



Chapitre 1 de "L'agronomie aujourd'hui" : La connaissance du fonctionnement du champ cultivé, base de l'évolution des systèmes de culture

Thierry Doré, Marie-Helene Jeuffroy, Stéphane S. de Tourdonnet

► To cite this version:

Thierry Doré, Marie-Helene Jeuffroy, Stéphane S. de Tourdonnet. Chapitre 1 de "L'agronomie aujourd'hui" : La connaissance du fonctionnement du champ cultivé, base de l'évolution des systèmes de culture. T. Doré; M. Le Bail; P. Martin; B. Ney; J. Roger-Estrade. L'agronomie aujourd'hui, QUAE, pp.43-56, 2006, 9782759210701. hal-02912835

HAL Id: hal-02912835

<https://agroparistech.hal.science/hal-02912835>

Submitted on 6 Aug 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Chapitre 1

La connaissance du fonctionnement du champ cultivé, base de l'évolution des systèmes de culture

Thierry DORÉ, Marie-Hélène JEUFFROY, Stéphane DE TOURDONNET

Les pratiques agricoles se sont profondément transformées au cours des trente dernières années. Cette évolution concerne d'une part les agricultures fortement artificialisées qui ont, simultanément, rapidement accru leur recours aux intrants de synthèse, bénéficié d'un renouvellement variétal rapide, et mis en œuvre des moyens de mécanisation importants. Mais ce changement a également marqué les agricultures dans les pays dits « du Sud », pour lesquelles on a pu observer une diminution des surfaces en jachère, la mise en culture de sols moins fertiles, le développement de la mécanisation et de la motorisation, une diversification des cultures, etc. L'agronomie a contribué à ces transformations, notamment en s'appuyant sur l'accroissement des connaissances sur le fonctionnement du peuplement végétal et sur le milieu qui l'environne, sur lesquelles peut s'appuyer le raisonnement des techniques, comme cela sera illustré dans les parties 2 et 3. L'agronomie a également participé à l'élaboration de nouvelles méthodes nécessaires pour aborder des échelles spatiales et des niveaux d'organisation autres que la parcelle (cf. partie 4). L'agronomie enfin s'est principalement développée autour d'une approche intégrée du champ cultivé pour que les systèmes de culture en évolution gardent une certaine cohérence. De manière forcément simplificatrice, on peut retenir trois éléments marquants de ce point de vue, exposés dans les trois sections ci-dessous.

» Importance d'une approche intégrée du fonctionnement du champ cultivé

Nombre des travaux menés en agronomie l'ont été en tenant compte, dès l'origine, de la dimension systémique du champ cultivé. Cependant, si cela n'avait pas été le

cas, la réalité de l'évolution de l'agriculture (voir l'introduction générale) y aurait contraint les agronomes. En effet, les critères sur lesquels l'activité agricole est jugée, et qui se sont pendant un temps limités à une évaluation des performances quantitatives de la production, se sont diversifiés. Ainsi, l'adaptation des techniques de culture à de nouveaux enjeux, la conception de systèmes de culture innovants, les évaluations *ex ante* d'innovations et les diagnostics sur les performances des systèmes de culture ont maintenant systématiquement plusieurs objectifs. Cette caractéristique vient, à côté des interactions évoquées en introduction de cette partie, renforcer le caractère indispensable d'une appréhension globale du fonctionnement du champ cultivé, qui amène elle-même à porter un regard particulier sur le raisonnement des techniques et sur leurs transformations.

Il en est ainsi de la démarche généralement adoptée pour réfléchir à l'introduction d'un changement technique dans les systèmes de culture : pour raisonner une technique de culture, il est nécessaire de prendre en compte l'ensemble du système et non pas seulement ce qui paraît *a priori* être dépendant directement de la technique, et de mettre l'accent sur les interactions, entre techniques et entre composantes du milieu, évoquées ci-dessus. La question de la simplification du travail du sol, développée dans l'*encadré 1.2* (voir aussi chapitre 9), en constitue un bon exemple, très actuel. Il apparaît clairement qu'on ne peut décider de l'intérêt qu'il y aurait à supprimer le labour qu'après avoir fait un bilan complet des intérêts et des limites de la technique en tenant compte de l'ensemble des éléments qui sont affectés (composantes du milieu, autres techniques culturales, gestion de la main-d'œuvre sur l'exploitation, etc.), et du contexte de chaque situation. Le bénéfice de ces techniques vis-à-vis de la lutte contre l'érosion, par exemple, n'aura aucun sens dans les régions peu sensibles à ce phénomène, où le préjudice environnemental pourra au contraire être augmenté par un recours accru à certains herbicides, imposé par un risque de salissement supérieur des parcelles conduites en TSL⁴. Au vu des connaissances actuelles, le fait que les techniques culturales sans labour « imitent » mieux les écosystèmes naturels que les systèmes labourés, ce qui est un argument parfois avancé pour les défendre, n'est pas fondé voire dangereux, et ne devrait pas se substituer à une réelle analyse coût/bénéfice, permettant d'identifier le domaine de validité de cette innovation. Cet exemple montre ainsi :

- que l'on gagne, pour chaque technique culturale, à distinguer son ou ses objectifs propres (ici améliorer la structure du sol, l'enfouissement de matières organiques ou minérales) et ses autres effets, directs, qui peuvent se révéler majeurs et justifier l'adoption ou le rejet de la technique considérée (sensibilité à l'érosion), mais aussi indirects, qui ne sont parfois perceptibles qu'à long terme et sont donc difficiles à appréhender (stockage du carbone, maintien de la biodiversité...) ;
- que les effets et les conséquences d'un changement technique ne concernent pas que la dimension agronomique et la parcelle, mais que chaque technique, chaque itinéraire technique affecte aussi le fonctionnement de l'exploitation voire son évolution, l'organisation du travail, les résultats économiques et les états de l'environnement écologique considérés à différentes échelles ;

4. Technique culturale sans labour.

Encadré 1.2. Un exemple du raisonnement d'un changement technique : la simplification du travail du sol.

Les travaux sur la simplification du travail du sol ne sont pas récents^a, mais les débats se sont intensifiés ces dernières années autour de la question de la suppression du labour, et de ce qu'il est convenu d'appeler les « techniques culturales simplifiées » (TCS) ou, mieux, les « techniques culturales sans labour » (TSL), car la suppression du labour n'est pas forcément synonyme d'une simplification du raisonnement technique^b. On a ainsi vu s'affronter des partisans et des opposants, plutôt radicaux, d'une suppression du labour. Cet affrontement est dans une certaine mesure caricatural, car il convient de remarquer que, loin d'être un ensemble de pratiques homogènes, les TSL balayent une gamme très large de niveaux de simplification du travail du sol, allant du travail superficiel au semis direct sous couverture végétale (SCV, voir Capillon et Séguy, 2002), avec dans certaines situations le recours occasionnel à un travail du sol profond — un décompactage par exemple. Ce constat a deux conséquences. D'une part, on doit s'interroger sur ce que représentent ces différents modes de travail du sol dans les statistiques portant sur l'adoption des TSL évoquées ci-dessous ; d'autre part et surtout, il faut relever que d'un point de vue agronomique, la dénomination « TSL », largement employée, est source de confusions puisque les états du sol obtenus par les différents types de pratiques ne sont pas correctement définis par l'expression « sans labour » (Corpen, 2004). Ce simple constat de la diversité des pratiques que recouvre une seule appellation milite déjà en soi pour une approche nuancée des TSL. Par ailleurs, le raisonnement agronomique amène à adopter une position prudente face à la question de l'opportunité des TSL, position qu'une mise en perspective historique peut éclairer.

Historiquement, l'araire était utilisé pour travailler le sol sans le retourner. Puis la charrue, qui le retourne systématiquement, a été inventée pour lutter contre les mauvaises herbes (Sigault, 1977), faciliter l'enfouissement des fumiers et améliorer l'état structural du sol. La suprématie du labour, longtemps considéré comme la technique de base du travail du sol, a commencé à être remise en cause à partir des années 1930, conduisant au développement des techniques sans labour pour répondre à différents enjeux :

- des situations environnementales problématiques comme celle des *dust bowls*, manifestations d'érosion éolienne aux USA (Biswas, 1984 ; Lal, 1999) ou d'érosion hydrique en Amérique du Sud (Lal, 2000, 2001) : les TSL sont en effet susceptibles de diminuer la sensibilité de la surface du sol aux phénomènes érosifs ;
- la conservation de la ressource en eau du sol dans les pays à faible rapport pluviométrie/évapotranspiration (O'Leary, 1996) : le labour est susceptible d'entraîner une augmentation de l'évaporation du sol ;
- l'amélioration de la productivité et de l'organisation du travail : le labour est coûteux en temps de travail, en énergie et en matériel (Donaldson *et al.*, 1996) ;
- la résolution de divers problèmes techniques comme la remontée de cailloux à la surface du sol ou la sensibilité à la battance de certains sols.

Les TSL et, dans certains cas, le semis direct ont ainsi permis de résoudre différents problèmes, dans des situations pour lesquelles le bilan à court terme entre les gains immédiats et visibles de la suppression du labour et ses inconvénients était à l'avantage des TSL. Cela a conduit à une augmentation très rapide des surfaces en semis direct à travers le monde, et on estime les surfaces concernées à 72 millions d'hectares en 2002 (Derpsch et Benites, 2003), avec une répartition très inégale selon les pays : 48 % des surfaces sont localisées en Amérique latine, 37 % aux États-Unis et au Canada, 12 % en Australie et 3 % dans le reste du monde.

Toutefois, dans l'état actuel des connaissances, ces éléments ne sont pas de nature à remettre en cause de manière totale l'intérêt du travail du sol profond par labour. En effet, les changements techniques liés à la simplification du travail du sol modifient profondément le fonctionnement du champ cultivé (Holland, 2004)^c. Les effets des TSL sur le milieu ainsi que les avantages et les inconvénients qui en résultent vont dépendre, pour chaque situation, des interactions entre ces différents processus sous l'effet des techniques culturales et du climat. Par ailleurs, ces modifications importantes du fonctionnement du champ cultivé se répercutent sur les autres techniques culturales, notamment sur la lutte contre les adventices avec, dans les situations fortement enherbées par des espèces favorisées par l'absence de retournement du sol, une augmentation de l'utilisation d'herbicides (Nalewaja 2001 ; Neve *et al.*, 2003), sur la gestion de la fertilisation azotée (Nario *et al.*, 2001), sur l'utilisation de cultures intermédiaires, voire de cultures associées (Calegari, 2001 ; de Tourdonnet *et al.*, 2003), sur la gestion de l'eau, etc.

a. Voir les synthèses déjà anciennes de Sebillotte, 1975 ; ITCF, 1976 ; Biswas, 1984 ; Monnier *et al.*, 1994, et le chapitre 9.

b. Carter, 1994 ; Inra, 2001 ; Thévenet *et al.*, 2002 ; Corpen, 2004.

c. Pour les modifications sur la température et l'humidité du sol, voir Bragagnolo et Mielniczuk, 1990 ; sur l'activité biologique du sol, Dalal *et al.*, 1991 ; Boyer *et al.*, 1999, 2001 ; Lupwayi *et al.*, 2001 ; sur l'état structural, Carter, 1994 ; El Titi, 2003a ; sur la matière organique du sol et le stockage du carbone, Guérif, 1994 ; Bayer *et al.*, 2002 ; Inra, 2002 ; sur les transferts d'eau, d'azote et de pesticides dans le profil, Barriuso *et al.*, 1994 ; Germon *et al.*, 1994 ; Clausen *et al.*, 1996 ; Radcliffe *et al.*, 1998 ; Jordan *et al.*, 2000 ; Findeling, 2001 ; Rose et Carter, 2003 ; sur les relations de compétition entre culture commerciale, plante de couverture et adventices, Ozier-Lafontaine *et al.*, 1998 ; Autray et Oliver, 2001 ; sur la biodiversité et la dynamique des populations de ravageurs, Kladivko, 2001...

– que l'intérêt d'une technique doit être étudié à différents pas de temps : la campagne culturale et les années qui suivent (évolution de la flore adventice, stockage du carbone, etc.) ;

– que les références seront nécessairement complexes et les réponses toujours nuancées du fait de la complexité du système et de l'importance des interactions.

Cette approche intégrée du fonctionnement du champ cultivé a également régulièrement amené les agronomes à élargir l'objet de leurs investigations, en prenant en compte de nouvelles interactions existant au sein du champ cultivé et auparavant sous-estimées. Cet élargissement peut être la conséquence d'une modification des manières de produire, qui engendre de nouvelles interactions, et/ou d'un accroissement dans nos capacités de compréhension du fonctionnement du champ cultivé. On peut citer ainsi une meilleure prise en charge des interactions entre fertilisation azotée et protection contre les maladies, ou encore des interactions entre conduite de la culture et choix variétal. L'encadré 1.3 développe ce dernier exemple et montre pourquoi les agronomes ont été récemment poussés à entamer avec les généticiens des travaux centrés sur l'adaptation de modèles de culture aux variétés, qui visent à développer des outils permettant de raisonner le couple variétés × conduite culturale (Goyne *et al.*, 1996 ; Asseng *et al.*, 2002), mais aussi une réflexion sur les variétés à développer compte tenu de l'évolution des systèmes de culture (Meynard et Jeuffroy, 2002). De tels travaux devraient déboucher à court terme sur des outils d'aide au raisonnement du choix variétal en fonction d'objectifs ou de contraintes de production, et sur une meilleure valorisation du couple variété ×

Encadré 1.3. Un exemple de l'élargissement du champ d'investigation en agronomie : l'intérêt porté au raisonnement du choix variétal.

Le choix variétal a été longtemps quasi inexistant dans le champ de travail des agronomes, ce qui explique la faiblesse des travaux passés définissant les modalités d'emploi des variétés. L'analyse de la diversité du comportement des variétés face au milieu était principalement l'apanage de généticiens et de statisticiens, travaillant sur l'analyse et la modélisation des interactions génotype $\times$ environnement (Van Eeuwijk *et al.*, 1996 ; Brancourt-Hulmel *et al.*, 1997). Récemment, le choix variétal est apparu comme un élément à part entière du raisonnement des agronomes, en particulier en lien avec l'évolution de leur cadre de travail, qui est passé d'une maximisation de la production, induisant une suppression des facteurs limitants, à la prise en compte d'une plus grande diversité de conditions de production, incluant des situations non optimales. Or, le choix de cultiver une variété pour ses caractéristiques propres a des conséquences directes sur les autres techniques culturales à mettre en œuvre. Ainsi Loyce *et al.* (2001) illustrent-ils sur céréales la forte influence de la variété cultivée sur le raisonnement des pratiques de protection des cultures : le développement de conduites plus économes en intrants et moins préjudiciables pour l'environnement repose sur l'utilisation de variétés présentant des résistances multiples et complémentaires aux maladies, permettant ainsi de réduire l'usage de fongicides. Sur le même plan, l'utilisation d'associations variétales de céréales (Belhaj Fraj, 2003 ; Finckh *et al.*, 2000) permet de réduire notablement l'utilisation de pesticides tout en garantissant un niveau au moins équivalent de rendement et de teneur en protéines, et un accroissement de leur stabilité entre parcelles et entre années. La gestion des mauvaises herbes sur une parcelle peut également être fortement influencée par le choix des variétés qui y sont cultivées. Ainsi, la précocité des variétés choisies (notamment celles des céréales d'hiver en Europe), qui influence directement la date de semis possible, peut modifier sensiblement la durée de l'interculture. Or celle-ci peut être utilisée pour lutter mécaniquement contre les adventices par différents travaux du sol superficiels favorisant les faux-semis (voir par exemple Johnson et Mullinix, 1995). Par ailleurs, les caractéristiques morphologiques des variétés influencent directement leur compétitivité vis-à-vis des adventices (Froud-Williams, 1997). Au-delà des aspects liés à la protection des cultures, le choix variétal interagit également avec les techniques de fertilisation et de travail du sol. Dans le raisonnement de la fertilisation azotée des céréales en Europe, la réalisation d'un dernier apport tardif destiné à enrichir les grains en protéines, pour satisfaire un critère qualitatif exigé par un marché, s'est particulièrement développée avec l'augmentation de l'utilisation de variétés ayant une aptitude à la panification. Aujourd'hui, l'ajustement de la fertilisation aux caractéristiques variétales constitue une voie de recherche importante (Van Sanford et Mc Kown, 1986 ; Le Gouis *et al.*, 2000 ; Oikeh *et al.*, 2003). Enfin, le développement des techniques culturales sans labour est actuellement limité dans certaines situations par la difficulté à maîtriser les infestations d'adventices. Le développement de variétés résistantes aux herbicides non sélectifs a ainsi été un levier très important de développement de ces techniques (Chevassus-au-Louis, 2001).

itinéraire technique pour lever ou contourner des facteurs limitants, améliorer les capacités d'intervention sur le champ cultivé en permettant de décaler certaines interventions (semis, traitements) à des dates où les conditions d'intervention sont plus satisfaisantes, ou tirer parti de nouvelles propriétés des variétés mises sur le marché.

►► L'évolution des techniques

La transformation des manières de produire est rarement caractérisée par l'émergence *ex nihilo* d'un nouveau système faisant un tout. Plus fréquemment, l'évolution est beaucoup plus progressive et résulte de l'intégration de connaissances et de règles de décision nouvelles dans un ensemble cohérent préexistant. Dans les trente dernières années, en même temps que s'accroissaient simultanément les connaissances sur le fonctionnement du champ cultivé et les capacités d'intervention par les agriculteurs (nouvelles variétés, nouvelles molécules, nouveaux outils de travail du sol...), le raisonnement des techniques a évolué pour passer de recommandations normatives à des recommandations plus fines basées sur des règles de décision, et ayant de plus en plus recours à des indicateurs de pilotage. Le cas de la fertilisation azotée des cultures annuelles en Europe, évoqué dans l'encadré 1.4, constitue un exemple caractéristique de cette évolution. La figure 1.2 résume l'évolution du raisonnement de cette technique au cours des trente dernières années. Cette évolution est marquée par une cohérence entre les innovations et les techniques antérieures auxquelles elles succèdent, et par un affinement progressif du raisonnement dans une « boucle de progrès ». La logique en a été la suivante : partant d'un corpus de connaissances, les méthodes se sont affinées grâce à l'augmentation progressive de ce capital qui a permis successivement de prendre en compte les caractéristiques particulières des parcelles, de limiter le handicap que constitue l'imprévisibilité du climat pour la gestion, et d'adapter les stratégies de fertilisation à des objectifs différenciés. On retrouve peu ou prou, avec des variantes bien sûr, les mêmes tendances d'évolution, pour le raisonnement des différentes techniques qui visent à satisfaire les besoins du peuplement en facteurs de croissance (fertilisation, irrigation, voir Tiercelin, 1998 ; Debaeke, 2003) et à assurer les conditions de croissance du peuplement (protection phytosanitaire, gestion du climat sous abri).

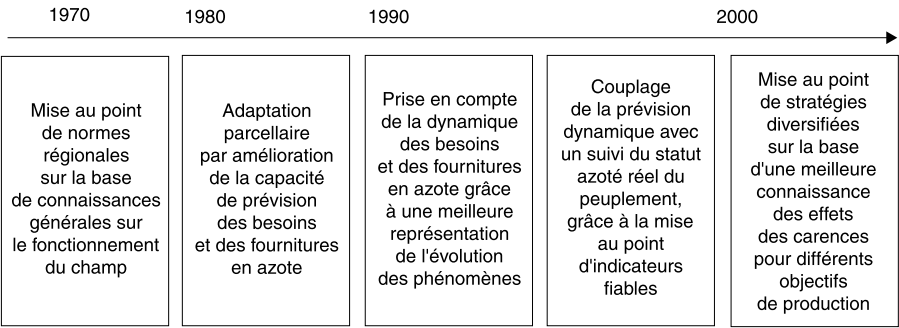


Figure 1.2. Évolution du raisonnement des techniques de fertilisation azotée en Europe au cours des trente dernières années.

Encadré 1.4. Un exemple d'évolution progressive des techniques : la fertilisation azotée des cultures en Europe.

Aujourd'hui, il existe de nombreux outils pour raisonner la fertilisation azotée des cultures. Leur mise au point a été progressive, et le plus souvent fondée sur une acquisition de connaissances nouvelles sur le cycle de l'azote dans le système « sol-culture-atmosphère » (cf. partie 3). La validité de recommandations normatives (une dose pour une culture dans une région), qui prévalaient dans les années 1970, s'est heurtée à une très grande variabilité des besoins en azote de la culture et des fournitures en azote du sol, se traduisant par une variabilité importante des courbes de réponse de la culture à l'azote entre parcelles, y compris au sein d'une même région (Boiffin *et al.*, 1981). La tendance était alors, pour les agriculteurs, de surestimer les besoins et les apports pour ne pas risquer de carence. Cette attitude a rapidement été jugée insatisfaisante pour des raisons agronomiques en raison des risques accrus de verse, malgré les progrès génétiques de résistance à ce phénomène, écologiques quand la relation entre pollution des nappes phréatiques et surfertilisation des cultures a été avérée, et économiques lorsque le rapport entre le coût des engrais et le prix de vente des récoltes a évolué défavorablement pour les agriculteurs.

Pour tenter de tenir compte de cette variabilité, sur laquelle pesait d'autant plus d'enjeux que l'évolution des itinéraires techniques conduisait à augmenter globalement les doses d'engrais, la méthode du « bilan prévisionnel pour le raisonnement de la fertilisation azotée », proposée par Rémy et Hébert (1977), a constitué une avancée importante. Elle vise à déterminer la dose totale d'azote à apporter sur une culture sur la base d'une confrontation entre ses besoins en azote, calculés en s'appuyant sur les rendements observés les années précédentes, et les fournitures en azote du sol, issues de références adaptées régionalement. Elle repose sur une représentation significativement améliorée du fonctionnement du système « sol-culture-atmosphère » par rapport à celle, très fruste, de la méthode normative des courbes de réponse ; elle y substitue une approche parcelle à une approche régionale des fournitures en azote par le milieu et du potentiel de production qui détermine les besoins. Cette méthode et ses dérivés, qui constituent à l'heure actuelle les outils de référence pour le raisonnement de la fertilisation azotée, a fait l'objet d'une adaptation du calcul des besoins à un grand nombre d'espèces (Meynard *et al.*, 1997a) et de raffinements dans l'estimation des fournitures par le milieu, en particulier pour la prévision de l'azote fourni par les résidus de la culture précédente (chapitre 7).

Les connaissances sur ces fournitures ont considérablement progressé grâce aux nombreux travaux sur la compréhension et l'identification des déterminants de la dynamique de l'azote minéral dans le sol, dont la quantification des biotransformations de l'azote telles que la minéralisation, l'organisation, la dénitrification... (Recous *et al.*, 1997 ; chapitre 7). L'ensemble de ces connaissances a été organisé et structuré dans des outils statistiques d'aide à la gestion de la fertilisation azotée, comme Azobil (Machet *et al.*, 1990). En continuité de ces acquis, une nouvelle phase a consisté à estimer les besoins du peuplement et les fournitures dynamiques par le milieu, ce qui a eu pour conséquence un fractionnement accru des apports d'engrais permettant de faire correspondre au mieux les besoins et les fournitures. Ce fractionnement permettait de répondre simultanément :

- à des préoccupations de type environnemental toujours plus pressantes, comme la limitation des pertes en azote du fait de la diminution des périodes où l'offre en azote du sol excède largement la capacité d'absorption de la culture ;
- à des préoccupations de type économique, car il permet généralement de mieux satisfaire les exigences commerciales en matière de teneur en azote des produits récoltés, un apport tardif d'azote, pratiqué depuis peu d'années, permettant en effet d'accroître la teneur en protéines des grains de blé.

Aujourd'hui enfin, la tendance générale de l'évolution des itinéraires techniques vers une diversification importante (poursuite de l'intensification dans certains cas, accroissement du nombre de systèmes extensifs, exigences de qualité marquées, obligation de réduire les pertes vers l'environnement) rend de plus en plus nécessaire une gestion encore plus précise de l'adéquation entre la dynamique des besoins et celle de l'offre. De ce fait, de nombreux indicateurs du sol ou de la culture ont été proposés pour permettre aux agriculteurs d'ajuster encore plus précisément la fertilisation aux caractéristiques de la parcelle (Smith *et al.*, 1990a), en pilotant la fertilisation au cours du cycle en fonction d'une estimation de l'état réel du peuplement. Ces outils de pilotage des cultures, basés sur des indicateurs d'état azoté, permettent de diagnostiquer une entrée en carence de la culture et de proposer un apport d'azote pour l'éviter. Ils permettent ainsi de mieux définir les dates d'apport et d'en ajuster les doses aux besoins de la culture : utilisation de la teneur en nitrates du jus de base de tiges (Justes *et al.*, 1997), estimation de la teneur en chlorophylle des feuilles par transmittance ou réflectance (Yadava, 1986 ; Turner et Jund, 1991 ; Denuit *et al.*, 2002), décoloration d'une placette semée à une densité double de celle du reste de la parcelle (Limaux *et al.*, 2001).

D'autres travaux récents, centrés sur l'analyse des effets de carences azotées intervenant à différentes périodes dans le cycle cultural (Jeuffroy et Bouchard, 1999), ont permis de montrer que certaines carences temporaires ne sont pas préjudiciables pour le rendement et peuvent même être bénéfiques pour la teneur en protéines des grains. Des stratégies de fertilisation azotée tolérant des carences ont donc été proposées, sur la base d'une utilisation de modèles dynamiques simulant à la fois l'évolution des fournitures d'azote par le sol, celle des besoins, et les conséquences de ces carences (Meynard *et al.*, 2002). L'utilisation de tels outils pour raisonner la fertilisation azotée dans des situations présentant de nombreux facteurs limitant la valorisation des engrais apportés^a bute aujourd'hui sur l'estimation précoce des facteurs limitants qui seront présents sur la parcelle, et sur leurs conséquences (David *et al.*, 2005b). La disponibilité de nombreux modèles dynamiques simulant l'accumulation d'azote dans la culture et les fournitures d'azote par le sol (de Willigen, 1991), ainsi que l'existence de nombreux outils de caractérisation de l'état d'une culture, semblent pouvoir être utilisés de manière complémentaire en vue d'améliorer le raisonnement de la fertilisation azotée. En effet, de nouvelles méthodes statistiques, couplant l'utilisation de modèles dynamiques et les mesures en cours de culture, peuvent permettre d'améliorer la qualité prédictive des modèles, et donc leur capacité décisionnelle (Makowski *et al.*, 2004).

a. Comme en agriculture biologique, mais également dans des systèmes conventionnels moins intensifs où certains facteurs limitants sont tolérés et modifient l'efficacité d'utilisation de l'engrais apporté.

► Prise en compte de différents pas de temps et échelles d'espace dans la conception et l'évaluation des systèmes de culture

L'évolution de l'agriculture au cours des cinquante dernières années, dans les pays industrialisés, s'est traduite par une artificialisation importante du processus de production. On entend par là que les agriculteurs ont eu de plus en plus recours à des apports exogènes au système pour transformer les processus naturels — ils ont aussi transformé les propriétés du milieu de manière durable — à travers des

aménagements permanents, comme l'installation de drains dans les parcelles cultivées. Les utilisations d'engrais de synthèse (apparition dans la seconde moitié du XIX^e siècle, accroissement massif de leur usage dans la seconde moitié du XX^e siècle) et de produits phytosanitaires minéraux puis de synthèse (seconde moitié du XX^e siècle pour ces derniers), en constituent les points majeurs. Ces apports ont provoqué une perturbation des cycles « naturels », à la fois biogéochimiques en ce qui concerne les éléments minéraux, et écologiques en ce qui concerne les populations et communautés d'être vivants (bioagresseurs, auxiliaires et commensaux, flore et faune du sol). Altieri (1999) souligne que ce processus engendre sa propre accélération : l'artificialisation provoque une diminution de biodiversité, cette dernière entraînant un besoin accru d'intrants externes, du fait que certaines fonctions, qui étaient assurées lorsque la biodiversité était suffisante, ne le sont plus.

Ces perturbations ont eu d'indéniables effets environnementaux et écologiques (cf. l'introduction générale). La prise de conscience des conséquences négatives d'une certaine artificialisation du milieu par l'agriculture a entraîné, au cours des deux ou trois dernières décennies, le développement de travaux visant non seulement à réduire les effets néfastes à court terme, mais aussi à évaluer les effets à long terme des pratiques agricoles sur le milieu. Comme d'autres disciplines (la science du sol par exemple) et en interaction avec elles, l'agronomie s'est ainsi préoccupée de pas de temps longs. Ces travaux, qui combinent souvent expérimentation à long terme et modélisation, concernent au premier chef les éléments du système cultivé qui conservent une certaine « mémoire », autrement dit ceux pour lesquels les cycles d'évolution concernent des pas de temps supérieurs aux pas de temps coutumiers de l'agriculture, l'année culturale ou la rotation. Ainsi, au centre de nombreuses études se trouvent les matières organiques des sols, dont l'évolution contribue en particulier aux flux de carbone et d'azote dans la biosphère, et dont on cherche à comprendre le devenir sous l'effet de différentes pratiques comme, par exemple, le type d'utilisation du sol⁵. L'évolution des composantes hydrique (par exemple Huang *et al.*, 2003) et minérale (Withers *et al.*, 2001, sur le phosphore) fait également l'objet d'analyses. Enfin, de manière plus récente, l'effet des systèmes de culture sur les composantes biologiques du milieu⁶ est également étudié. Dans certains travaux, plusieurs variables évoluant sous l'effet des pratiques sont analysées simultanément, comme par exemple par Tebrugge et During (1999), comparant les conséquences de différents types de travail du sol sur les évolutions des composantes physiques, chimiques et biologiques du milieu. Des investigations sont également menées au-delà de l'échelle de la parcelle (par exemple Jankauskas et Jankauskiene [2003] sur l'effet de la succession de cultures sur l'érosion). Ces éléments ne sont donnés ici que pour mémoire ; les connaissances qui en sont issues feront l'objet de développements ultérieurs dans les parties 3 et 4 de cet ouvrage.

L'artificialisation de la production a également eu pour conséquence une moindre attention aux phénomènes de régulation naturelle (résilience des milieux, régulation des populations), et à leurs conséquences sur la gestion temporelle des

5. Voir par exemple l'appréhension des effets de la jachère par Bosma *et al.* (1999), ou encore Abadin *et al.* (2002).

6. Par exemple Berkelmans *et al.*, 2003, sur les populations de nématodes, Swanton *et al.*, 1999 ou Bàrberi et Lo Cascio, 2000, sur la flore adventice.

parcelles cultivées. Ainsi, les effets d'une culture sur la ou les suivantes, qui constituaient historiquement le fondement des choix de successions de cultures à travers la notion de rotation (retour régulier du même motif de succession de cultures sur une parcelle⁷) et déterminaient une partie des choix de conduite des cultures, ont été assez négligés au cours des dernières décennies dans ces agricultures fortement artificialisées. Il n'en allait bien sûr pas de même dans les agricultures à faible niveau d'intrants, qu'il s'agisse des systèmes « non conventionnels » (en particulier l'agriculture biologique, voir Robson *et al.*, 2002) dans les pays industrialisés, ou des systèmes paysans des agricultures familiales des pays en voie de développement (voir par exemple l'analyse de Cochet [2001] sur des systèmes vivriers d'Afrique centrale). La diversification des « modèles » d'agriculture dans les pays industrialisés d'une part, l'attention accordée aux agricultures paysannes dont on souhaite accroître la productivité sans entraîner de conséquences négatives sur le plan environnemental et écologique d'autre part, ont amené les agronomes à donner une nouvelle impulsion aux travaux relatifs aux successions de cultures. Ces travaux ont pris deux directions complémentaires : celle d'une meilleure évaluation des effets d'une culture sur la ou les cultures suivantes et celle, beaucoup moins développée, de la mise au point simultanée de règles de gestion de plusieurs cultures qui se suivent sur une même parcelle.

Dans les deux cas, les travaux bénéficient de l'analyse des relations entre deux cultures qui se suivent, réalisée par Sebillotte (1980b, 1990a), qui a en particulier introduit la notion d'« effet précédent », développée dans l'encadré 1.5. Cette notion, qui place les états du milieu au centre de l'analyse, est directement engendrée par la vision du champ cultivé évoquée ci-dessus : si l'on veut comprendre les effets d'une culture sur la suivante, il faut comprendre les mécanismes d'évolution des composantes physiques, chimiques et biologiques du champ cultivé sous l'effet des techniques appliquées à une culture, et les conséquences pour la culture suivante. Bullock (1992) recense ainsi les états du milieu qui sont susceptibles d'être modifiés par des changements de successions de cultures. Cette vision des relations entre des cultures qui se suivent est de nature à permettre une meilleure prise en compte des régulations évoquées ci-dessus. Par ailleurs, parce que les modifications d'états du milieu ne sont pas liées uniquement à la nature de la culture précédente mais également à l'itinéraire technique qui lui a été appliqué, il est nécessaire de ne plus seulement s'intéresser à un effet moyen, mais à la gamme des effets qui sont liés à une gamme de pratiques (Doré, 2000). En fonction des techniques qui sont appliquées à cette culture, les transformations d'états seront différentes : le fait de labourer ou non pour préparer le semis va modifier la structure, les quantités d'éléments minéraux dans le sol en fin de culture vont dépendre du niveau de fertilisation, etc. Cette variabilité des effets de la culture précédente sur la culture suivante était encore jusque récemment peu considérée. C'est l'une des raisons pour lesquelles l'affirmation de Karlen *et al.* (1994) : « Déterminer comment les facteurs associés à la succession des cultures interagissent et contribuent à l'« effet rotation », généralement non défini, continuera manifestement à constituer un défi majeur pour la recherche » reste encore largement valide ; une autre raison est liée

7. Bullock, 1992.

Encadré 1.5. La notion d'« effet précédent ».

La notion d'« effet précédent » est le produit d'une volonté de dépasser l'appréhension des effets d'une culture sur la suivante à travers des relations établies expérimentalement entre nature de la culture précédente et rendement de la culture suivante (par exemple Peterson *et al.*, 1990). Ces expérimentations donnent des résultats intéressants et permettent de réaliser des classements moyens des effets d'une culture sur le rendement de la suivante. Ceux-ci sont cependant difficilement extrapolables puisque limités à un milieu et à un type de pratique — ceux qui caractérisent l'expérimentation : on ne sait à quelles situations agricoles les résultats obtenus peuvent être étendus (Sebillotte, 1966), qui varient d'une situation expérimentale à l'autre (voir par exemple Porter *et al.*, 1997). Par ailleurs, l'interprétation des effets moyens d'une culture sur la suivante reste très délicate en l'absence de mesures des effets sur le milieu ; elle est aussi très réductrice car elle ne tient pas compte de la variabilité de ces effets, souvent importante (Doré, 2000). Le rendement de la culture suivante n'est ainsi pas le produit immédiat de la présence du précédent cultural : il n'y a pas plus de relation systématique entre précédent cultural et rendement de la culture suivante que de relation entre technique et rendement (voir Sebillotte, 1982, et un exemple récent dans Wilhelm et Wortmann, 2004). Pour comprendre les relations entre deux cultures qui se suivent, Manichon et Sebillotte (1973), puis Sebillotte (1980, 1990a) ont proposé de considérer le rendement de la culture suivante comme l'interaction de deux phénomènes :

- l'effet du précédent cultural sur le milieu cultivé (l'« effet précédent ») ;
- l'élaboration du rendement de la culture suivante en fonction des états du milieu laissés par le précédent cultural, de l'itinéraire technique appliqué et du climat (la « sensibilité du suivant »).

Les travaux portant sur une meilleure compréhension des effets précédent se sont multipliés ; ils visent à identifier les mécanismes d'évolution du milieu résultant de la présence de la culture précédente et de sa conduite^a, ce qui constitue une amélioration importante de l'approche par rapport à une analyse réduite à un effet du précédent cultural sur le rendement de la culture suivante. Les travaux sont menés soit par catégorie d'espèces — les travaux sur les effets précédent des légumineuses sont par exemple très nombreux —, soit par composante du milieu, par exemple la dynamique de l'azote. De plus en plus, cette analyse des effets précédent inclut des effets non intentionnels qui se répercutent sur l'environnement et non sur le fonctionnement de la culture suivante (par exemple Jensen et Haugaard-Nielsen, 2003, sur les conséquences de la fixation d'azote atmosphérique par les légumineuses).

a. Voir par exemple Evans *et al.*, 2001 sur l'effet des légumineuses en zone tempérée, ou encore Robson *et al.*, 2002, sur la diversification des successions de culture en agriculture biologique tempérée.

à la récente prise de conscience de l'importance des phénomènes biologiques ou physico-chimiques organiques entrant dans les interactions entre deux cultures qui se suivent (Ryszkowski *et al.*, 1998 ; Anaya, 1999)... et de la difficulté à les étudier (Blum *et al.*, 1999).

En ce qui concerne la gestion de successions de cultures, c'est-à-dire le raisonnement technique portant sur des pas de temps supérieurs à l'année culturale et qui comporte à la fois le choix des successions de cultures et le choix des itinéraires techniques successifs pratiqués sur ces cultures, les travaux sont encore assez peu

développés. Jusqu'à présent, les études menées sur les successions de cultures ont souvent implicitement fait une triple hypothèse :

- les successions de cultures menées par les agriculteurs sont stables dans le temps ;
- le raisonnement pour une succession de cultures sur une parcelle peut être mené indépendamment du raisonnement sur les autres parcelles ;
- les agriculteurs gèrent leurs cultures successives sur une parcelle assez indépendamment les unes des autres.

Ces hypothèses permettent ainsi d'utiliser assez facilement des modèles pour faire des simulations des effets de systèmes de culture à long terme (Plentinger et Penning de Vries, 1996 ; Keating *et al.*, 2002), puisqu'elles en épousent les intérêts et les limites. Or, on sait que les deux premières hypothèses sont assez simplificatrices par rapport à la gestion réelle des successions de cultures par les agriculteurs (voir chapitre 2 et Connor, 2001), et que la troisième doit être dépassée pour tenir compte de la réalité des effets précédent (cf. *supra*). Quelques travaux visant à évaluer différents systèmes de culture, sur différents aspects (économie, environnement, temps de travail...) commencent cependant à apparaître (Debaeke et Nolot, 2003). Des travaux complémentaires (comme ceux de Bellon *et al.*, 2001, en verger) sur les logiques d'action des agriculteurs à l'échelle pluriannuelle sont donc nécessaires, qui devraient s'articuler avec les résultats produits sur les effets précédent et à long terme des systèmes de culture, en cours d'acquisition, pour permettre de bâtir de véritables outils de gestion des systèmes de culture, comme il en existe à l'échelle de l'itinéraire technique.

Comme évoqué en introduction de cet ouvrage, sur le plan spatial, les échelles auxquelles s'intéresse l'agronomie ont également beaucoup évolué au cours des dernières décennies. La question des échelles spatiales englobantes par rapport à la parcelle fait l'objet du chapitre 10. Nous ne ferons donc ici que mentionner les phénomènes affectés par les actions de l'homme qui nécessitent une telle approche. Ces phénomènes sont d'abord ceux qui impliquent des flux physiques entre parcelles. Les flux d'eau sont particulièrement importants à considérer, non seulement du point de vue de la répartition de la ressource (surtout quand celle-ci devient limitante, même si ce n'est qu'à certaines périodes de l'année [Leenhardt *et al.*, 2004a]), mais aussi parce que la capacité de l'eau à être chargée en éléments minéraux (nitrates), en molécules organiques (résidus de pesticides) et en matières en suspension (particules terreuses) — qui se déplacent donc d'une parcelle à l'autre — nécessite de considérer des ensembles de parcelles et non des parcelles isolées pour résoudre les questions environnementales posées par ces éléments en suspension (voir par exemple Martin et Meynard, 1997). Des transferts de parcelles à parcelles s'effectuent également par voie aérienne, ce qui justifie de s'intéresser aux interactions entre parcelles du fait de la disposition de celles-ci dans le paysage (Colbach *et al.*, 2001) ou des interactions entre les techniques mises en œuvre sur des parcelles voisines, pour les questions impliquant les flux de graines de mauvaises herbes ou les flux de pollen. Enfin, comme le soulignent par exemple Altieri (1999), Baudry et Papy (2001) ou plusieurs auteurs dans l'ouvrage de Rickerl et Francis (2004), les effets — positifs ou négatifs — des pratiques agricoles sur la biodiversité, et en particulier sur la biodiversité animale (mais en lien très fort avec la biodiversité végétale, voir le rôle des adventices dans Marshall *et al.*, 2003), ne peuvent être

Encadré 1.6. Un exemple du développement de la gestion des hétérogénéités spatiales : l'agriculture de précision.

L'agriculture de précision est apparue dans les années 1990 aux États-Unis puis a été diffusée en Europe. Elle consiste à moduler les actions agricoles au sein même d'une parcelle en tenant compte de ses hétérogénéités de sol, d'état de la culture... Cette modulation impose :

- de quantifier l'hétérogénéité intraparcellaire, c'est-à-dire de préciser, pour chaque point ou maille élémentaire du champ, les valeurs prises par des variables agronomiques — richesse du sol en éléments minéraux, profondeur du sol, présence de mauvaises herbes... — ayant un effet sur le raisonnement des techniques ;
- d'enregistrer ces données de manière fiable sous forme de cartes géoréférencées ;
- de disposer d'un outil pouvant moduler ses actions, comme l'application d'une dose de semences ou d'un produit phytosanitaire, en fonction de sa position géographique et des variables agronomiques relatives à cet endroit ;
- de connaître, à tout instant, la position de la machine dans le champ (cette étape n'est pas nécessaire si des capteurs peuvent transmettre instantanément des valeurs des variables auxquelles la machine est capable de répondre immédiatement) ;
- d'utiliser ces données pour prendre des décisions modulées.

C'est le développement concomitant de la miniaturisation des moyens informatiques — permettant d'en équiper les tracteurs et les machines — d'une part, et des systèmes de positionnement géographique utilisant des données satellitaires d'autre part, qui a permis l'essor de l'agriculture de précision. Néanmoins, le développement de celle-ci est lent du fait des difficultés rencontrées pour la mise au point des capteurs permettant l'enregistrement simple et automatisé de variables agronomiques, et des machines permettant la modulation effective des techniques qui n'est que progressive, et du fait de la nécessité de repenser les raisonnements agronomiques en fonction des nouveaux outils, l'agriculture de précision engendrant donc des travaux d'agronomie spécifiques^a. Ainsi la variable agronomique spatialisée dont disposent le plus facilement et, jusque récemment, souvent exclusivement les agriculteurs reste-t-elle le niveau de rendement obtenu, qui constitue une information difficile à valoriser si elle n'est pas accompagnée d'autres renseignements plus analytiques (voir Jiang et Thelen, 2004) ; un autre outil qui tend à se développer est la caractérisation des différences intraparcellaires de type de sol sur la base de mesures de résistivité électrique. Les capteurs peuvent toutefois être complétés par des données enregistrées manuellement par l'agriculteur et, à terme, par des observations satellitaires fournissant des informations sur l'état du champ ou de la culture. Enfin, lorsque les capteurs et les machines sont disponibles, le diagnostic permettant de relier la production aux caractéristiques de la parcelle reste un point faible, ces approches ayant été peu développées. Par ailleurs, les règles agronomiques qui doivent présider à l'utilisation des informations pour adapter les techniques ne sont pas toujours établies. En effet ces règles, par exemple le raisonnement d'une dose d'engrais à apporter, ont été établies à partir d'un raisonnement valable pour une grande surface, mais pas forcément transposable à une échelle différente. La plus grande finesse que permet la modulation spatiale des pratiques agricoles dans la gestion des conséquences environnementales de la production (Pierce et Nowak, 1999) pourrait constituer, à l'avenir, un moteur pour le développement de l'agriculture de précision, au-delà des effets des politiques agricoles sur la rentabilité des équipements.

a. Voir Bouma *et al.*, 1997 ; Boone *et al.*, 1997 ; Lake *et al.*, 1997, la revue *Precision Agriculture*, ainsi que les comptes-rendus des *International Conferences on Precision Agriculture*.

correctement compris que si on dépasse l'échelle de la parcelle pour tenir compte d'une part des mouvements de populations entre parcelles, et d'autre part des structures paysagères non productives (haies et bordures en particulier, voir Marshall et Moonen, 2002, et chapitre 10) et de l'agencement des cultures dans l'espace.

Faisant pendant en quelque sorte à ces approches « multiparcellaires » (qui englobent également des éléments autres que les parcelles comme les bordures de champ ou les haies), l'agronomie s'intéresse également à la prise en compte de l'hétérogénéité intraparcellaire dans le raisonnement des techniques. On considère souvent et trop hâtivement que la parcelle est l'échelle unique à laquelle le raisonnement des techniques est tenu. Or on sait que les techniques ont des effets hétérogènes sur le milieu ou sur le peuplement végétal d'une parcelle, ne serait-ce que parce qu'elles ne peuvent être uniformément appliquées (hétérogénéité d'épandage de substances phytosanitaires par exemple) ; que le milieu en lui-même est hétérogène du point de vue de ses composantes permanentes ; qu'il existe des variations d'état qui se produisent de manière hétérogène en dehors des applications des techniques (diffusion des maladies en foyer, hétérogénéité de comportement des sols sous l'effet du climat par exemple). Cette hétérogénéité intraparcellaire peut avoir des conséquences négatives sur la production et l'impact environnemental de l'activité agricole (de Tourdonnet *et al.*, 2001). Dans certaines agricultures, ces variations à l'intérieur de la parcelle sont exploitées par les agriculteurs, en particulier lorsque les activités sont majoritairement manuelles (Mathieu, 2005). Chaque technique appliquée demande alors une durée importante pour être réalisée sur toute la parcelle, et l'agriculteur valorise les différences intraparcellaires de milieu de manière à choisir, pour chaque zone de la parcelle, la date d'intervention la plus opportune. Dans d'autres situations, il s'agit de créer cette variabilité, de manière structurée, afin de tirer parti des synergies qu'elle produit : c'est le cas dans les systèmes d'agroforesterie, dans lesquels on cherche à faire bénéficier les cultures d'effets induits par la présence des arbres (Schroth et Sinclair, 2003). Enfin, dans les agricultures artificialisées se sont développés des travaux de recherche et, parallèlement, des pratiques agricoles donnant naissance à l'« agriculture de précision », évoquée dans l'encadré 1.6.