase solide ont-elles des propriétés nettement différenciées. Mais des travaux ont montré (FIES, 1982) que celles du mélange ne résultent pas de la simple addition de celles des parties. On convient d'appeler texture les propriétés de l'ensemble des particules associées.

Les petits fragments terreux de l'ordre du millimètre ont une phase solide constituée par les particules du squelette plus ou moins bien enrobées par de l'argile selon sa proportion dans le mélange ; entre elles existe un espace poral rempli d'air et d'eau. Selon la proportion d'argile dans la phase solide, les fragments gonflent plus ou moins quand leur teneur en eau augmente. A cette échelle d'organisation, l'espace poral, appelé porosité texturale, est déterminé par les caractéristiques des particules élémentaires (taille, forme, nature minéralogique, garniture ionique) et leur état d'hydratation (FIES, 1971). La figure 2 montre, pour un matériau donné,

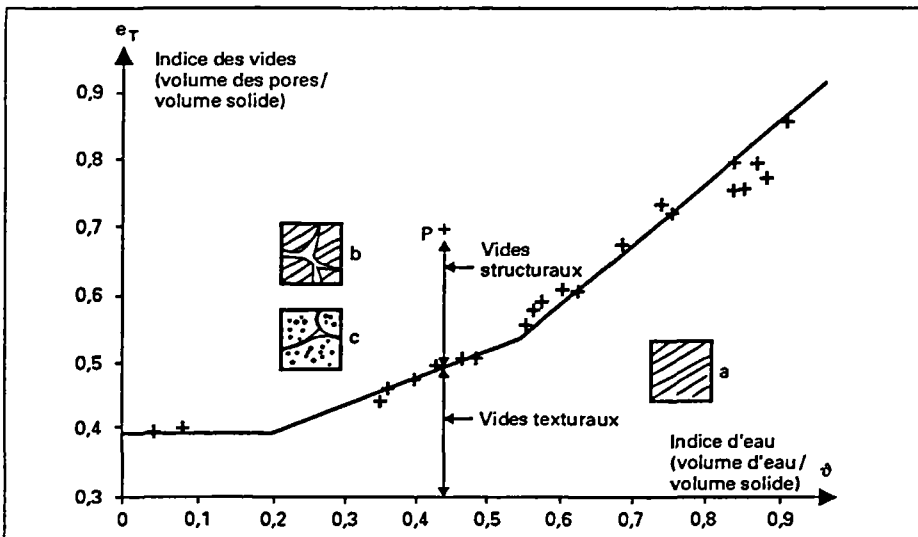


Figure 2. Variation de l'indice des vides de fragments terreux de 1 à 2 mm en fonction de leur état d'hydratation. Sol à 27 % d'argile.

Note : l'ordonnée du point figuratif « P » d'un échantillon prélevé *in situ* représente l'indice des vides totaux. Ce dernier se compose de vides texturaux et de vides structuraux. Un même volume de vides structuraux peut correspondre à diverses modalités d'organisation : des mottes à porosité texturale séparées de vides (b), des mottes plus poreuses, mais plus étroitement liées entre elles (c).

comment varie l'indice des vides de petits agrégats terreux par suite de la variation de volume de ces derniers en fonction de leur état d'hydratation. Elle représente la liaison qui existe entre indice des vides texturaux et humidité.

• Cependant, l'échelle d'étude privilégiée par les agronomes est celle qui, correspondant au champ cultivé, caractérise l'action des techniques et le fonctionnement du peuplement (fig. 1). Les finalités poursuivies nous incitent à caractériser le sol selon deux angles :

- comme résultat d'une histoire et point de départ d'une évolution ultérieure ;
- comme milieu où se réalisent les conditions de croissance et de développement d'un peuplement végétal cultivé.

En proposant sous le nom de profil cultural « *une méthode d'examen de l'état du sol affecté par les façons culturales et exploité par les racines* », HÉNIN *et al.* manifestaient déjà, en 1960, la préoccupation d'adopter ce double point de vue.

## Le profil cultural, étape d'une évolution

Par l'examen méthodique du profil cultural (GAUTRONNEAU et MANICHON, 1987), on caractérise, à l'échelle de l'activité agricole, l'organisation des éléments constitutifs du sol et son hétérogénéité. Les pratiques agricoles impriment à la couche travaillée une variabilité spatiale qui n'est pas aléatoire (MANICHON, 1987, 1988). Elle est largement dépendante de l'action des outils et engins de traction. Si cette dernière est connue a priori, il est possible de réaliser, sur une coupe faite dans les couches de surface, une analyse géométrique de l'effet des opérations culturales, comme indiqué à la figure 3. On réalise ainsi une partition du profil en horizons et bandes verticales qui correspondent aux contraintes exercées par les outils et les roues. En procédant de la sorte, on stratifie le profil en y distinguant des compartiments au sein desquels les contraintes subies ont été sensiblement identiques, tout au moins au cours des dernières opérations culturales.

A l'échelle de ces compartiments, une organisation spatiale de la phase solide et des pores se surimpose à celle que nous avons décrite à l'échelle millimétrique. Apparaissent à l'observation des mottes de porosité plus ou moins forte et des modes d'assemblage entre elles plus ou moins lâches. On donne à ce niveau d'organisation le nom de structure.

Comparée à la porosité texturale, à même humidité, la porosité mesurée dans les compartiments du profil lui est toujours supérieure, au moins égale. On convient d'appeler porosité structurale la valeur : porosité totale - porosité texturale (STENGEL, 1979).

La porosité structurale se décompose à son tour en une porosité liée à l'état interne des mottes et une porosité résultant de leur mode d'assemblage (MANICHON et ROGER-ESTRADE, 1990).

On comprend l'origine des états observés en reconstituant l'histoire des contraintes exercées sur le sol. Elles sont à analyser, à chaque étape, en relation avec la résistance à la transformation que le sol leur oppose. D'un point de vue mécanique, cela s'analyse en termes de relation contrainte-déformation. On peut distinguer ces contraintes selon qu'elles sont anthropiques ou « naturelles » (COULOMB *et al.*, 1990).

Parmi les actions de l'homme, il faut distinguer celles qui sont volontaires, comme l'emploi des outils, des conséquences, involontaires cette fois, du compactage par les roues d'engins. Quand l'état physique initial est poreux et humide, il offre une

faible résistance à l'action des roues ; il en résulte que la porosité structurale disparaît. D'importants volumes dans le profil sont alors amenés, par l'action des roues, à la porosité texturale. Cet état de compacité est stable. Le tableau I donne les résultats d'une expérimentation où l'on a comparé l'intensité de fragmentation après labour, à différentes vitesses, de deux états initiaux, l'un tassé à la porosité texturale, l'autre non. Malgré la large gamme de vitesses d'avancement explorée, on n'a pu

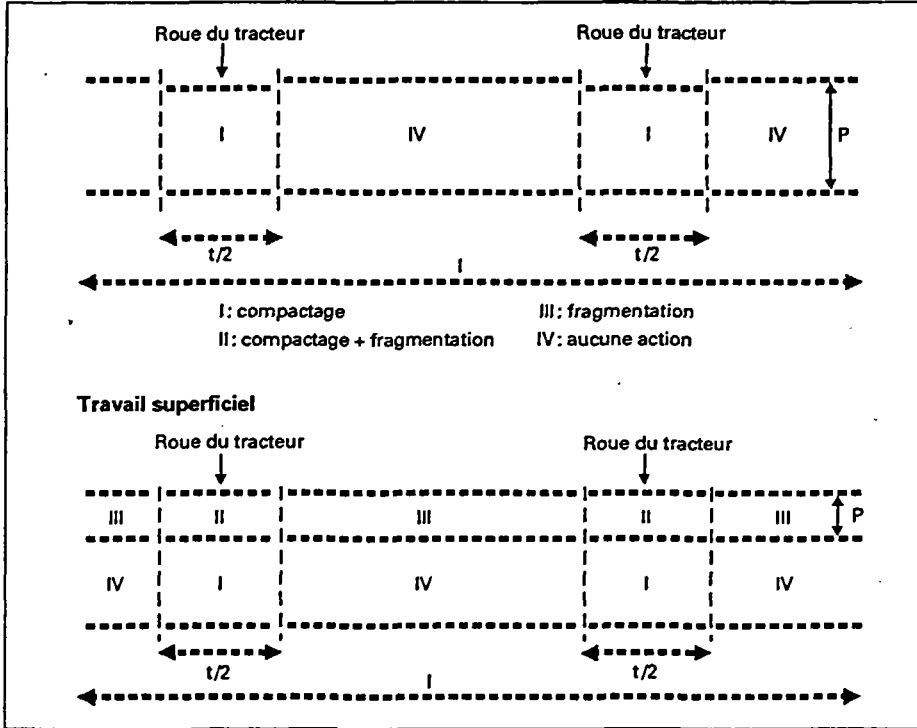


Figure 3. Définition de compartiments dans le profil cultural (MANICHON, 1988).

Tableau I. Vitesse de labour, état initial et fragmentation (en % du volume « mottes + terre fine » dans la couche labourée).

Vitesse (km/h)	3,9	5,2	7,9
Abondance de mottes > 10 cm			
N	52	59	49
T	81	69	73
Abondance de terre fine < 1 cm			
N	24	13	16
T	3	7	11

Source : I. Coulomb, travaux réalisés avec le concours du Cemagref.

Etats initiaux : N = 66 % mottes > 10 cm,  $\gamma = 1,46$  ; T = 100 % mottes > 10 cm,  $\gamma = 1,50$ .  
Sol de limon labouré à  $w = 23$  % ; charrue trisoc 16<sup>a</sup> ; profondeur moyenne : 27 cm.

obtenir des états de labour analogues tant par le calibre des mottes que l'abondance de terre fine. Même à vitesse rapide, le labour laisse un nombre important de mottes dont l'état interne est la porosité texturale.

Les connaissances précédentes permettent de reconstituer l'évolution schématique de la couche labourée à partir d'états initiaux différents. Les deux évolutions apparaissant en figure 4 ont des origines différentes : couche initialement fragmentée et poreuse (A), couche étant déjà au début à la porosité texturale (B).

L'action des agents climatiques ne modifie généralement pas l'état interne des mottes. La figure 5 montre comment évolue, au cours du temps, sous l'action du

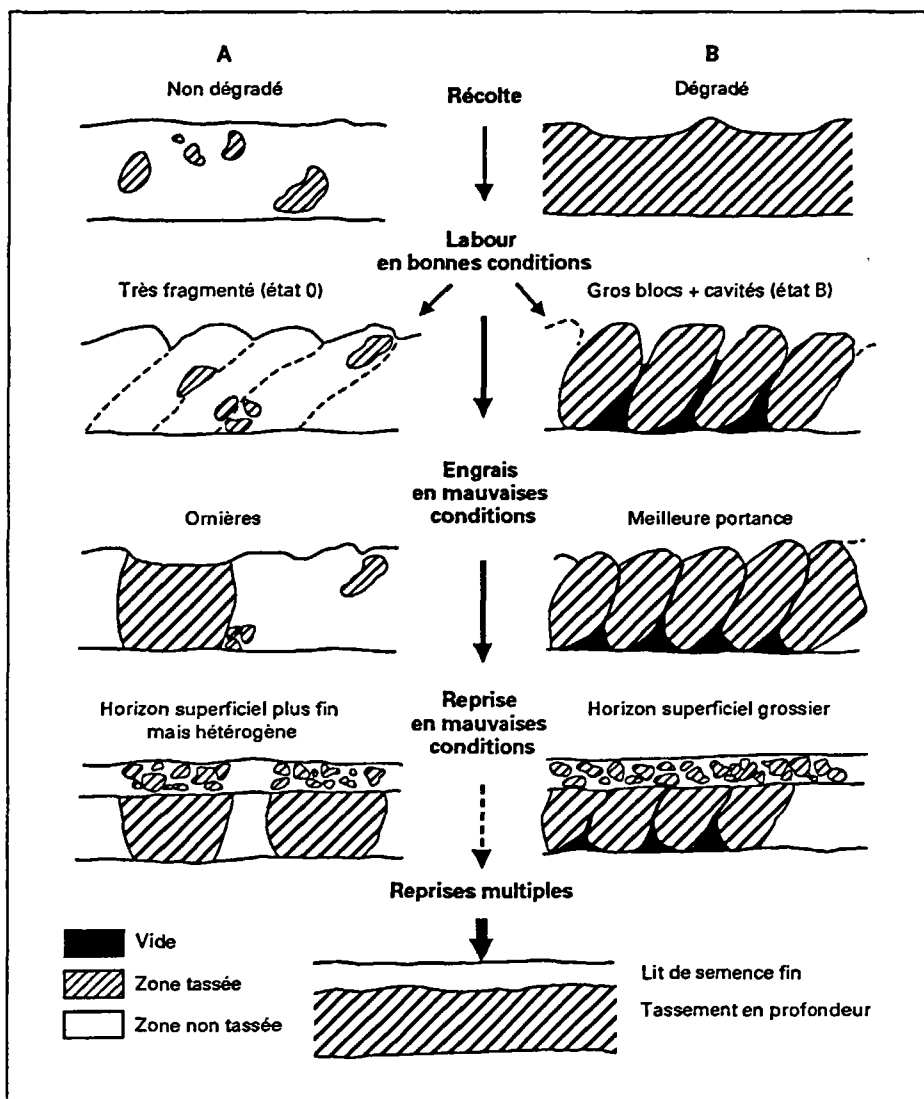


Figure 4. Evolution schématique de l'état structural de la couche labourée selon l'état initial du sol (MANICHON, 1988).

Note : dans cet exemple, on ne suppose pas d'action du climat par fissuration.

climat, un compartiment du profil cultural initialement composé de terre fine et de quelques mottes poreuses ; par reprise en masse, liée à l'humectation du sol par les pluies, se forment de grosses mottes mais de faible compacité interne. Quand les mottes sont initialement à la porosité texturale, elles peuvent se fissurer sous l'effet d'alternances humectation-dessiccation ou gel-dégel. A la limite, elles peuvent ainsi se transformer en terre fine. Ce phénomène ne se manifeste cependant que dans

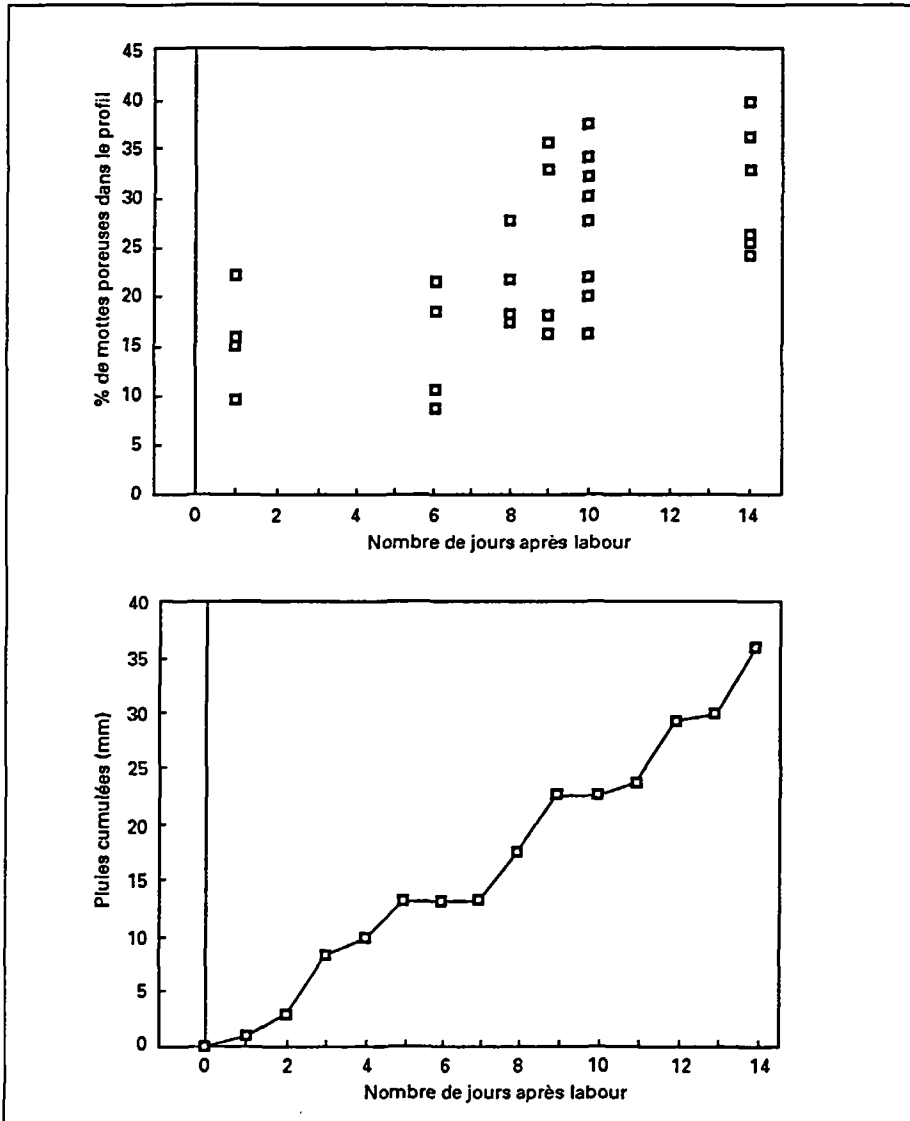


Figure 5. Formation de mottes poreuses par reprise en masse de terre fine (d'après COULOMB, 1991).

Note : les 10 mm de pluie tombés entre le 7<sup>e</sup> et le 9<sup>e</sup> jour après le labour ont provoqué l'essentiel de la reprise en masse.

certaines terres argileuses (MONNIER et STENGEL, 1982). Un taux d'argile de 20 % environ, variable selon la nature minéralogique de l'argile, est nécessaire.

Dans un cas particulier, cependant, l'action du climat peut modifier l'état interne des mottes : c'est celui de la désagrégation des éléments structuraux de surface sous l'action des pluies (BOIFFIN, 1984 ; Le BISSONNAIS, 1988), qui entraîne un remplissage des vides structuraux, puis par dispersion totale des éléments constitutifs du sol et sédimentation dans les microdépressions de surface, apparition de structures continues compactes, mais de faible épaisseur (BOIFFIN, 1984).

La combinaison des actions anthropiques et climatiques produit ainsi une évolution des états à court terme, mais aussi à long terme. MANICHON (1982 a et b, 1987) a montré que l'on pouvait caractériser l'évolution de l'état structural à long terme par la teneur en éléments structuraux fortement tassés. Cet indicateur traduit le solde du bilan des actions de compactage et de fragmentation. Dans les situations pédoclimatiques favorisant la fissuration (textures argileuses, hiver gélif), il n'y a pas d'évolution cumulative. Mais en sol limoneux existe un « état moyen d'équilibre » directement lié au système de culture appliqué au milieu. Le tableau II, établi à partir des données d'un dispositif en petites parcelles, où les passages d'engins étaient toujours au même endroit, montre que la teneur en mottes compactes est liée aux systèmes de culture où les récoltes sont réalisées en conditions humides (successions avec maïs).

Tableau II. Teneurs pondérales en mottes à porosité texturale pour différentes successions de cultures, sol à 14 % d'argile (MANICHON, 1988).

Succession de cultures	% de mottes à porosité texturale
Compartiment labouré, non repris	
Jachère travaillée	30
Luzerne-blé-colza-blé	33
Colza-blé-maïs-blé-blé	34
Maïs-blé (depuis 10 ans)	68
Colza-blé-maïs-blé-blé + tassement avant labour	66
A l'aplomb des roues (toutes successions)	96

L'état physique à un moment donné apparaît bien comme le résultat d'une histoire au sein de laquelle il est possible de distinguer des effets à court et long terme.

## Le profil cultural, milieu de croissance

L'examen du profil cultural permet de mettre en relation organe végétal et compartiment concerné.

Le compartiment « lit de semence » est jugé selon son aptitude à permettre la germination et la levée. Les travaux de BRUCKLER (1983) et de RICHARD (1988) sur la germination, de BOUAZIZ (1987) sur la levée permettent de hiérarchiser les caractéristiques recherchées. Le rôle du potentiel hydrique autour de la semence est prépondérant pour la possibilité de germination et la vitesse du phénomène. La porosité structurale peut modifier cette dernière, mais dans une moindre mesure. Le ralentissement de la germination par insuffisance d'oxygène n'est manifeste qu'en



cas de présence en surface d'une croûte de battance saturée en eau. La grosseur des mottes au-dessus de la semence en l'absence de croûte, l'état de dessiccation, lorsque cette dernière existe, sont des critères d'obstacles mécaniques à la levée, comme le montre la figure 6.

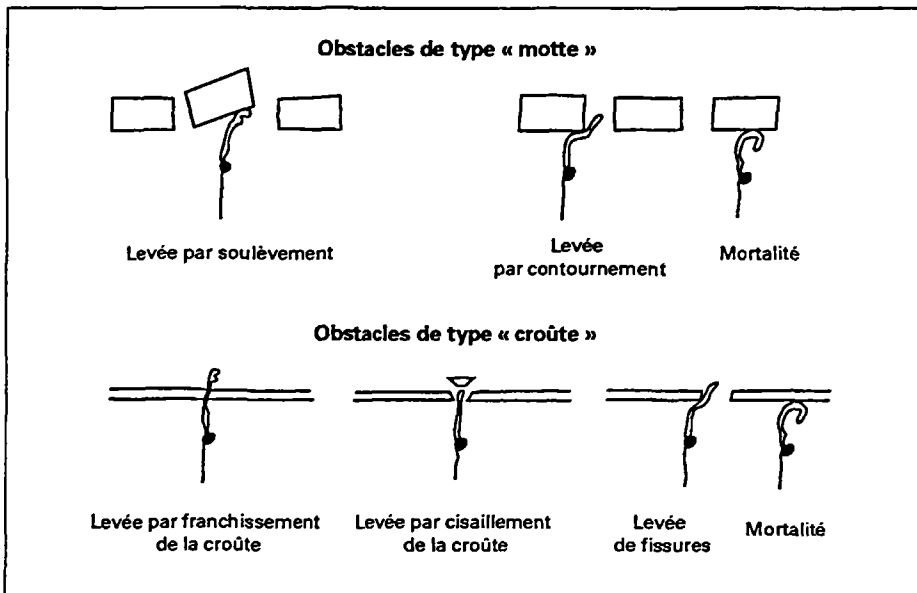


Figure 6. Comportements possibles de plantules face à différents obstacles superficiels (motte ou croûte).  
D'après ARNDT (1965), cité par RICHARD et BOIFFIN (1990).

Les travaux de TARDIEU et MANICHON (1987) et de TARDIEU (1990) ont montré que le fonctionnement du système racinaire comme capteur d'eau et d'éléments fertilisants est affecté par l'état physique du compartiment horizon labouré, non repris par les façons superficielles. On constate sur la figure 7 que les zones à forte compacité au moment de l'installation des racines ne sont pas colonisées par celles-ci et que l'irrégularité d'enracinement qui peut en résulter a des conséquences sur la colonisation des horizons profonds. La figure 8 illustre un autre effet de l'état structural de la couche travaillée sur le fonctionnement du champ cultivé : elle met en évidence que, dans les parcelles où la structure du sol est compacte, la quantité d'azote minéral présente dans le sol est moins bien absorbée que dans les parcelles à structure plus meuble.

La façon dont nous avons présenté les connaissances de physique du sol entre dans le cadre général d'une théorie du fonctionnement du champ cultivé. Au lieu de se contenter d'établir des relations directes techniques —> rendement, cette dernière décompose la chaîne causale. Les phénomènes physiques ont été considérés comme des processus dynamiques à l'interface des actions de l'agriculteur et du fonctionnement du peuplement végétal.

Ce corps des connaissances, par sa nature analytique, permet de faire des diagnostics et des pronostics dans des situations variées ; il permet également de

concevoir d'autres modalités de conduite des états physiques, en un mot d'innover. Il ne suffit cependant pas pour une aide satisfaisante à l'agriculteur dans ses décisions face aux phénomènes de physique du sol. Il est, en effet, nécessaire d'identifier les contraintes qu'impose la réalisation matérielle des actions. Aussi doit-on changer de point de vue ; jusqu'alors placés dans une situation de compréhension de l'évolution des états du sol, mettons-nous maintenant en position d'utilisateur de ces états, pour réaliser des interventions. Il semble pertinent de considérer que l'agriculteur peut nous aider à le faire et d'étudier comment il agit et comment il pense.

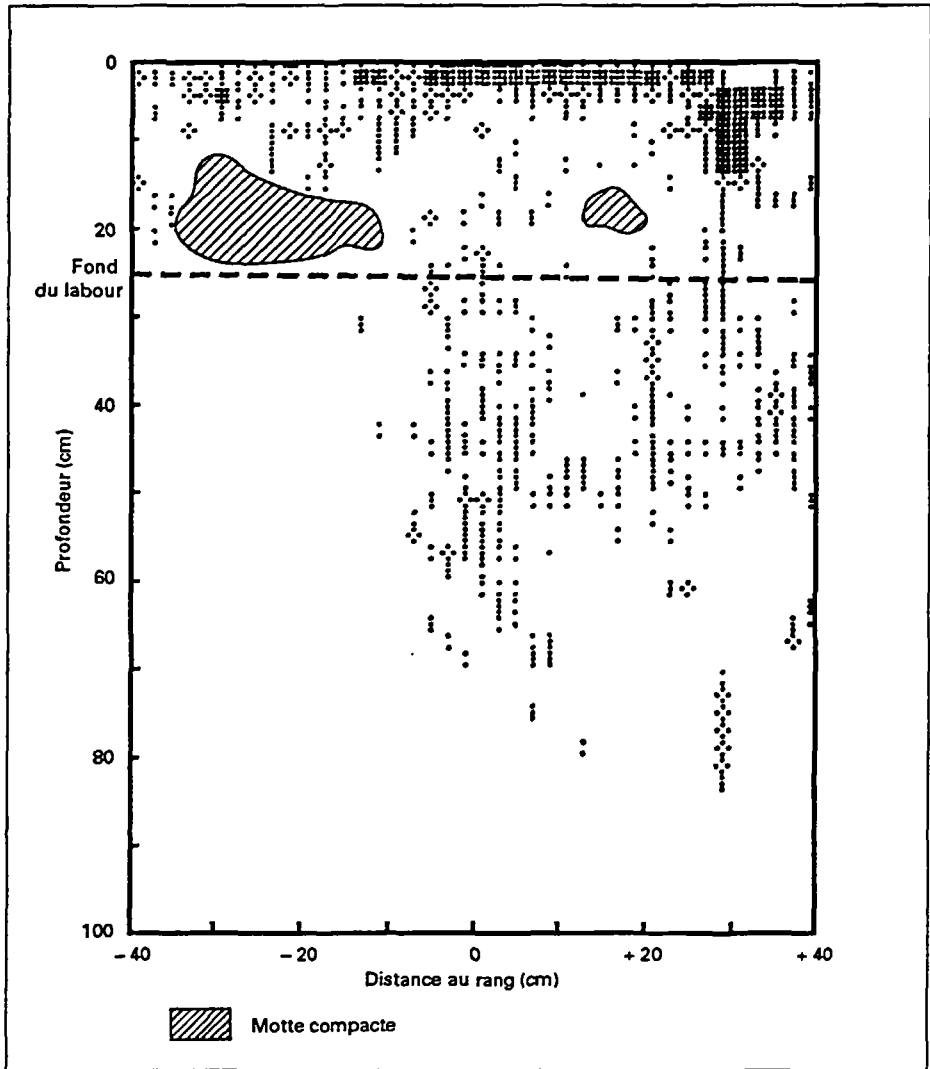


Figure 7. Effet de l'état structural de la couche labourée sur la répartition des racines en profondeur (TARDIEU et MANICHON, 1987).

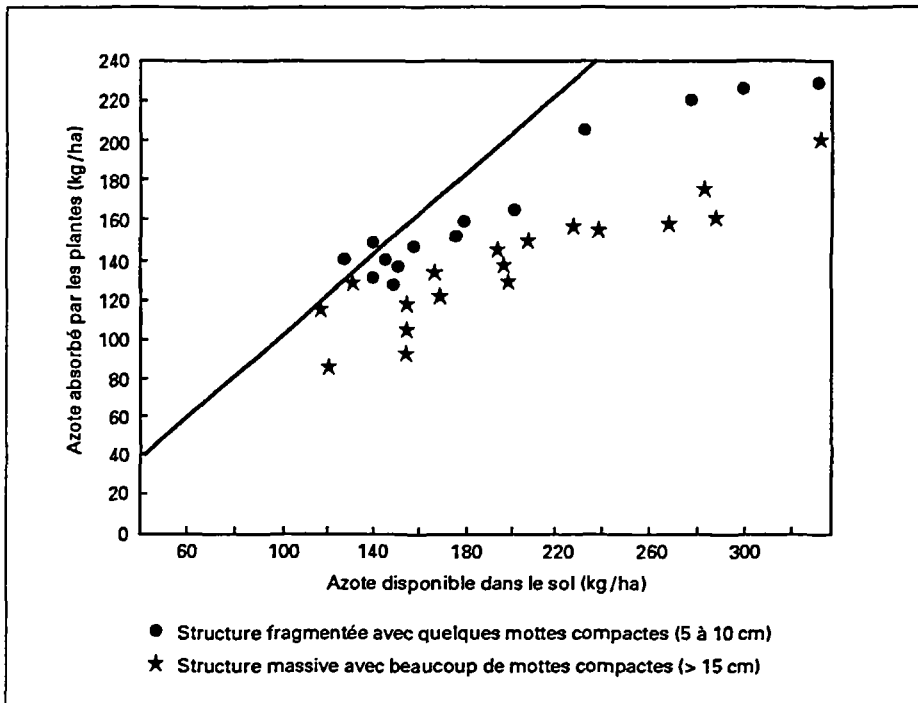


Figure 8. Absorption de l'azote et état structural de la couche labourée (orge de brasserie). (LE BAIL *et al.*, 1990.)

Note : la droite représente la fonction : azote absorbé = azote disponible.

## Éléments de psychologie cognitive pour comprendre les pratiques de pilotage des états physiques

S'inscrivant dans un mouvement scientifique qui a donné, dès les années 70, statut d'objet de recherche aux processus décisionnels des acteurs, des agronomes mènent maintenant des travaux sur la prise de décision en agriculture (SEBILLOTTE et SOLER, 1988 ; CERF et SEBILLOTTE, 1988 ; DURU *et al.*, 1988). On reconnaît aux acteurs, gérant des processus producteurs, une logique d'utilisation (RICHARD, 1983) due à la fois à la nécessité d'agir et aux conditions dans lesquelles sont réalisées les actions.

Mais, comme l'ont souligné de nombreux auteurs (SIMON, 1978 ; COURBON, 1982), processus de décision et processus cognitifs sont intimement liés : on ne se décide que sur la base d'une représentation de la situation, et l'évaluation de ses propres actions permet à l'opérateur – ici l'agriculteur – de revoir sa propre représentation (SEBILLOTTE et SOLER, 1990). BOURGINE (1989) parle d'« autodiagnostic ».

C'est ainsi que, progressivement, l'agriculteur forge son propre apprentissage. Le contexte de l'activité agricole en rend l'acquisition délicate. On peut en donner trois raisons :

- l'agriculteur doit piloter un processus dynamique : s'appliquant aux phénomènes physiques, ses décisions doivent tenir compte de l'évolution des états du sol sous l'action des agents climatiques, mais aussi de celle des exigences du peuplement végétal cultivé au cours de son développement ;
- l'existence de l'aléa climatique place le décideur en avenir incertain ;
- les effets des actions sur le peuplement végétal ne sont pas immédiatement perceptibles et ne peuvent être directement attribuables, tant sont nombreuses les interactions induites par les états physiques du sol.

Ces difficultés d'apprentissage renforcent la nécessité de fournir aux agriculteurs des aides à l'action.

Sans développer plus que nécessaire les concepts utilisés, à partir de travaux réalisés sur les décisions lors de l'implantation d'une culture, la betterave (SEBILLOTTE et SERVETTAZ, 1989 ; CERF, 1990), nous allons présenter ce que l'on sait des processus de décision portant sur la préparation des terres, et des représentations qu'ils sous-tendent.

## Processus de décision

Différentes méthodes, inspirées de celles couramment utilisées en psychologie et ergonomie cognitive, ont servi au recueil des données : suivi-observations des agriculteurs lors de campagnes agricoles, observations lors des tours de plaine ; entretiens pour expliciter les raisons de telle ou telle action ; expérimentations sur la base de simulations des évolutions des états du sol et des cultures sous l'effet de différents scénarios climatiques, ou sur la base de classifications de photos représentant des états successifs de surface du sol au cours d'une suite d'opérations culturales.

Il résulte de ces travaux que :

- du point de vue d'un observateur extérieur, l'agriculteur semble prendre un grand nombre de décisions pour réaliser l'ensemble des opérations culturales nécessaires à l'implantation d'une culture ;
- du point de vue de l'acteur, seules certaines décisions sont effectivement prises au moment de la réalisation des actions ; en effet, la majorité des choix, au travers des opérations culturales exécutées, est déjà intégrée dans des plans ou des procédures<sup>1</sup> que l'agriculteur peut évoquer en dehors de l'action.

Ces plans et procédures sont définis en fonction des buts que se donne l'agriculteur. Par exemple, pour organiser son travail pendant la période d'automne, tel agriculteur se fixe comme objectif de finir le semis des blés avant le 10 novembre ou, durant la période de printemps, les betteraves avant le 20 avril. Pour atteindre ces buts, l'agriculteur se fixe des objectifs intermédiaires : par exemple, avoir fini de

---

<sup>1</sup> Un « plan » est une prévision qui laisse une certaine latitude pour faire face à l'imprévu. Il n'est donc pas directement exécutable. Une « procédure » se définit, en revanche, par des règles d'action, qui sont fonction de prérequis et de conditions.

semer ses blés implantés derrière pois avant le 20 octobre. De même, pour organiser son travail à l'échelle d'une « parcelle d'agriculteur », il se fixe un objectif de taille des agrégats et d'humidité en surface et, dans le lit de semence, de nivellement du sol en surface ; il donne des objectifs intermédiaires aux différentes opérations de travail du sol qu'il réalise : par exemple, dans le cas des semis de betterave, la première intervention sert avant tout à niveler et (ou) assécher, les suivantes servent surtout à affiner pour obtenir la taille souhaitée des agrégats.

De fait, les plans et les procédures sont la traduction de contraintes que l'agriculteur a déjà intégrées et vis-à-vis desquelles il ne se pose plus, la plupart du temps, de questions. Ces contraintes sont de nature diverse : elles peuvent être liées à l'assolement, au matériel, à la main-d'œuvre, aux exigences des cultures, à la texture et à la structure du sol, aux caractéristiques topographiques des parcelles, au climat, etc. De nombreuses contraintes résultent du fait que l'agriculteur doit gérer un ensemble de parcelles. Les activités qu'il y pratique sont parfois concurrentes. Aussi établit-il des priorités qui se traduisent par des contraintes sur la conduite de certaines parcelles.

Selon les conditions dans lesquelles sont exécutées les opérations culturales, l'agriculteur dispose de solutions alternatives. Le contexte peut être défini en référence au passé, au présent ou à l'avenir. Ainsi, l'absence de gel pendant l'hiver, en rendant impossible une évolution des labours par fissuration sous l'action du gel, est-elle prise en compte pour définir une procédure de préparation du lit de semence de betterave, en particulier au travers du choix des outils qui seront utilisés. Mais l'agriculteur sait aussi définir des objectifs de lits de semence différents en fonction des épisodes climatiques qui surviendront après le semis et qu'il anticipe : s'il s'attend à un épisode pluvieux après le semis (c'est le cas lorsqu'il s'avère possible de semer dès la mi-mars), il cherchera plutôt à obtenir un lit de semence motteux en surface, surtout dans les terres qu'il définit comme battantes ; s'il anticipe un épisode sec, il cherchera à positionner la graine dans l'horizon humide, etc. Enfin, le contexte même de réalisation des actions est pris en compte : au cours d'un printemps pluvieux, retardant les travaux, l'agriculteur change les objectifs qu'il s'assigne pour semer la betterave sucrière. Ainsi, s'il n'a pu semer avant le 20 avril, il ne cherche plus à obtenir une certaine répartition des agrégats en surface et dans le lit de semence, mais sème coûte que coûte. Il adapte alors ses procédures et ses plans pour atteindre ce nouvel objectif.

Ces différentes modalités de replanification du travail peuvent être connues à l'avance. Ainsi le 20 avril apparaît-il comme une date butoir, une date à laquelle l'agriculteur fait un bilan du travail déjà réalisé et à laquelle il revoit, si besoin, ses objectifs et sa planification.

Le terme de « *modèle de l'agriculteur pour l'action* » (SEBILLOTTE et SOLER, 1990) est utilisé pour désigner ces plans et procédures construits d'avance et qui définissent le cadre dans lequel sont prises les décisions au moment de l'action. Ce modèle est la construction qu'a élaborée l'agriculteur au fil des ans. Il traduit les combinaisons des opérations culturales qu'il envisage, combinaisons qui lui semblent garantir, avec le maximum de chances de réussite, l'obtention de ses objectifs dans les différents contextes pour lesquels ces combinaisons ont été construites.

## Représentations des phénomènes de physique du sol

Des observations ont été faites pendant le déroulement d'une campagne réelle, des expérimentations ont été conduites sous forme de simulations sur scénarios fictifs ; elles montrent que l'agriculteur reconnaît des contextes et définit sans hésitation le plan ou la procédure qu'il va exécuter. Cependant, lorsque se présente une situation qu'il n'a pas eu l'occasion de rencontrer précédemment, il peut rechercher des solutions qui s'avèrent nouvelles par rapport aux plans et aux procédures qu'il connaît. Ainsi tel agriculteur, obligé de drainer une parcelle, a-t-il été conduit à réaliser des labours en février (alors qu'il effectue tous ses labours pour les semis de printemps entre novembre et décembre) sur des parcelles qu'il semait en betterave. N'ayant jamais travaillé un sol labouré dans ces circonstances, il a été amené à imaginer une nouvelle procédure de travail du sol (utilisation de la herse alternative qu'il n'employait pas pour ses travaux de printemps) à partir de discussions avec des voisins, avec des techniciens, et par comparaison avec des situations sur semis de blé.

Il découle de ce qui précède que, pour choisir entre les différents plans ou procédures qu'ils connaissent, les agriculteurs identifient d'abord le contexte dans lequel ils se trouvent. Ils se réfèrent au comportement du sol sous l'action du travail qu'ils ont fait, ou qu'ils comptent faire, ou encore sous l'action d'évènements climatiques. Ils utilisent des indicateurs d'état très accessibles et souvent synthétiques : ainsi, la couleur du sol est à la fois un indicateur de l'humidité de surface du sol, mais aussi de sa texture ; de même, la réaction au pied est à la fois un indicateur de l'humidité en profondeur et d'un comportement sous l'action des outils de travail du sol.

S'il existe une grande homogénéité entre plusieurs agriculteurs dans la façon de caractériser les états qui leur sont présentés, il apparaît nettement une grande diversité dans les transformations d'état qu'ils envisagent. On a noté une forte corrélation entre ces dernières et la nature du matériel sur l'exploitation. L'agriculteur aurait du mal à imaginer autre chose que ce qu'il est capable de faire avec ses outils.

Enfin, les expérimentations de psychologie cognitive ont également permis de montrer que, face à des situations qu'il ne reconnaît pas, l'agriculteur infère une texture à partir d'un état du sol qu'il observe et ensuite raisonne ses interventions en fonction de la texture, qu'il associe directement à un comportement du sol.

Tout comme les connaissances présentées dans la première partie, celles de l'agriculteur portent sur les processus dynamiques d'évolution des états du sol. Mais elles en diffèrent par nature. Fondées sur une recherche des causes, les premières permettent de généraliser par induction, de particulariser par déduction ; pragmatiques, les secondes portent sur le traitement de cas particuliers (RICHARD, 1990). Parce qu'elles résultent d'un apprentissage par l'action, elles intègrent des contraintes, elles procèdent par analogie avec des situations déjà expérimentées, elles utilisent des variables indicatrices d'accès facile et rapide.

La différence de nature entre ces deux types de connaissance résulte de la différence de situation de ceux qui les conçoivent : d'un côté le chercheur, spécialiste du processus producteur, l'opérateur de l'autre. Il n'est pas raisonnable de transférer telles quelles les connaissances de physicien du sol à l'agriculteur, car il

n'est pas en situation de les mettre en œuvre. En gardant à l'esprit l'objectif que nous nous sommes fixé (aider l'action), la vraie question est la suivante : comment rendre compatibles les deux systèmes de pensée ?

## Le conseil au pilotage des états physiques du sol

Une confrontation en trois étapes des deux types de connaissance nous paraît nécessaire, ainsi que cela a été présenté par ailleurs (CERF *et al.*, 1990).

Afin de cerner les contraintes qui pèsent sur les décisions de l'agriculteur, on se situera tout d'abord dans le contexte dans lequel il agit, c'est-à-dire à l'échelle de l'ensemble de l'exploitation et non de la parcelle, en tenant compte de l'assolement, du matériel, de la main-d'œuvre (PAPY *et al.*, 1990). Le modèle d'action de l'agriculteur, autrement dit ses plans, ses procédures, les caractéristiques d'état physique du sol qu'il considère doivent être identifiés mais aussi jugés. On en discutera la pertinence à partir des connaissances développées dans la première partie. Mais, inversement, on se posera aussi la question de la pertinence des connaissances théoriques de physique du sol par rapport à la situation de l'agriculteur. C'est la première étape, celle de la confrontation des systèmes de pensée.

Les quelques résultats, présentés plus haut, sur la connaissance empirique des agriculteurs, nous ont montré qu'ils peuvent avoir une représentation incomplète de leur situation. Nous avons vu, par exemple, qu'ils ont des difficultés à imaginer d'autres états du sol que ceux qu'ils sont capables de réaliser avec leurs outils. De façon plus générale, on peut dire qu'ils sont souvent conduits à accepter des contraintes qui pourraient être rediscutées. Sauf dans des contextes totalement nouveaux pour eux, les agriculteurs ne posent pas d'actes en réponse à des problèmes. En agissant selon des plans et des procédures, ils évitent au contraire d'avoir des problèmes à résoudre. Or la compréhension de leur situation et les connaissances scientifiques que nous avons sur la physique du sol nous permettent de formuler (parfois de reformuler) des problèmes, puis d'imaginer de nouvelles solutions. C'est la deuxième étape, celle de l'innovation.

Une troisième étape s'impose alors. Une nouvelle solution, pour adaptée qu'elle soit à la situation de l'agriculteur, ne sera adoptée par lui que si elle est formulée en termes de règles d'action, c'est-à-dire de plans, de procédures. C'est, en définitive, ce à quoi il faut aboutir.

Deux exemples vont illustrer la démarche. Dans le premier, on le verra, les connaissances de physique du sol ne servent, tout compte fait, qu'à valider les pratiques de l'agriculteur. Le second illustre une remise en cause mutuelle des deux productions de connaissance en présence.

### EXEMPLE 1

Dans certaines exploitations de grande culture du Bassin parisien, sur sols limono-argileux, l'agriculteur se trouve, au printemps, en situation d'avoir à préparer des semis de betterave sur des parcelles déjà labourées. Il cherche à reprendre ses labours dès que les conditions hydriques lui paraissent favorables, les conditions thermiques étant satisfaites. Il utilise un indicateur d'état hydrique du sol : le changement de couleur des crêtes de labour. Il cherche à finir ses semis avant le 20 avril, date à partir de laquelle il pense que tout retard affecte beaucoup le rendement. Aussi n'est-il pas trop regardant sur les conditions hydriques de travail

du sol à partir d'une certaine date (située autour du 10 avril), privilégiant de la sorte la réalisation du travail par rapport à sa qualité. Il a donc à l'esprit des représentations qui lui permettent de mettre en balance les risques qui résultent d'un travail accompli en de mauvaises conditions et d'un semis trop tardif.

Ce modèle d'action est-il valide au regard des connaissances sur le fonctionnement du champ cultivé ? Nous avons d'abord étudié la pertinence du virage de couleur en surface comme indicateur de l'état hydrique, qui permet de reprendre un labour sans que l'action des roues ne réduise à leur aplomb la porosité à sa valeur texturale. A la suite d'expérimentations, il s'avère qu'en texture limono-argileuse la procédure consistant à intervenir au moment du virage de couleur, tout au moins tant qu'on n'est pas pressé, est tout à fait valide (PAPY, 1984). Mais que penser du changement de règle d'action à partir du 10 avril, et de la date du 20 avril comme objectif de fin des semis ? Ayant appliqué un modèle de l'apparition du virage de couleur aux données climatiques d'un grand nombre d'années, nous avons réalisé une étude fréquentielle des conditions d'intervention sans dégradation de la structure par le compactage des roues. La figure 9 établit la probabilité d'avoir 2, 4 et 6 jours répondant à ces conditions d'intervention favorables avant une date donnée (PAPY et SERVETTAZ, 1986). On s'aperçoit qu'il est raisonnable de prendre

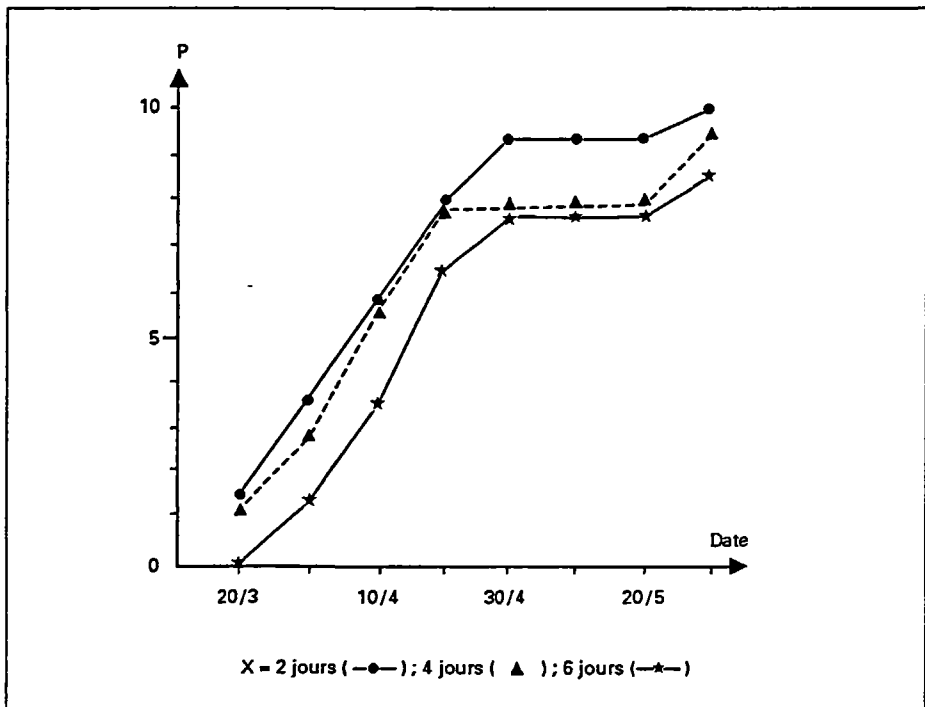


Figure 9. Probabilité cumulée de disposer d'au moins « X » jours disponibles pour les reprises de printemps avant une date donnée (PAPY et SERVETTAZ, 1986).

Note : la probabilité est estimée en nombre d'années sur 10.



des risques de travailler en mauvaises conditions à partir de la deuxième décennie d'avril, puisqu'au cours de cette période la probabilité d'avoir dans le futur des conditions favorables diminue fortement. Nous apportons ici aux pratiques de l'agriculteur des justifications qu'il n'avait pas données. Par ailleurs, la théorie agronomique établit, pour les cultures de printemps comme la betterave sucrière, une relation date de semis-rendement justifiant la règle de l'agriculteur de finir ses semis avant le 20 avril (FLEURY, 1986).

La première étape de notre démarche établit donc que le pilotage des états du sol par l'agriculteur s'avère pertinent au regard des connaissances de physique du sol. Aussi, dans ce cas, les conseils que nous avons été conduits à lui donner ne l'ont pas remis en cause <sup>1</sup>.

## EXEMPLE 2

Dans les exploitations intensives laitières sur sols limoneux hydromorphes de l'ouest de la France, certains agriculteurs se trouvent au printemps en situation d'avoir à semer du maïs fourrager sur des parcelles non encore labourées et à faire de l'ensilage d'herbe. Les deux activités entrent en concurrence. Bon an mal an, l'ensilage se fait à la même époque : fin avril. L'agriculteur envisage de labourer les parcelles à maïs à partir du 10-15 avril, quand la température est suffisamment élevée pour permettre la germination et un démarrage rapide de la plante. Dès que vient le moment d'ensiler l'herbe, il donne la priorité à cette activité qui se fait en entraide. Il ne reprend les semis de maïs qu'une fois terminé l'ensilage, ce qui peut le conduire à les réaliser très tardivement, jusque fin juin quelquefois. Si le début d'avril est froid et pluvieux, les semis ne débutent qu'après l'ensilage. L'agriculteur pense qu'il ne faut pas se presser de semer, les semis tardifs donnant des plantes de plus grande taille.

Les connaissances agronomiques établissent que le rendement du maïs en matière sèche est lié à la précocité du semis ; ce dernier doit être réalisé dès que la température moyenne atteint 10 °C, soit 4 ans sur 5, à partir du 15 avril. La taille des plantes, liée à la photopériode, n'est pas un critère de rendement en matière sèche. Le modèle d'action de l'agriculteur le conduit à réaliser des semis trop tardifs et la représentation qu'il a de la croissance du maïs est erronée. Elle est un exemple de « bonne raison » que l'agriculteur se donne pour faire ce qu'il fait (BOUDON, 1990) ; elle n'en est pas valable pour autant.

Mais comment peut-il semer plus tôt si les conseillers, redoutant la reprise en masse d'un labour trop précoce, lui recommandent, dans ces sols limoneux hydromorphes, de labourer le plus tard possible juste avant les semis ? En se mettant dans la situation de l'agriculteur, on s'aperçoit que les deux recommandations sont contradictoires : la vitesse du labour est trop lente pour permettre de faire beaucoup de semis avant la période d'ensilage d'herbe.

La première étape de notre démarche a donc établi une contradiction entre les pratiques et représentations de l'agriculteur d'une part, les connaissances agronomiques de l'autre, mais également une contradiction interne du discours technique tenu par les agronomes aux agriculteurs.

La seconde étape a consisté à déplacer le problème et à prospector les possibilités de faire des labours d'avance, à partir de début mars, de manière à semer une plus

---

<sup>1</sup> Nous avons cependant eu à donner des conseils pour d'autres types de décision : choix des niveaux d'équipement et de main-d'œuvre (ATTONATY *et al.*, 1987, 1990 ; PAPY *et al.*, 1990).

grande surface entre le 15 avril et le début des ensilages d'herbe. Des essais ont dû être mis en place. Deux types de résultats en ont été tirés :

– l'avantage d'un semis précoce est bien supérieur à l'inconvénient d'une reprise en masse de l'horizon labouré quand il est retourné précocement et qu'il a reçu beaucoup de pluie (TARGOZ, 1988) ;

– on a déterminé les conditions dans lesquelles il est possible de reprendre un labour sans annuler, à l'aplomb des roues, la porosité structurale : il faut que la valeur totale de l'évapotranspiration potentielle ( $\Sigma$  ETP), après des pluies ayant amené le niveau d'hydratation du sol à sa capacité au champ, atteigne 10 mm (DELCEY, 1989).

D'autres modes de conduite de l'état physique du sol sont donc envisageables, qui satisfont mieux les objectifs de l'agriculteur que ceux pratiqués. Reste qu'il faut maintenant traduire les conseils en termes de plans et de procédures (MADINIER et PAPY, travaux en cours). En simulant sur un grand nombre d'années climatiques l'organisation du travail sur toute l'exploitation avec des surfaces plus ou moins importantes labourées d'avance, on peut fournir à l'agriculteur, en fonction de sa surface, de son assolement et des risques qu'il est prêt à prendre, une estimation de la superficie à labourer d'avance, avant telle date. En traduisant la référence de  $\Sigma$  ETP, précédemment donnée, sur les conditions de travail en termes de jours d'attente après pluie en fonction de l'ensoleillement et du vent, on lui donne une procédure d'intervention <sup>1</sup>.

Le conseil de pilotage des états physiques du sol doit aller jusque-là.

## Conclusion

Ainsi l'agronomie (théorie du champ cultivé) se situe-t-elle à la confluence de deux catégories de disciplines amont :

– celles qui, comme la physique du sol, nous aident à expliquer comment évoluent, sous l'effet des opérations culturales et du climat, les relations au sein du système sol-plante-climat-techniques.

– celles qui, nous éclairant sur les processus cognitifs des acteurs, nous permettent de comprendre leurs pratiques.

*Les unes et les autres sont nécessaires pour proposer une théorie opératoire.*

La maîtrise de l'état physique du sol a été une bonne illustration de cette conception. En la matière, la connaissance pratique a – et aura sans doute toujours – un caractère irremplaçable. L'état physique influe en effet sur le peuplement cultivé non comme un facteur de croissance, dont la fonction de production prend la forme générale des rendements moins que proportionnels, mais comme une condition, plus exactement un ensemble de conditions, source d'interactions nombreuses avec l'élaboration du rendement. De plus, entrent en jeu dans l'expression d'un état physique tant d'éléments – nature du sol, climat, pente et orientation du terrain, régime hydraulique – qu'il existe une grande diversité de situations locales. La connaissance scientifique aura beau produire des modèles

<sup>1</sup> Dans le cas des sols limoneux, il faut intervenir avant le virage de couleur en surface si l'on veut éviter un compactage qui annule la porosité structurale. Cet indicateur, valable en sol limono-argileux, ne l'est pas ici.

généraux, un savoir-faire sera toujours nécessaire pour les adapter aux contingences et produire les pratiques culturales.

Pour d'autres techniques (relevant notamment des dates et doses d'apport de matière, du choix des variétés...), la source du savoir pratique est davantage imprégnée de connaissances technologiques exogènes. Les idées que nous avons développées sur l'agronomie à propos de la physique du sol n'en restent pas moins valides.

## Bibliographie

- ATTONATY (J.M.), CHATELIN (M.H.), SOLER (L.G.), POUSSIN (J.C.), 1990. A nouvelles orientations, nouveaux outils de gestion. *Persp. agric.*, 147 : 35-50.
- ATTONATY (J.M.), LAPORTE (C.), POPY (F.), SOLER (L.G.), 1987. La simulation et l'organisation du travail comme outil de gestion de l'exploitation agricole. Application à la grande culture. *Etudes et Recherches*, Inra-SAD, n° 10, 48 p.
- BOIFFIN (J.), 1984. *La dégradation structurale des couches superficielles du sol sous l'action des pluies* Thèse, INA-PG, 320 p.
- BOIFFIN (J.), GUÉRIF (J.), STENGEL (P.), 1990. « Les processus d'évolution de l'état structural du sol : quelques exemples d'études expérimentales récentes ». In *La structure du sol et son évolution*. J. Boiffin, A. Marin-Lafliche (éd.). Paris, Inra, p. 37-69 (Les Colloques de l'Inra, n° 53).
- BOIFFIN (J.), MARIN-LAFLÈCHE (A.), 1990. *La structure du sol et son évolution*. Paris, Inra, 216 p. (Les Colloques de l'Inra, n° 53).
- BOUAZIZ (A.), 1987. *Implantation d'un peuplement de blé tendre en conditions sèches*. Thèse, Institut agronomique et vétérinaire Hassan II, 117 p.
- BOUDON (R.), 1990. *L'art de se persuader des idées douteuses, fragiles ou fausses*. Paris, Fayard, 459 p.
- BOURGINE (C.), 1989. *Contribution à une théorie de l'auto-modélisation. Application au développement de système d'aide au diagnostic global d'exploitation agricole*. Thèse, Université Aix-Marseille III, 236 p.
- BROSSIER (J.), VISSAC (B.), LE MOIGNE (J.L.), 1990. *Modélisation systémique et système agraire. Décision et organisation*. Paris, Inra, 365 p.
- BRUCKLER (L.), 1983. Rôle des propriétés physiques du lit de semences sur l'imbibition et la germination. I. Elaboration d'un modèle du système « terre-graine ». II. Contrôle expérimental d'un modèle d'imbibition des semences et possibilités d'applications. *Agronomie*, 3 (3) : 213-222 et 223-232.
- CERF (M.), 1990. *Analyse préalable à la conception d'aide à la décision pour les agriculteurs. Etude du semis de betteraves sucrières*. Mémoire DEA, Université Paris VIII, 38 p.
- CERF (M.), POPY (F.), AUBRY (C.), MEYNARD (J.M.), 1990. « Théorie agronomique et aide à la décision ». In *Modélisation systémique et système agraire*. J. Brossier, B. Vissac, J.L. Le Moigne (éd.). Paris, Inra, p. 181-202.
- CERF (M.), SEBILLOTTE (M.), 1988. Le concept de modèle général et la prise de décision dans la conduite d'une culture. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74 (4) : 71-80.
- COULOMB (I.), 1991. *Analyse quantitative du comportement du sol au labour : rôle de l'état structural initial*. Thèse, INA-PG, 241 p.
- COULOMB (I.), MANICHON (H.), ROGER-ESTRADE (J.), 1990. « Evolution de l'état structural sous l'action des systèmes de culture ». In *La structure du sol et son évolution*. J. Boiffin, A. Marin-Lafliche (éd.). Paris, Inra, p. 137-158 (Les Colloques de l'Inra, n° 53).

- COURBON (J.C.), 1981. Processus de décision et aide à la décision. *Econ. Soc., sér. Sci. Gestion*, 16 (12) : 1456-1476.
- DELCEY (B.), 1989. *Eléments pour les choix d'organisation du travail au printemps en vue d'avancer les semis de maïs. Cas des exploitations laitières intensives de la Vienne sur les terres de Bornais*. Mémoire DAA, INA-PG, Chaire d'agronomie, 55 p.
- DEXTER (A.R.), 1988. Advances in characterization of soil structure. *Soil Tillage Res.*, 11 : 199-238.
- DURU (M.), PAPY (F.), SOLER (L.G.), 1988. Le concept de modèle général et l'analyse du fonctionnement de l'exploitation agricole. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74 (4) : 81-93.
- FIES (J.C.), 1971. Recherche d'une interprétation texturale de la porosité des sols. *Ann. Agron.*, 22 (6) : 655-685.
- FIES (J.C.), 1982. Constitution physique des sols. In *Techniques agricoles*. Paris, Editions Techniques (Fasc. 1130).
- FLEURY (A.), 1986. Effet des dates de réalisation des opérations culturales sur l'élaboration du rendement des espèces annuelles. *Bull. Tech. Inf.*, 412-413 : 705-716.
- GAUTRONNEAU (Y.), MANICHON (H.), 1987. *Guide méthodique du profil cultural*. Lyon, GEARA-CEREF, 71 p.
- HÉNIN (S.), 1958. Réflexions sur la valeur de la connaissance agronomique. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, séance du 12 décembre, 881-883.
- HÉNIN (S.), FEODOROFF (A.), GRAS (R.), MONNIER (G.), 1960. *Le profil cultural. Principes de physique du sol*. Paris, SELA, 320 p.
- LE BAIL (M.), MEYNARD (J.M.), SEBILLOTTE (M.), DELFIT (B.), 1990. « An agronomic diagnostic for spring barley adapted to brewery ». In Premier Congrès ESA, Paris, 1990.
- LE BISSONNAIS (Y.), 1988. *Analyse des mécanismes de désagrégation et de mobilisation des particules de terre sous l'action des pluies*. Thèse, Université Orléans, 197 p.
- MANICHON (H.), 1982 a. *Influence des systèmes de culture sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique*. Thèse docteur-ingénieur, INA-PG.
- MANICHON (H.), 1982 b. L'action des outils sur le sol : appréciation de leurs effets par la méthode du profil cultural. *Sci. Sol*, 3 : 203-219.
- MANICHON (H.), 1987. Observation morphologique de l'état structural et mise en évidence d'effets de compactage des horizons travaillés. In *Soil compaction and regeneration*. G. Monnier, M.J. Goss (eds). Rotterdam, Balkema, p. 39-52.
- MANICHON (H.), 1988. Compactage, décompactage du sol et systèmes de culture. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74 (1) : 43-54.
- MANICHON (H.), ROGER-ESTRADE (R.), 1990. Caractérisation de l'état structural et étude de son évolution à court et moyen terme sous l'action des systèmes de culture. In *Les systèmes de culture*. L. Combe, D. Picard (éd.). Paris, Inra, p. 27-55.
- MONNIER (G.), GOSS (M.J.), éd., 1987. *Soil compaction and regeneration*. Rotterdam, Balkema, 163 p.
- MONNIER (G.), STENGEL (P.), 1982. Structure et état physique du sol. In *Techniques agricoles*. Paris, Editions techniques (Fasc. 1140 et 1141).
- PAPY (F.), 1984. *Comportement du sol sous l'action des façons de reprise d'un labour de printemps. Effet des conditions climatiques et de l'état structural*. Thèse docteur-ingénieur, INA-PG, 232 p.
- PAPY (F.), AUBRY (C.), MOUSSET (J.), 1990. « Eléments pour le choix des équipements et chantier d'implantation des cultures en liaison avec l'organisation du travail ». In *La structure du sol et son évolution*. J. Boiffin, A. Marin-Lafèche (éd.). Paris, Inra, p. 157-185 (Les Colloques de l'Inra, n° 53).
- PAPY (F.), SERVETTAZ (L.), 1986. Jours disponibles et organisation du travail (exemple des chantiers de préparation des semis au printemps. *Bull. Tech. Inf.*, 412-413 : 693-703.

- RICHARD (G.), 1988. *Germination des semences de betterave sucrière (Beta vulgaris L.) en condition d'hypoxie. Modélisation, contribution à un diagnostic au champ*. Thèse docteur-ingénieur, INA-PG, 102 p.
- RICHARD (G.), BOIFFIN (J.), 1990. « Effet de l'état structural du lit de semences sur la germination et la levée des cultures ». In *La structure du sol et son évolution*. J. Boiffin, A. Marin-Lafèche (éd.). Paris, Inra, p. 111-136 (Les Colloques de l'Inra, n° 53).
- RICHARD (G.) 1983. *Logique de fonctionnement et logique d'utilisation*. Roquencourt, Inria.
- RICHARD (G.), 1990. *Les activités mentales*. Paris, Armand Colin, 435 p.
- SEBILLOTTE (M.), 1987. Du champ cultivé aux pratiques des agriculteurs. Réflexions sur l'agronomie actuelle. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 73 (8) : 69-81.
- SEBILLOTTE (M.), 1990. « Les processus de décision des agriculteurs. II. Conséquences pour les démarches d'aide à la décision ». In *Modélisation systémique et système agraire*. J. Brossier, B. Vissac, J.L. Le Moigne (éd.). Paris, Inra, p. 103-117.
- SEBILLOTTE (M.), SERVETTAZ (L.), 1989. « Les pratiques de la conduite de la betterave sucrière : la prise de décision et ses déterminants ». In *Fertilité et systèmes de production*, M. Sebillotte (éd.). Paris, Inra, p. 308-344.
- SEBILLOTTE (M.), SOLER (L.G.), 1988. « Les processus de décision des agriculteurs ». In *Modélisation systémique et système agraire*. J. Brossier, B. Vissac, J.L. Le Moigne (éd.). Paris, Inra, p. 93-101.
- SEBILLOTTE (M.), SOLER (L.G.), 1990. Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 74 (4) : 59-70.
- SIMON (H.A.), 1978. Rationality as process and as product of thought. *Am. Econ. Rev.*, 68 (2) : 1-16.
- STENGEL (P.), 1979. Analyse de porosité et état physique du sol. *Ann. Agron.*, 30 (1) : 1-26.
- STENGEL (P.), 1982. « Influence des contraintes hydriques et mécaniques sur l'espace poral ». In *Comportement physique et mécanique des sols*. Séminaire du Département des sciences du sol, Pech-Rouge (France), octobre 1981. Paris, Inra, p. 25-42.
- STENGEL (P.), 1990. « Caractérisation de l'état structural du sol. Objectifs et méthodes ». In *La structure du sol et son évolution*. J. Boiffin, A. Marin-Lafèche (éd.). Paris, Inra, p. 15-36 (Les Colloques de l'Inra, n° 53).
- TARDIEU (F.), 1990. « Effet de l'état structural du sol sur l'environnement. Que prendre en compte dans la modélisation ? » In *La structure du sol et son évolution*. J. Boiffin, A. Marin-Lafèche (éd.). Paris, Inra, p. 91-109 (Les Colloques de l'Inra, n° 53).
- TARDIEU (F.), MANICHON (H.), 1987. Etat structural, enracinement et alimentation hydrique du maïs. I. Modélisation d'états structuraux types de la couche labourée. *Agronomie*, 7 (2) : 123-131.
- TARGOZ (E.), 1988. Références agronomiques pour l'implantation du maïs-fourrage dans les exploitations laitières intensives sur les terres de Bornais de la Vienne. Mémoire DAA, INA-PG, Chaire d'agronomie, 50 p.