

La modélisation du fonctionnement de l'agrosystème, base de la mise au point d'itinéraires techniques et de systèmes de culture

Jean-Marc Meynard

Introduction

La globalisation des marchés, la pression démographique, la sensibilité croissante des populations aux dégradations de l'environnement entraînent, dans de nombreuses régions du monde, une remise en cause des systèmes de culture actuels. Le diagnostic est très divers : les systèmes agricoles sont, ici trop productifs, là pas assez ; ici, ils induisent des excédents d'éléments minéraux et polluent les eaux, là, ils créent des déficits et appauvrissent les sols ; ici, ils sont trop peu flexibles face à un contexte très changeant, là ils obtiennent des résultats trop aléatoires face à une demande peu flexible, etc. Mais pour l'agronome, la question scientifique de fond est partout sensiblement la même : *Comment valoriser la formidable masse de connaissances sur le fonctionnement des sols, des plantes, des agrosystèmes, pour proposer aux agriculteurs des systèmes innovants, adaptés aux exigences des populations, rurales et urbaines, et du marché ?*

Jusqu'ici, la dynamique d'évolution des systèmes de culture a dépendu surtout de l'empirisme des agriculteurs, adaptant à leur situation, combinant avec astuce, en tâtonnant, les innovations proposées par leurs voisins, les firmes

d'agrochimie ou... les agronomes ; mais l'accélération du changement technique et social, les incertitudes économiques croissantes, le poids déterminant — particulièrement dans les pays du Nord — de contraintes administratives souvent révisées font que les agriculteurs n'ont plus le temps de mettre au point, par ajustement progressif, les systèmes de culture adaptés à leurs objectifs et au contexte ambiant. Au demeurant, cette mise au point est de plus en plus complexe puisque, aux objectifs classiques de productivité et de préservation de la fertilité des milieux, s'ajoutent maintenant les objectifs relatifs à l'environnement et à la santé du consommateur (et du paysan), menacés par l'accroissement des moyens techniques disponibles (mécanisation, pesticides, fertilisants, etc.).

Pour aider les agriculteurs à mettre au point ces nouveaux modes de production, aux objectifs multiples et souvent contradictoires, l'agronome ne peut plus se fonder sur la seule expérimentation comparative, qui fut longtemps son plus solide point d'appui : celle-ci ne permet pas, en effet, d'obtenir les réponses rapides, ajustées à la diversité des situations agricoles, qui sont nécessaires. La figure 1 illustre, sur l'exemple de la fertilisation azotée, les limites d'une démarche exclusivement fondée sur l'expérimentation : dans une même région (Champagne Crayeuse), sur des types de sols peu contrastés (rendzines sur craie), pour un précédent cultural identique (betterave sucrière), la courbe de réponse du rendement du blé à la fertilisation azotée est extrêmement variable, d'une année à l'autre, aussi bien que d'une parcelle à l'autre (d'après Meynard *et al.*, 1981). La dose d'engrais assurant la marge brute maximale varie, selon les essais, de 0 à 200 kg/ha (100 à 200 kg si l'on excepte l'année très sèche où les courbes de réponse sont quasiment plates). Quel conseil donner à l'agriculteur ? Vu les rapports de prix entre le grain et les engrais, l'agriculteur perd beaucoup plus d'argent si la dose est trop faible que si elle est trop élevée ; pour lui, la minimisation du risque économique consiste donc à « faire comme si » le rendement allait être élevé, les besoins de la culture forts et la dose d'engrais nécessaire importante ; la variabilité des réponses à l'engrais est donc source de gaspillages et de pollutions potentielles. Pour réduire coûts et pollutions, l'agronome cherche à expliquer cette variabilité et à mettre au point les conseils les mieux adaptés, au cas par cas. Répéter dans ce but l'expérimentation en de nombreux lieux, pendant de nombreuses années, est coûteux et long : trop long dans un contexte où les innovations techniques, les cours du marché et les contraintes administratives changent constamment les règles du jeu ; trop coûteux dans un contexte où les moyens humains et financiers du développement agricole sont, au mieux, en stagnation.

La prévision de la diversité des effets des actes techniques sur la production, la fertilité du sol et l'environnement, peut aujourd'hui s'appuyer sur des

modèles de fonctionnement des cultures et d'évolution du milieu (Sebillotte, 1978, 1990 ; Fisher, 1985 ; Meynard, 1985 ; Whisler *et al.*, 1986 ; Vandendriessche & van Ittersum, 1995 ; Bouman *et al.*, 1996), actuellement en développement très rapide.

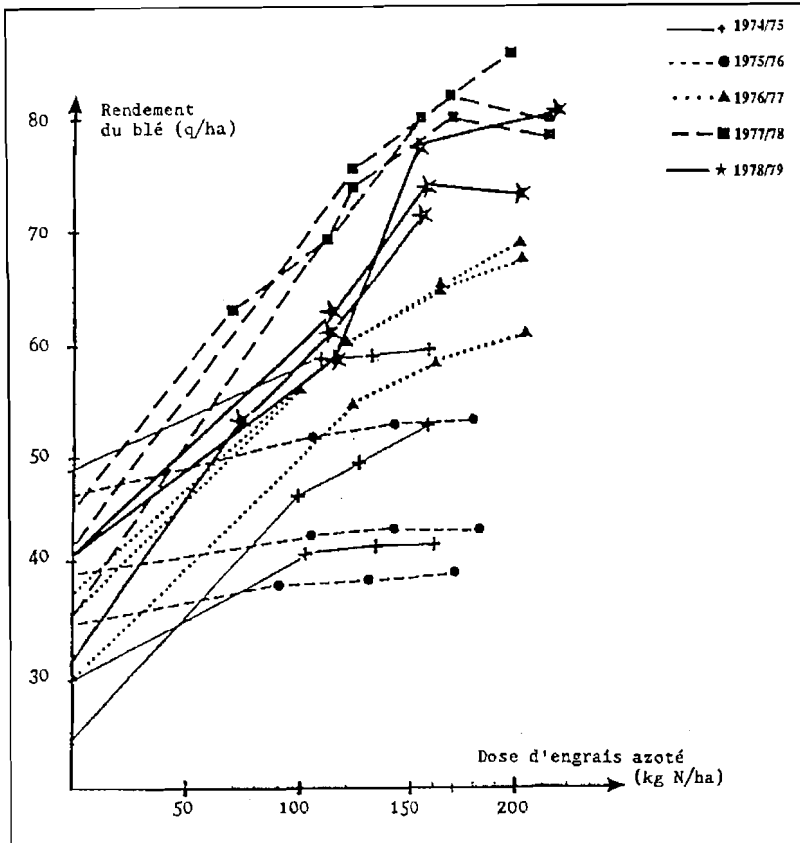


Figure 1 — Variabilité de la réponse du rendement à la dose d'engrais azoté.
Source : Meynard *et al.*, 1981, cinq années d'expérimentation en champagne crayeuse.

L'objectif de ce texte est de faire le point sur les potentialités et les difficultés méthodologiques d'une telle utilisation de la modélisation de l'agrosystème pour le raisonnement des techniques culturales, itinéraires techniques et systèmes de culture. Dans une première partie, nous dégagerons, à partir de l'analyse d'exemples très divers, les points forts de la démarche ; dans une seconde partie, nous passerons en revue les difficultés méthodologiques qui font actuellement l'objet de recherches à l'Inra.

Démarche générale : étude de quelques exemples

Nous nous situerons d'abord au niveau d'un espace agricole conduit de manière homogène par l'agriculteur (la parcelle ou une partie de parcelle) où nous analyserons quelques exemples de mise au point de techniques, itinéraires techniques et successions de cultures ; nous envisagerons ensuite le raisonnement de l'organisation spatiale des systèmes de culture.

Raisonnement des techniques, itinéraires techniques et systèmes de culture

La méthode Jubil pour la fertilisation azotée du blé

La teneur en nitrate du jus obtenu par pression de la base de tige (JBT) est maintenant utilisée en routine comme indicateur de nutrition du blé et critère de déclenchement d'apport d'engrais (Laurent *et al.*, 1996). La méthode de fertilisation Jubil, qui utilise ce critère, consiste à appliquer en deux apports précoces (tallage et début montaison) une dose d'engrais calculée sur la base du bilan prévisionnel et correspondant approximativement à la borne inférieure de l'ensemble des doses optimales évoquée plus haut ; pendant la montaison, on suit la teneur en nitrate du jus de base de tige (NO_3^- JBT ; trois stades de mesures) et un troisième apport d'engrais est déclenché selon la règle suivante :

- si la teneur descend au-dessous d'un seuil de référence, application immédiate d'un complément de fertilisation ;
- si la teneur se maintient au-dessus du seuil, pas d'application supplémentaire d'engrais.
- Bien que l'assimilation du nitrate soit un sujet bien connu des physiologistes, la mise au point d'une telle règle de décision a nécessité d'importantes recherches (Justes, 1993 ; Justes *et al.*, 1997 ; Meynard *et al.*, 1997) :
 - *étude des qualités de l'indicateur de nutrition* : sensibilité (la teneur en nitrate du JBT permet-elle de détecter dès son début, l'installation d'une carence ?), spécificité (la teneur en nitrate du JBT ne baisse-t-elle pas sous l'effet d'autres facteurs que la baisse d'alimentation azotée ?), etc. ;
 - *modélisation prédictive de la réponse de la culture à l'engrais selon la teneur en nitrate du jus de base de tige* : au-dessous de quelles teneurs les

composantes du rendement, la qualité du grain, sont-elles affectées par la carence ? Cette teneur varie-t-elle en fonction du génotype du blé ou des conditions environnementales ? ;

– *conception de la règle de décision* : quelle teneur-seuil doit-on retenir pour le déclenchement de la fertilisation ? Quelle dose d'engrais complémentaire apporter ? La réponse à ces dernières questions doit s'appuyer à la fois sur les modèles évoqués au paragraphe précédent et sur une connaissance précise des objectifs et des contraintes des agriculteurs : quels sont, par exemple, les délais entre un diagnostic et une intervention ? Quels risques de sous-fertilisation accepteraient de prendre les agriculteurs ? À cette étape, une collaboration étroite entre les agronomes et les futurs utilisateurs de la règle est nécessaire ;

– *évaluation de la règle de décision* : la règle donne-t-elle au champ les résultats attendus ? Le tableau 1 illustre les résultats de la comparaison, sur un réseau d'essais, entre l'application de la méthode du bilan prévisionnel, seule, et l'application de Jubil. L'indicateur NO_3^- JBT et la règle de décision associée permettent d'économiser en moyenne 22 kg d'azote-engrais, et de réduire la quantité de nitrate restant dans le sol après récolte sans diminuer le rendement ou la teneur en protéines.

Itinéraires techniques du blé

L'utilisation de modèles pour la conception d'itinéraires techniques est moins avancée que pour le raisonnement de simples techniques, car on a besoin de modèles plus intégratifs, plus complexes. Une part importante de la recherche doit ainsi être consacrée à la *modélisation des interactions entre techniques culturales*, ainsi que l'illustrent les travaux sur l'ajustement des *itinéraires techniques* du blé à différents objectifs de rendement (Meynard, 1985 ; Loyce & Meynard, 1997). Dans des milieux à fort potentiel de production, où les agriculteurs visent couramment — et atteignent — des rendements de 90 q/ha ou plus (par exemple Soissonnais, Champagne Crayeuse), il peut être intéressant d'un point de vue économique et environnemental, de réduire l'objectif de rendement à condition de l'accompagner d'un changement de variété, de densité de semis, de fertilisation azotée, de traitements régulateurs de croissance et fongicides (tabl. 2). Il y a cohérence entre ces différentes adaptations : les réductions de densité et de dose d'azote limitent les risques de verse et de maladies, contribuant aux économies de régulateurs de croissance et fongicide ; la baisse d'objectif de rendement permet aussi l'adoption de variétés moins productives, mais plus résistantes aux maladies. Cette cohérence est assurée par le fait que tous ces changements sont raisonnés sur la

Tableau 2
Cohérence entre l'objectif de rendement et l'itinéraire
technique du blé (d'après Meynard, 1985)

Objectif de rendement	90 q/ha	70 q/ha
Choix variétal	Génotype productif (peu résistant aux maladies) Ex : Soissons	Génotype très résistant aux maladies (moins productif) Ex : Pactole, mélanges de variétés
Densité de semis	X (*)	X - 30 %
Fertilisation azotée	Y (**)	Y - 45 kg N/ha
Régulateurs de croissance	1 ou 2	0
Traitements fongicides	2 ou 3	0 ou 1

(*) Fonction de la date et des conditions de semis

(**) D'après la méthode des bilans : [Besoins en N (270 kg/ha) - Fourniture du sol]

Maîtrise du piétin-verse dans les successions de cultures

La même démarche peut être appliquée à la mise au point de stratégies pluri-annuelles : définition des *successions de cultures* répondant à un objectif donné, *conduite coordonnée de plusieurs cultures successives*. Colbach *et al.* (1997) proposent ainsi un modèle de prévision de l'effet des systèmes de culture sur les maladies telluriques des céréales qui constitue un outil précieux pour la mise au point de systèmes de culture intégrés. Par exemple, par rapport à une situation de référence, courante dans l'Ouest de la France (succession maïs-blé, labour tous les ans, semis au 15/10 à densité de 300 plantes/m²), le risque de piétin-verse du blé diminue notablement si l'on ne cultive plus le blé qu'une année sur trois, ou si l'on change la tête de rotation (remplacement du maïs par du pois ou du colza), ou si l'on remplace le labour avant blé par un travail superficiel ou si l'on retarde le semis d'un mois (tabl. 3). Le fait que ces diminutions de risques soient évaluées à l'aide d'un modèle fondé sur une connaissance des mécanismes en cause dans l'infection et le développement de la maladie donne une meilleure garantie, vis-à-vis de leur extrapolation, que si elles reposaient sur une moyenne de résultats expérimentaux : ainsi, la diminution du risque en travail superficiel par rapport au labour est liée à l'effet de ces techniques sur la localisation, dans le profil cultural, des résidus infectieux. Ceci permet de dire, par exemple, que l'on n'observera pas le même effet quelle que soit la succession de cultures ; si le

blé revient tous les trois ou quatre ans dans la parcelle, l'effet du travail du sol deviendra négligeable ; si, au contraire, le blé est cultivé en monoculture, le travail superficiel qui n'enfouit pas les résidus infectieux sera plus favorable à la maladie que le labour (+ 35 %).

Tableau 3

Effet de différentes techniques culturales sur la fréquence de piétin verse dans un peuplement de blé : taux d'augmentation ou de diminution de la fréquence de piétin verse par rapport à une rotation (maïs/blé) labourée tous les ans

Rotations et techniques culturales	Taux
Rotation Maïs/Blé/Blé	+ 13 %
Rotation Pois/Blé/Blé	- 12 %
Rotation Pois/Blé ou Colza/Blé	- 30 %
Rotation Colza/Pois/Blé ou Pois/Colza/Blé	- 54 %
Travail superficiel avant blé au lieu de labour	- 47 %
Semis du blé le 10/11 au lieu du 15/10	- 25 %
Diminution de densité de semis du blé de 25 %	- 7 %

Source : Colbach *et al.*, 1996

Il est clair que le choix de la succession culturale, ou du travail du sol dans une succession ne repose pas seulement sur la prévision du risque de piétin-verse. Une démarche analogue doit être menée pour les parasites de toutes les cultures de la succession, les mauvaises herbes, la gestion de l'azote, de l'eau, etc. La mise au point d'itinéraires techniques et de systèmes de culture impose ainsi un décloisonnement des spécialités ; l'agronome généraliste, compétent aussi bien sur le travail du sol que sur la fertilisation, capable d'analyser les interactions entre nutrition minérale et hydrique, entre date de semis et parasitisme devient la clef de voûte de cette conception. Il doit réaliser une synthèse des connaissances de ses collègues plus spécialisés, si possible sous forme de modèles articulés entre eux :

- modèles de fonctionnement des cultures ou des associations culturales ;
- modèles d'évolution du milieu. La recherche est aujourd'hui beaucoup moins avancée sur ces derniers modèles, nécessairement pluriannuels pour prendre en compte les effets précédents et l'évolution à long terme de la fertilité du milieu (Sebillotte, 1980).

Organisation spatiale des systèmes de culture

Qu'il organise la diversité des associations au sein d'un champ, ou l'assolement de son exploitation, l'agriculteur choisit toujours avec soin la localisation de ses systèmes de culture : le milieu, l'histoire culturelle, la proximité du siège de l'exploitation, l'organisation collective du village, ont, selon les situations, un poids très variable. Que peut apporter la modélisation de l'agrosystème à ces décisions ?

Modulation de la conduite de la culture à partir des hétérogénéités intraparcellaires

Le développement de l'informatique embarquée, des systèmes de localisation géographique (ex : GPS) et des capteurs (de rendement, d'humidité, de biomasse, etc.) permettent aujourd'hui d'envisager un ajustement automatique des doses d'engrais aux caractéristiques locales du sol et de la végétation, un épandage d'herbicides localisé aux seules zones de la parcelle où il y a des mauvaises herbes (Schueller, 1992). La culture mécanisée retrouve ainsi, théoriquement au moins, une souplesse pour la diversification intraparcellaire du système de culture que seule l'agriculture manuelle avait gardée.

L'automatisation de la modulation intraparcellaire ramène le problème à celui d'une somme de « décisions » élémentaires : la problématique de recherche n'est guère différente de celle présentée plus haut. Des quatre pôles de recherche évoqués précédemment, l'étude des qualités des indicateurs est souvent la plus développée. Le faible nombre d'indicateurs dont l'acquisition est automatisée tend alors à déplacer légèrement la question : on ne se demande plus quel indicateur possède les qualités nécessaires à une amélioration des choix techniques, mais on cherche à définir comment on va bien pouvoir utiliser les indicateurs disponibles. Le fait de pouvoir disposer de cartes de rendement grâce à un équipement spécifique des moissonneuses-batteuses fait, par exemple, resurgir le vieux rêve d'utiliser la variabilité du rendement comme base d'une cartographie des sols ! Le maillon faible de l'agriculture de précision est aujourd'hui cependant la modélisation des relations entre les indicateurs et le résultat des interventions techniques (Robert, 1996). Ainsi, sur blé, il s'est avéré nécessaire de concevoir un modèle complexe, en trois dimensions, de la structure du peuplement (encore inachevé) pour espérer raccorder par des relations stables les mesures de réflectance à l'indice foliaire, variable clef pour une prédiction de la croissance et des besoins en azote (Akkal *et al.*, 1997).

Conduite techniques d'espaces de taille supérieure à la parcelle

Le problème est ici beaucoup plus difficile et pose de nombreuses questions nouvelles à l'agronome. En premier lieu, l'objectif n'est plus la mise au point de règles d'action et de références pour les seuls agriculteurs : par exemple, l'organisation spatiale des systèmes de culture au niveau du bassin d'approvisionnement d'une entreprise agro-industrielle intéresse l'entreprise et ses fournisseurs, les agriculteurs du bassin ; les informations que fournit l'agronome peuvent aider à la décision des deux parties et à la négociation entre eux, leurs objectifs propres étant parfois conflictuels (Le Bail, 1994). De même, au niveau du bassin d'alimentation d'une nappe phréatique, les gestionnaires de l'eau et les agriculteurs n'ont souvent pas les mêmes intérêts.

En second lieu, l'expérimentation, outil favori de l'agronome, n'est guère utilisable pour valider les solutions proposées. En définitive, la contribution de l'agronome à la résolution de ces problèmes multiacteurs complexes est de fournir aux parties impliquées des outils de simulation leur permettant d'explorer différentes solutions, avant de choisir, ensemble, celle qui apparaît être le meilleur compromis (Attonaty *et al.*, 1993 ; Rossing *et al.*, 1997).

Une illustration en est l'étude prospective — actuellement en cours — des effets des systèmes de culture sur les risques de diffusion de transgènes dans la nature (Colbach & Meynard, 1996 ; Clermont-Dauphin *et al.*, travaux en cours). L'autorisation de vente de variétés de colza transgéniques est encore incertaine ; l'un des éléments à prendre en compte dans la décision est le risque d'évasion des transgènes hors des parcelles ensemencées en colza transgénique, et leur transmission par hybridation aux crucifères sauvages proches du colza. Cette évasion est source de litiges entre voisins et potentiellement de bouleversements de l'écosystème. Il convient donc d'essayer d'en estimer la probabilité, et d'envisager les moyens de la limiter (Messéan, 1995). La contribution des agronomes à cette question — qui intéresse aussi bien les pouvoirs publics, les professionnels de la sélection et les agriculteurs que le grand public — est de réaliser *un modèle permettant d'estimer* à partir des caractéristiques du parcellaire, de l'assolement, des successions culturales et de quelques pratiques (désherbage, travail du sol) d'une région, *les risques de diffusion d'un gène d'une parcelle à l'autre* par l'intermédiaire de transferts de graines et (surtout) de pollen. Ce modèle fonctionne sur un pas de temps annuel, où il permet de reconstituer sur chaque parcelle et sur leurs bordures, les effectifs des populations de colza — semé par l'agriculteur ou repousses — par un sous-modèle simulant le cycle reproducteur du colza et à chaque étape de ce cycle les taux de destruction de plantes, plantules ou

graines par le travail du sol, les désherbants, le broyage, etc. ; le génotype de chaque population est simulé en fonction du génotype de la population mère et des échanges de pollen entre parcelles, ou entre parcelles et bordures. On pourra s'appuyer sur ce modèle pour savoir dans quelle mesure le risque de diffusion du transgène pourra être limité par des conseils techniques ou des réglementations concernant l'entretien des champs, des bordures et des jachères, ou si la probabilité de diffusion est trop forte pour qu'il faille prendre le risque d'autoriser la vente de telle variété transgénique.

Cet exemple montre bien qu'une gestion spatialisée des systèmes de culture suppose une modélisation spécifique, qui n'est pas une simple intégration de modèles à la parcelle : les échanges de pollen entre parcelles imposent de s'intéresser à la chronologie de floraison du colza, y compris sur les jachères ; à côté des parcelles cultivées, un nouvel objet d'étude, bien connu des écologues, mais souvent négligé des agronomes apparaît : les bordures de route et de champ. De même, pour raisonner des systèmes de culture intégrés ou écologiques (Vereijken, 1992), les haies et les bordures, comme l'agencement spatial des cultures, jouent un rôle essentiel.

Conclusion

L'utilisation de modèles de fonctionnement de l'agrosystème pour la mise au point de systèmes de culture conduit donc à identifier quatre axes de recherche complémentaires, plus ou moins développés selon que l'on s'intéresse au choix d'une date d'intervention pour une technique donnée ou au raisonnement de la cohérence d'un système de culture, et que l'on travaille au niveau de la parcelle ou d'espaces plus englobants :

- *l'étude des qualités des indicateurs de diagnostic*, en grand développement aujourd'hui pour l'aide à la décision en matière de fertilisation et de protection phytosanitaire et la conduite modulée intraparcelle ;
- *la modélisation de l'effet des choix techniques sur la production et l'écosystème*, qui peut s'appuyer sur les connaissances amont, mais nécessite souvent des investigations spécifiques (cf. *infra*) ;
- *la conception d'innovations techniques* (règles de décision, nouveaux itinéraires techniques ou systèmes de culture), sur la base des modèles et en interaction forte avec les utilisateurs ;
- *l'évaluation de ces innovations techniques* : celle-ci peut s'appuyer, au moins pour les innovations conçues au niveau de la parcelle, sur des expéri-

mentations agronomiques. Une évaluation *in situ* de la mise en oeuvre de ces innovations par les acteurs de terrain est, en tout état de cause, nécessaire.



Difficultés et questions vives

Pour chaque axe de recherche que nous venons d'identifier, nous tentons dans ce chapitre d'analyser les principales difficultés qui se posent aux agronomes et de présenter quelques unes des réponses qui ont pu y être apportées.

Etude des qualités des indicateurs

Le développement important de l'agrophysiologie depuis une vingtaine d'années débouche aujourd'hui sur une offre assez considérable en indicateurs potentiellement utilisables pour la décision : la problématique du diagnostic de nutrition minérale a ainsi été profondément renouvelée par la connaissance des règles de répartition des éléments dans les couverts, et s'éloigne de l'empirisme du diagnostic foliaire (Lemaire & Gastal, 1997) ; la modélisation de la croissance sur la base de l'interception du rayonnement ouvre la voie à une utilisation prédictive des indicateurs corrélés à l'indice foliaire (réflectance du couvert, taux de couverture du sol...) ; les indicateurs de stress hydrique, les prédicteurs de la qualité des produits, le repérage des stades critiques de l'élaboration du rendement font également l'objet de recherches intenses. Cependant, un problème rencontré fréquemment dans la mise au point de ces indicateurs agrophysiologiques est *la diversité des réponses variétales*.

L'approche la plus classique consiste à analyser les qualités de l'indicateur (sensibilité, spécificité, robustesse, etc.) sur une ou deux variétés, de mettre au point une règle de décision, puis d'étudier la stabilité des paramètres de la règle selon les variétés. Si ceux-ci s'avèrent instables, la règle est complétée par une typologie des variétés : à chaque type correspond un jeu de paramètres.

Ce travail de *typologie variétale*, toujours à réactualiser, est relativement lourd ; une connaissance des mécanismes impliqués dans la variabilité intergénomique des valeurs prises par les indicateurs permettrait de l'alléger. Ainsi l'instabilité de la relation Réflectance/LAI sur le blé pourrait dépendre d'un petit nombre de paramètres liés à l'arrangement spatial des feuilles et à leurs propriétés optiques, paramètres *a priori* aisés à caractériser en routine, constituant ainsi une base typologique moins coûteuse et plus précise que l'établissement, sur chaque variété, de la relation Réflectance/LAI (Boissard *et al.*, 1995).

Plus généralement, la connaissance de l'effet du génotype sur la réponse des peuplements végétaux au milieu a pris beaucoup de retard, à la fois sur la génétique moléculaire et sur la physiologie de la réponse des végétaux à leur environnement ; une meilleure valorisation de la diversité génotypique dans le raisonnement des systèmes de culture ne pourra se faire qu'en fonction du comblement de cette lacune. Il s'agit, au bout du compte, d'apprendre à mieux adapter le choix variétal au système de culture et au milieu, mais aussi de déterminer comment adapter la conduite de la culture à la variété. Sur ce dernier aspect, les indicateurs d'aide à la décision ont un rôle important à jouer.

Modélisation prédictive de l'effet des choix techniques sur la production et l'écosystème

Le problème de la discontinuité des connaissances analytiques

La relation entre les techniques agricoles et la productivité est complexe et il est rare que les connaissances analytiques disponibles permettent de la reconstituer en totalité. Si l'on dispose aujourd'hui, pour beaucoup d'espèces, de modèles de fonctionnement du peuplement végétal, ayant pour entrée les caractéristiques du milieu (sol, climat) et pour sortie la production de biomasse et le rendement (Whisler *et al.*, 1986 ; Bouman *et al.*, 1996), de nombreux processus restent très mal connus :

- les effets à court ou à long terme des systèmes de culture sur certaines variables du milieu (maladies, parasites, mauvaises herbes, structure du sol, etc.) restent difficiles à prévoir, bien que des avancées significatives aient été réalisées ces dernières années (par exemple pour l'état structural du sol, voir Roger-Estrade, (1995)) ;
- les modèles de culture simulent mieux le rendement que la qualité des produits ou l'impact de la culture sur l'environnement, variables pourtant essentielles à la définition de systèmes de culture durables ;
- enfin, les modèles de culture eux-mêmes sont très hétérogènes et contiennent des simplifications qui les rendent souvent peu performants dans des conditions de production éloignées de leur région d'origine.

Comme illustration des difficultés nées de cette discontinuité des connaissances analytiques, on citera la modélisation de l'effet des maladies cryptogamiques sur le rendement du blé, réalisée par Chevalier-Gérard *et al.* (1994) pour la mise au point d'itinéraires techniques à bas niveau d'intrants. On sait

qu'une baisse de fertilisation azotée, un retard de semis, une diminution de densité, l'adoption de variétés résistantes permettent de diminuer le risque de maladies ; mais ces choix techniques conduisent souvent aussi à une baisse du rendement potentiel. Pour mettre au point des itinéraires techniques peu exigeants en fongicides, mais performants, il est nécessaire de pouvoir estimer les conséquences de ces différents choix sur le rendement potentiel et la perte de rendement due aux maladies compte tenu, bien sûr, du climat. Or, pour ce dernier point, les modèles d'évolution des épidémies développés aujourd'hui ne suffisent pas : d'une part, ils ne prennent pas en charge, le plus souvent, les effets des techniques culturales sur les épidémies, d'autre part on ne dispose pas d'informations suffisantes concernant les effets du complexe parasitaire sur la production pour les utiliser en prévision des dégâts. Le modèle réalisé fait en définitive l'impasse sur ces processus mal connus : il relie directement, sous forme d'une équation linéaire d'ajustement, la perte relative de rendement :

- aux actes techniques (nature du précédent cultural, date de semis, quantité d'azote disponible) ;
- aux notes de résistance variétales aux différentes maladies ;
- au climat codé globalement par le millésime ¹ (tabl. 4).

On assiste ici à une *sous-valorisation des connaissances acquises* dans certains domaines (modèles épidémiologiques, résistances variétales...) en raison d'une impossibilité à les connecter à des connaissances complémentaires de précision équivalente.

La question du domaine de validité du modèle

Quand on met au point une règle de décision ou un plan d'action, ce n'est évidemment pas pour qu'ils soient seulement utilisés sur le domaine expérimental d'un institut de recherche ! Le modèle qui sert de base à la conception des innovations techniques doit donc avoir un domaine de validité le plus large possible, comprenant des situations agricoles très diverses. La démarche généralement proposée dans la littérature sur les modèles (Whisler *et al.*, 1986) consiste à intégrer dans le modèle l'ensemble des processus connus, à le tester sur un réseau de parcelles expérimentales et, si nécessaire, le modifier

¹ On notera au passage que la manière dont le climat est pris en compte ici illustre bien la différence entre un modèle conçu pour l'aide à la décision en temps réel (où les variables climatiques en temps réel seraient nécessairement variables d'entrée) et la conception d'itinéraires techniques (où la simulation en temps réel n'est pas nécessaire, mais où l'estimation des dégâts est primordiale).

ou le caler pour en rendre les sorties plus conformes à la réalité. L'inconvénient de cette procédure est que si certains facteurs limitants ne sont pas modélisés *a priori*, ils peuvent rester ignorés ; le calage du modèle sur les situations affectées par ces facteurs limitants risque même de biaiser l'évaluation de certains paramètres.

Tableau 4
Modèle linéaire, paramétré pour la région Picardie, d'estimation de la perte relative de rendement due aux maladies (%), en absence de traitement fongicide(d'après Chevalier-Gérard *et al.*, 1994)

Facteurs et Covariables	Paramètres
Moyenne générale	26,57
Année de récolte	
1978	- 4,81
1979	- 7,73
1980	- 3,05
1981	7,93
1982	2,27
1983	1,16
1984	- 6,70
1985	1,20
1986	- 7,23
1987	5,15
1988	0,16
1989	6,94
1990	- 2,67
1991	7,38
Distance à la mer	
0 à 20 km	3,18
20 à 40 km	0,60
> 40 km	- 3,78
Note de résistance à	
la rouille jaune	- 0,94
la septoriose	- 0,86
l'oïdium	- 0,76
Nature du précédent	
Céréale à paille	1,90
Autre	- 1,90
Date de semis *	0,0051

* On rend compte de l'effet de la date de semis par la somme de degrés-jours du semis au 31 janvier, critère intégrateur du risque de contamination d'automne et d'hivers.

Exemple : Pour une parcelle située à plus de 40 km du littoral [précédent betterave, variété Renan (note de résistance à la rouille jaune : 8, à la septoriose : 4, à l'oïdium : 6), semée le 10/10/90 (soit 530°C.j pour le poste de Rouen)], on évalue la perte de rendement due aux maladies à : $26.57 + 7.38 + (-3.78) + (-1.90) + 8 (-0.94) + 4 (-0.86) + 6 (-0.76) + 530 (0.0051) = 15.4$ % du rendement sans maladie

Une autre solution, plus pragmatique, consiste à *fonder la modélisation sur un diagnostic agronomique en parcelles d'agriculteurs*. La démarche de diagnostic est fondée sur le suivi d'un échantillon de parcelles d'agriculteur, choisies en fonction de leur terrain, de leur système de culture et des caractéristiques des exploitations auxquelles elles appartiennent (Boiffin *et al.*, 1981 ; Doré *et al.*, 1997). On y effectue différentes observations et mesures qui permettent de porter sur chaque parcelle un diagnostic des facteurs limitants de la production ou de l'efficacité des intrants (Meynard & David, 1992) ; on détermine enfin les caractéristiques du milieu et du système de culture qui, sur les parcelles de l'échantillon, ont joué un rôle dans l'extériorisation de ces facteurs limitants. Le réseau est répété plusieurs années successives pour intégrer la variabilité climatique. On identifie ainsi, pour la zone d'étude, les points de blocage les plus fréquents et les fonctions sur lesquelles il faudra faire porter l'effort d'investigation et de modélisation. Les recherches de base nécessaires à la modélisation peuvent alors être réalisées sur des expérimentations spécifiques, le réseau de parcelles d'agriculteur pouvant à nouveau être utile pour la validation du modèle. Ainsi, en Picardie, Meynard (1985) montre que les facteurs limitants majeurs du rendement du blé sont la compacité de la couche arable, les maladies des tiges et des racines et les carences azotées temporaires liées à des retards d'apport d'engrais ; aucun modèle mécaniste ne rend aujourd'hui compte des deux premiers de ces facteurs et les acquis sur le troisième sont très insuffisants pour permettre une modélisation des effets des dates d'apport d'engrais. De même, dans un travail sur la maîtrise de conséquences, sur la culture qui suit, de la jachère introduite en France par la politique agricole européenne, le diagnostic agronomique en parcelles agricoles a conduit à s'intéresser particulièrement à la maîtrise du vulpin des champs (*Alopecurus myosuroides* Hud.). Le comportement de cette graminée adventice est apparu fort différent dans les jachères de ce que l'on connaissait dans les champs de blé : étalement des levées et de la floraison beaucoup plus important, refloweraisons après broyage, production de graines par plante très supérieure, attaques fréquentes par des maladies pouvant être transmises au blé qui suit (Doré & Dulout, 1996). Ce diagnostic a montré qu'aucune approche prédictive du comportement de la succession jachère/blé ne serait possible sans un accroissement des connaissances sur la compétitivité des couverts semés vis-à-vis des mauvaises herbes, la modélisation du développement du vulpin après un broyage ou l'effet du vulpin sur l'épidémiologie des maladies telluriques du blé.

Le diagnostic agronomique apparaît ainsi, tout autant que les modèles d'amont, comme une source de connaissances indispensable pour la prévision

des effets des systèmes de culture sur la production et le milieu ; on perçoit bien, à travers ces exemples, l'aller-retour qui s'organise entre les recherches sur le fonctionnement de l'agrosystème et celles sur la conception d'itinéraires techniques et de systèmes de culture : les travaux de diagnostic et de modélisation orientés vers ce second objectif constituent à la fois une source de questionnement aux spécialistes de l'agrosystème et une structure d'accueil pour les progrès des connaissances issues de leurs travaux.

La conception de solutions techniques à partir des modèles

Les systèmes interactifs d'aide à la décision

Dans un contexte changeant, il est nécessaire de disposer d'outils pour mettre au point le plus rapidement possible les nouveaux itinéraires techniques et systèmes de culture. Les études sur la décision montrent qu'il est plus efficace, (en particulier pour les décisions complexes) d'aider l'acteur à se construire sa solution plutôt que de lui fournir une seule stratégie, fût-elle théoriquement optimale (Chatelin *et al.*, 1994) : c'est pourquoi les recherches s'orientent vers la fabrication d'outils interactifs d'aide à la conduite des cultures dont Déciblé constitue un prototype.

L'objectif du système d'aide à la décision Déciblé, conçu par l'Inra et l'Institut technique des céréales et de fourrages (ITCF) est d'aider à raisonner la cohérence entre les techniques culturales et les objectifs de production sur une parcelle de blé d'hiver (Aubry *et al.*, 1992). Les variables d'entrée sont les caractéristiques de la parcelle avant travail du sol (type de terrain, état laissé par le précédent cultural) et un ensemble de règles de décision (appelé plan d'action) concernant les différentes techniques culturales (travail du sol, semis, fertilisation, traitements phytosanitaires, etc.). Le logiciel permet de simuler, sous différents scénarios climatiques, les décisions techniques qu'aurait prises un agriculteur ayant adopté le plan d'action, et les conséquences de leur application au niveau du rendement obtenu, de la qualité des récoltes, de la marge brute, etc. Il permet donc d'associer à un plan d'action une espérance et une distribution du rendement, de la qualité, de la marge brute, des quantités d'azote minéral en fin de culture, et donc de choisir parmi plusieurs le plan répondant le mieux à un cahier des charges donné. Déciblé réalise en quelque sorte une « expérimentation en chambre » de modes de conduite du blé : en quelques minutes, on dispose de l'équivalent de quinze années de résultats.

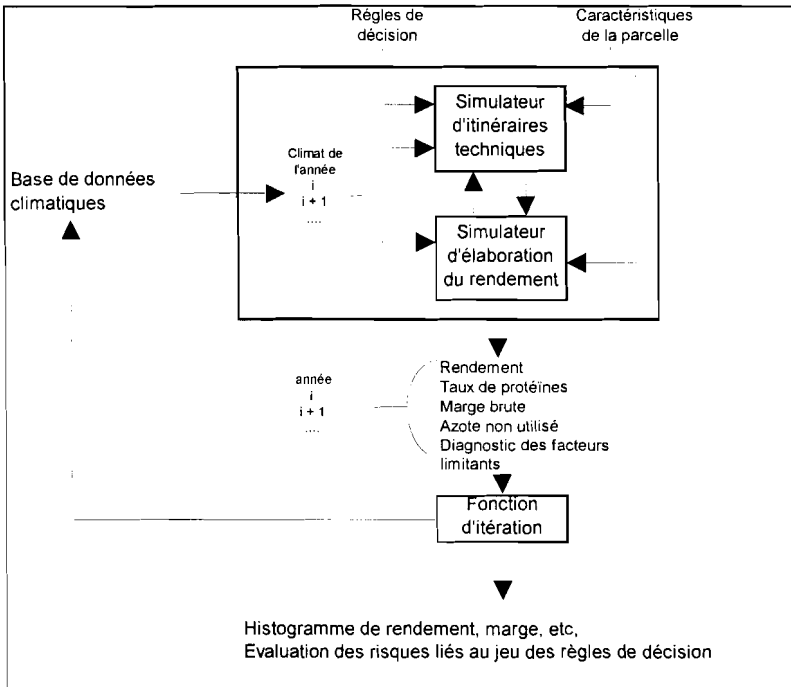


Figure 2 — Organisation du logiciel Déciblé.

Déciblé est constitué par l'assemblage de deux types de modèles (fig. 2) :

- *un modèle décisionnel* qui joue le rôle de « pilote », en simulant, pour chaque scénario climatique, les décisions techniques induites par le plan d'action (« simulateur d'itinéraires techniques »). Un langage spécifique de représentation des connaissances, empruntant beaucoup aux techniques de l'intelligence artificielle a été mis au point pour ce type d'outil d'aide à la décision (Attonaty *et al.*, 1993) ;
- *un ensemble de modèles biotechniques* dont les entrées sont les caractéristiques du milieu (sol, climat) et les actes techniques générés par le modèle de décision, l'élaboration du rendement et de la qualité, l'évolution des stocks d'eau et d'azote du sol, l'évolution de la structure de la couche arable sont ainsi simulées en interaction les unes avec les autres.

Le fonctionnement actuel de Déciblé pose plusieurs questions, générales aux outils de ce type (Poussin, 1991) :

- en sortie du logiciel, l'utilisateur dispose de plusieurs critères, difficilement agréables : comment classer des plans d'action, comment choisir, parmi ceux qui sont « acceptables », celui qui sera jugé le plus satisfaisant ? Les

méthodes d'analyse multicritère, classiques en gestion, pourraient être utilisées avec profit (Schärling, 1985) ;

– si l'utilisateur n'est pas satisfait d'un plan d'action, comment peut-il savoir quelle règle modifier pour l'améliorer ? La nature des facteurs limitants dans le cas simulé permet à un utilisateur ayant des compétences agronomiques d'inférer des règles plus pertinentes. Les recherches fondées sur la génération d'itinéraires techniques par des techniques d'intelligence artificielle (Martin-Clouaire & Rellier, 1995) offrent, d'autre part, des perspectives intéressantes.

La prise en compte de l'incertitude de prédiction des modèles

Les modèles utilisés dans l'aide à la décision n'ont pas toujours une très bonne valeur prédictive et leurs variables d'entrée ne sont pas toujours connues avec précision : leur utilisation pour prévoir les effets d'interventions culturales laisse subsister une incertitude sur laquelle ils ne donnent aucune information, car ils sont pratiquement toujours déterministes. Tant que cette incertitude reste mal connue, il n'est pas possible d'estimer correctement les risques encourus par le décideur.

Il apparaît donc nécessaire de développer des recherches sur :

– la modélisation de l'incertitude dans la prévision des variables de sortie des modèles utilisés pour l'aide à la décision ; cette incertitude résulte à la fois de l'existence de processus ou d'interactions non prises en compte dans le modèle, de la nature des variables d'entrée du modèle (choisies par l'agronome en fonction de son appréhension des contraintes de la décision) et de l'imprécision dans la saisie de ces variables d'entrée par l'agriculteur ;

– les conséquences de cette évaluation de l'incertitude pour la mise au point de programmes d'interventions culturales. L'approche au niveau de la parcelle est la plus pertinente pour l'étude de relations entre systèmes de culture et incertitude, mais elle n'est pas la plus pertinente pour l'étude de la maîtrise des risques. En effet, c'est à un niveau plus englobant que les différents acteurs jugent les systèmes de culture et vont donc apprécier les risques : l'exploitation agricole pour l'agriculteur ; le bassin d'approvisionnement pour l'industriel transformateur de produits agricoles ; le bassin versant ou de nappe pour les consommateurs d'eau. L'utilisation conjointe de la connaissance de l'incertitude sur la prévision de l'effet des techniques, de la connaissance de l'aléa sur les prix et de la connaissance des processus de décision et négociation au niveau de ces espaces devrait permettre de comparer différentes règles de décision au niveau de la parcelle, différentes règles d'arbitrage au niveau de

l'exploitation, ou différentes procédures de contractualisation au niveau du bassin, quant à leur efficacité dans la maîtrise des risques encourus par les différents acteurs concernés.

Ainsi, pour la fertilisation azotée, le calcul des doses d'engrais repose actuellement sur l'équation du bilan prévisionnel fondée sur une modélisation des besoins de la culture et des fournitures du sol (Hébert & Rémy, 1977). La pondération des risques de surfertilisation (pouvant entraîner une pollution des eaux par NO_3^- ou un taux de protéines trop élevé pour certaines utilisations) et de sous-fertilisation (pouvant entraîner une carence en azote, une perte de rendement et un taux de protéines trop faible) est implicite dans ce calcul. Aucune procédure n'est disponible pour l'agriculteur pour définir une autre pondération que celle proposée par l'agronome. Or, d'une part l'évolution du rapport de prix entre les céréales et l'engrais (division par deux environ sur 15 ans) et l'importance croissante attachée à la pollution des eaux par l'ion nitrate sont susceptibles de remettre en cause la pondération effectuée dans les années 70 par les concepteurs de la méthode de calcul ; d'autre part, les conséquences d'une erreur d'ajustement de la fertilisation peuvent être très différentes selon les situations (débouchés du produit, potentialités du milieu, risques effectifs pour les eaux, etc.). La modélisation de l'incertitude dans la prévision de la réponse à l'engrais du rendement, de la teneur en protéine des grains et du reliquat d'azote minéral après récolte permet à Makowski (1996) de montrer que les paramètres actuels du bilan prévisionnel conduisent plus souvent à une surfertilisation qu'à une sous-fertilisation (ce qui est cohérent avec la discussion menée autour de la figure 1), et d'estimer le gain de marge brute ou de reliquat d'azote que l'on peut espérer de l'amélioration du modèle. Il apparaît également que même pour un décideur indifférent vis-à-vis du risque, la stratégie maximisant la marge brute moyenne peut être assez différente de celle issue de la version déterministe de la modélisation de la réponse à l'engrais. Rossing *et al.* (1994) avaient observé la même chose sur le cas de la protection phytosanitaire.

L'évaluation des innovations techniques proposées aux agriculteurs

On doit distinguer deux types d'évaluation :

– l'évaluation *in situ* : l'innovation technique est conseillée à des agriculteurs qui l'appliquent, plus ou moins fidèlement, dans leurs champs. On évalue

alors sa faisabilité, son insertion dans l'organisation du travail des unités de production, sa compatibilité avec leur manière de prendre des décisions, etc. La conclusion renvoie à la formulation de la règle (Cerf & Meynard, 1988) ou aux interfaces-utilisateur du système d'aide à la décision, mais parfois aussi, met à jour la méconnaissance qu'avaient les concepteurs du contexte de la décision ! Les méthodes d'étude, qui relèvent largement des sciences humaines, ne seront pas développées ici, bien que les agronomes y soient nécessairement associés ;

– l'évaluation expérimentale (essai de test d'itinéraires techniques ou de systèmes de culture), orientée vers la vérification de la cohérence de l'innovation avec ses objectifs assignés : l'agronome applique une règle de décision, ou un ensemble de règles, sur des essais au champ, observe leurs résultats sur la production, les coûts, le milieu, etc., les compare éventuellement à ceux d'autres règles, détermine leurs points faibles, teste les hypothèses qu'il a été amené à faire lors de leur conception, etc. Il conclut sur la validité des bases agronomiques de l'innovation technique ou de l'outil d'aide à la décision, et sur leur domaine de validité.

Les expérimentations réalisées dans ce cadre diffèrent fortement des expérimentations factorielles classiques ; dans celles-ci, certaines techniques sont contrôlées par le protocole et leurs modalités définies en général dès la mise en place de l'essai (par exemple les doses d'engrais dans un essai fertilisation), et les autres laissées à l'appréciation de l'expérimentateur ; dans un essai de test d'itinéraires techniques, toutes les interventions techniques dépendent de règles de décision, leurs modalités précises sont donc inconnues au début de l'essai, mais aucune n'est laissée à la libre appréciation de l'expérimentateur. Ce nouveau type d'essais nécessite un apprentissage de la part des expérimentateurs et le travail théorique sur la méthodologie est loin d'être terminé (cf. Debaeke *et al.*, 1996 ; Meynard *et al.*, 1996 ; Reau *et al.*, 1996).

Le fait que les outils d'aide à la décision soient fondés sur des modèles ne doit pas amener à confondre l'évaluation du modèle avec celle de l'outil. L'évaluation du simulateur d'élaboration du rendement de Déciblé est présentée sur la figure 3-a : il s'agit, à titre d'exemple, d'une confrontation du rendement estimé au rendement réel obtenu sur des essais. Mais toutes les erreurs de simulation n'ont pas des conséquences équivalentes pour la décision : certaines peuvent avoir des conséquences graves, en entraînant de mauvais choix, d'autres aucune conséquence. A côté de la validation en simulation, il est donc nécessaire d'évaluer l'aptitude de Déciblé à déterminer le plan d'action le plus pertinent vis-à-vis d'un cahier des charges.

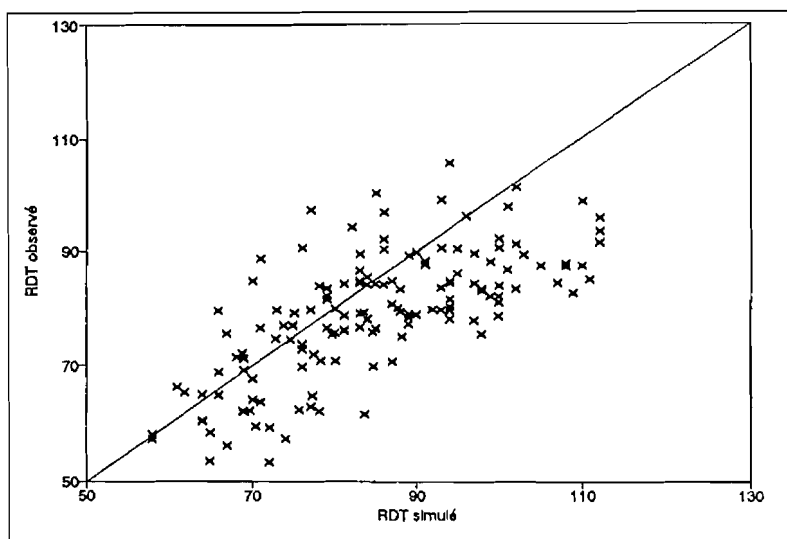


Figure 3a — Validation du simulateur d'élaboration du rendement de Déciblé : rendements simulés et observés dans un réseau d'essais (Grignon, 1992, 93, 94)

Plan d'action	Prix du blé (F/quintal)				
	50	70	90	110	130
Densité et dose N élevées + fongicide				●	(●)
<i>Idem</i> , sans fongicide			●		
Densité et dose N faibles + fongicide			()	()	
<i>Idem</i> sans fongicide	(●)	(●)			

Légende : () Résultat expérimental (Grignon 1992, 93, 94) ; ● d'après Déciblé

Figure 3b — Validation de Déciblé pour le choix de plans d'action : plan d'action permettant d'atteindre la marge brute moyenne la plus élevée, selon le prix du blé (Var. Soissons).

La figure 3-b compare quatre plans d'action proches de ceux déjà vus précédemment (tabl. 2) : le signe '()' indique le plan d'action qui, pour un prix du blé donné, obtient la marge brute moyenne la plus élevée (d'après des résultats expérimentaux). Selon le prix du blé, la marge brute la plus élevée n'est pas obtenue avec le même plan. Pour ce cahier des charges monocritère, très simple, Déciblé donnera satisfaction s'il conduit à choisir le même plan d'action que les résultats expérimentaux : tel est le cas pour les prix du blé

extrêmes (ce qui est déjà encourageant), mais il est clair que des problèmes restent à résoudre puisqu'il y a divergence entre Déciblé et la réalité aux prix intermédiaires.



Conclusion

Ainsi, les modèles de fonctionnement de l'agrosystème constituent aujourd'hui le pivot de la démarche d'innovation en matière de conduite des systèmes de culture puisqu'ils donnent un sens aux indicateurs et servent de base aussi bien à la conception des systèmes de culture qu'à leur extrapolation. Cela ne signifie pas cependant qu'il n'est possible d'inventer des systèmes innovants que sur la dizaine d'espèces les plus étudiées dans le monde, qui font l'objet de modèles de fonctionnement aujourd'hui bien connus du monde de la recherche (Ceres, Soygro, Sucros, Gossym, etc.). Un modèle, tout agronome travaillant sur une espèce (ou une association) donnée dans une région peut en construire un, plus ou moins complexe, en se fondant sur le diagnostic des facteurs limitants dominants, les lois générales d'action des facteurs du milieu qui transcendent espèces et continents (sommées de degrés.jours, lois d'interception du rayonnement, lois de dilution des éléments minéraux, bilans hydriques et minéraux, etc.) et quelques expérimentations bien choisies. Le meilleur modèle n'est pas le plus universel ou le plus proche des mécanismes, mais celui qui, dans un contexte donné, rend le mieux compte des effets des interventions culturales sur les variables de sortie jugées intéressantes, du rendement à l'environnement (voir, par exemple, de Tourdonnet & Roger-Estrade, 1997). Il n'est certes pas aisé de déterminer *a priori* quel degré de formalisation des mécanismes de fonctionnement du peuplement végétal ou du milieu sera nécessaire pour une utilisation donnée ; c'est progressivement, par des allers et retours entre modélisation/conception/évaluation des innovations que le modèle trouvera son juste degré de complexité, directement dépendant des questions abordées et des caractéristiques des bases de données disponibles pour son évaluation.

La garantie que ces modèles ne sont pas des « lubies » de chercheur, mais sont relativement fidèles à la réalité est donnée par leur confrontation aux résultats de parcelles agricoles d'une part, et aux acteurs de terrain eux-mêmes d'autre part. Leur réalisme est ainsi mis à l'épreuve dans la crédibilité des indicateurs aussi bien que dans les systèmes interactifs d'aide à la décision. Ici, comme aux autres étapes de la démarche, la réussite du travail repose sur une alliance solide entre l'agronome et ses partenaires, paysans, développeurs, conseillers, etc. (Rossing *et al.*, 1997). En effet, l'importance donnée aux modèles dans le

texte aussi bien que dans la conclusion reflète l'angle d'attaque de l'article — l'utilisation des connaissances sur le fonctionnement de l'agrosystème pour la mise au point de systèmes de culture — mais ne doit pas occulter le rôle déterminant pour la pertinence des innovations proposées, de la connaissance des systèmes de production et des systèmes agraires ainsi que de l'organisation de relations étroites entre recherche, développement et application.

Références bibliographiques

- AKKAL N., BOISSARD P.,
CHABANET C., JEUFFROY M.H.,
LEWIS P., MEYNARD J.M., VALERY P., 1997 –
Nitrogen fertilisation management in winter
wheat based on an early estimate of the
cover fraction. 1st Eur. Conf. on Precision
Agriculture, Warwick (UK), 8-10/09/1997,
poster.
- ATTONATY J.M., CHATELIN M.H.,
POUSSIN J.C., SOLER L.G., 1993 –
Advice and decision support systems in
agriculture : new issues. In Huime R.B.M.,
Harsh S.B., Dijkhuizen A.A. (éd.) : *Farm level
information systems*. Woudschoten, Zeist,
The Netherlands, pp. 89-101
- AUBRY C., CHATELIN M.H., POUSSIN J.C.,
ATTONATY J.M., MEYNARD J.M.,
GERARD C., ROBERT D., 1992 –
Déciblé : a decision support system for wheat
management. 4e Congrès d'informatique
agricole, Versailles, 1-3/06/1992, poster.
- BOIFFIN J., CANEILL J.,
MEYNARD J.M., SEBILLOTTE M., 1981. –
Élaboration du rendement et fertilisation azotée
du blé d'hiver en Champagne Crayeuse. I.
Protocole et méthode d'étude d'un problème
technique régional. *Agronomie*, 1 : 549-558.
- BOISSARD P., AKKAL N.,
VALERY P., LEWIS P., MEYNARD J.M., 1995 –
3D plant characterization and modelling
aimed at the remote control of winter wheat
growth. Coll. on Photosynthesis and Remote
Sensing, Montpellier, 28-30/09/1995. Actes,
pp. 287-292.
- BOUMAN B.A.M., VAN KEULEN H.,
VAN LAAR H.H., RABBINGE R., 1996 –
The ' School of de Wit ' Crop growth
simulation models : a pedigree and historical
overview. *Agric. Syst.*, 52 : 171-198.
- CERF M., MEYNARD J.M., 1989 –
Sur l'origine du hiatus entre les conseils
techniques et les pratiques des agriculteurs,
résultats d'une enquête sur la fertilisation. In :
Dodd V. A. & Grace P.M. (éd.) : *Proc. of the
11th Intern. Cong. on Agricultural Engineering*.
Balkema/Rotterdam, sept. 1989,
pp. 2925-2934.
- CHATELIN M.H., MOUSSET J., PAPY F., 1994 –
Farmers' decision making. A description
approach. In : B.H. Jacobsen, D.E. Pedersen,
J. Christensen & S. Ramunsen (éd.) : *Proc.
38th EAAE Seminar*, pp. 369-381.
- CHEVALIER-GERARD C.,
DENIS J.B., MEYNARD J.M., 1994 –
Perte de rendement due aux maladies
cryptogamiques sur blé tendre d'hiver.
Construction et validation d'un modèle de
l'effet du système de culture. *Agronomie*,
14 : 305-318.
- COLBACH N., DUBY C.,
CAVELIER A., MEYNARD J.M., 1997 –
Influence of cropping systems on foot and
root diseases of winter wheat. Fitting a
statistical model. *Eur. J. Agron.*, 6 : 61-77.

- COLBACH N., MEYNARD J.M., 1996 – Modelling the influence of cropping systems on gene flow from herbicide resistant rapeseed. Presentation of model structure. X^e Coll. Intern. sur la Biologie des Mauvaises Herbes, Dijon, 11-13/09/1993. Actes, pp. 223-230.
- DEBAEKE P., VIAUX P., DORE T., 1996 – Production de références sur les successions de cultures. In : *Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*. Comité Potentiels/DERF/ACTA, Paris, pp. 87-98.
- DORE T., DULOUT A., 1996 – Le gel des terres en Europe : mesure administrative et nouvelles questions agronomiques. *Cah. Agricultures*, 5 : 450-459.
- DORE T., SEBILLOTTE M., MEYNARD J.M., 1997 – A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agric. Syst.*, 54 : 169-188.
- FISHER R.A., 1985 – The role of crop simulation models in wheat agronomy. In : W. Day & R.V. Atkin (éd.) : *Wheat growth and Modelling*. Plenum Press, New York/London, pp. 237-253.
- JUSTES E., 1993 – *Diagnostic de la nutrition azotée du blé à partir de la teneur en nitrate de la base de la tige. Applications au raisonnement de la fertilisation*. Thèse de Doctorat. Paris, INA P-G, 234 pages + annexes.
- JUSTES E., MEYNARD J.M., MARY B., PLENET D., 1997 – Use of nitrate concentration in stem base extract of wheat and maize crops to manage nitrogen fertilization. In : Lemaire G. (éd.) : *Diagnosis of nitrogen status in crops*. Springer Verlag, Heidelberg, pp. 164-187.
- LAURENT F., JUSTES E., 1994 – Fertilisation azotée du blé d'hiver : un nouvel outil de pilotage. *Jubil. Perspec. agric.*, 190 : 62-69.
- LAURENT F., JUSTES E., GATE P., 1996 – Jubil 1996 : la méthode s'affine. *Perspec. agric.*, 214 : 63-74.
- LE BAIL M., 1994 – Crop quality management : research questions. In : M. Borin & M. Sattin (éd.) : *Proc. 3rd ESA Cong. Abano-Padova.*, pp. 560-569.
- LEMAIRE G., GASTAL F., 1997 – Nitrogen uptake and distribution in plant canopies. In : Lemaire G. (éd.) : *Diagnosis of nitrogen status in crops*. Springer Verlag, Heidelberg, pp. 3-43.
- LIMAUX F., MEYNARD J.M., 1992 – Céréaliculture : la désintensification d'ores et déjà rentable. *Aménagement et Nature*, 105 : 16-19.
- LOYCE CH., MEYNARD J.M., 1997 – Low input wheat management techniques are more efficient in ethanol production. *Ind. Crops and Products*, 6 : 271-283.
- MAKOWSKI D., 1996 – *Modélisation de l'incertitude de la réponse à l'azote et évaluation de stratégies de fertilisation. Application au blé d'hiver*. Mémoire DEA INA P-G/Paris VI/Paris XI.
- MARTIN-CLOUAIRE R., RELIER J.P., 1995 – Crop management planning as a fuzzy and uncertain Constraint Satisfaction Problem (CSP). In : *Artificial Intelligence Applications in Natural Resources, Agriculture and Environmental Science*, 9 : 71-84.
- MESSEAN A., 1994 – Colza et transgénèse : l'impact économique et social. *Oléagineux, Corps gras, Lipides*, 1 : 49-51.
- MEYNARD J.M., 1985 – *Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver*. Thèse de Doctorat. Paris, INA P-G, 258 pages + annexes.
- MEYNARD J.M., AUBRY C., JUSTES E., LE BAIL M., 1997 – Nitrogen diagnosis and decision support. In : Lemaire G. (éd.) : *Diagnosis of nitrogen status in crops*. Springer Verlag, Heidelberg, pp. 147-161.
- MEYNARD J.M., BOIFFIN J., CANEILL J., SEBILLOTTE M., 1981 – Élaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne Crayeuse. II. Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie*, 1 : 795-806.
- MEYNARD J.M., DAVID G., 1992 – Diagnostic sur l'élaboration du rendement des cultures. *Cah. Agricultures*, 1 : 9-19.
- MEYNARD J.M., REAU R., ROBERT D., SAULAS P., 1996 – Évaluation expérimentale des itinéraires

- techniques. In : *Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*. Comité Potentialités/DERF/ACTA, Paris, pp. 63-72.
- POUSSIN J.C., 1991 –
Déciblé : un outil d'aide à la décision pour la conduite du blé d'hiver. Mémoire DEA, Univ. Paris-Dauphine.
- REAU R., MEYNARD J.M., ROBERT D., GIBBON C., 1990 –
Des essais factoriels aux essais 'conduite de culture'. In : *Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*. Comité Potentialités/DERF/ACTA, Paris, pp. 52-62.
- REMY J.C., HEBERT J., 1997 –
Le devenir des engrais azotés dans le sol. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 63 : 700-710.
- ROBERT N., 1996 –
Modulation des conduites culturales à partir des hétérogénéités intraparcélaires. Cas de la fertilisation azotée des céréales à paille dans le Bassin Parisien. Thèse de Doctorat. Paris, INA P-G, 162 pages + annexes.
- ROGER-ESTRADE J., 1995 –
Modélisation de l'évolution à long terme de l'état structural des parcelles labourées. Contribution à l'analyse des effets des systèmes de culture. Thèse de Doctorat. Paris, INA P-G, 238 pages + annexes.
- ROSSING W.A.H., DAAMEN R.A., JANSSEN M.J.W., 1994 –
Uncertainty Analysis Applied to Supervised Control of Aphids and Brown Rust in Winter Wheat. Part 2. Relative Importance of Different Components of Uncertainty. *Agric. Syst.*, 44 : 449-460.
- ROSSING W.A.H., MEYNARD J.M., VAN ITTERSUM M.K., 1997 –
Model-based explorations tu support development of sustainable farming systems : case studies from France and the Netherlands. *Eur. J. Agron.* (sous presse).
- SAULAS P., MEYNARD J.M., 1997 –
Production intégrée et extensification sont-elles compatibles ? Cas des céréales à paille. *Le Courrier de l'Environnement de l'Inra* (sous presse).
- SCHÄRLIG A., 1985. –
Décider sur plusieurs critères. Panorama de l'aide à la décision multicritère. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, 304 pages.
- SCHUELLER J.K., 1992 –
A review and integrating analysis of spatially-variable control of crop production. *Fert. Res.*, 33 : 1-34.
- SEBILLOTTE M., 1978 –
La collecte des références et les progrès de la connaissance agronomique. In : J. Boiffin, P. Huet & M. Sebillotte (éd.) : *Exigences nouvelles pour l'agriculture : les systèmes de culture pourront-ils s'adapter ?* Paris., INA P-G, pp. 466-496.
- SEBILLOTTE M., 1980 –
Rôles de la prairie dans la succession culturale. *Fourrages*, 83 : 79-124.
- SEBILLOTTE M., 1990 –
Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In : L. Combe & D. Picard (éd.) : *Les systèmes de culture*. Paris, Inra, pp. 166-196.
- DE TOURDONNET S., ROGER-ESTRADE J., 1997 –
Prise en compte de l'hétérogénéité du milieu sous abri plastique dans la construction d'un modèle pour la gestion technique d'une culture de laitues. In : Baille A. (éd.) : *Modélisation, gestion et aide à la décision dans les systèmes de production sous abri*. Paris, Inra (sous presse).
- VANDENDRIESSCHE H.J., VAN ITTERSUM M.K., 1995 –
Crop models and decision support systems for yield forecasting and management of the sugar beet crop. *Eur. J. Agron.*, 4 : 269-279.
- VEREIJKEN P., 1992 –
A methodic way to more sustainable farming systems. *Netherlands J. agric. Sci.*, 40 : 209-223.
- WHISLER F.D., ACOCK B., BAKER O.N., FYE R.E., HODGES H.F., MAUBERT J.R., LEMMON N.E., MCKINION J.M., REDDY V.R., 1986 –
Crop simulation models in agronomic systems. *Adv. Agron.*, 40 : 141-208.