

Principes et outils de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture

Jean-Marie Nolot¹
Philippe Debaeke²

¹ Inra,
Domaine expérimental,
BP 27,
31326 Castanet-Tolosan cedex
<jmnolot@toulouse.inra.fr>

² Inra,
UMR 1248 Inra/INPT-Ensat
« Agrosystèmes cultivés et herbagers »
(ARCHE)
BP 27,
31326 Castanet-Tolosan cedex
<debaeke@toulouse.inra.fr>

Résumé

Pour concrétiser la démarche de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture vus comme l'application d'ensembles cohérents de règles de décision, trois systèmes prototypes ont été construits, mobilisant de façon différente les ressources en eau et en main-d'œuvre. De 1995 à 2002, ces systèmes ont été appliqués et évalués sur le dispositif expérimental « Systèmes de grande culture intégrés » de Toulouse-Auzeville (Haute-Garonne). L'expérimentation a permis de valider globalement les stratégies agronomiques proposées pour chaque système (en particulier : rationnement des besoins en eau et en azote, esquive des problèmes phytosanitaires) ainsi que les règles de décision pour les mettre en œuvre. Dans le contexte actuel de la grande culture (intérêt des conduites à faibles niveaux d'intrants), cette étude apporte des éléments de jugement technico-économiques et agri-environnementaux originaux. Une méthodologie d'évaluation des systèmes de culture à valeur générale est proposée.

Mots clés : Méthodologie ; Agronomie ; Économie.

Summary

Principles and tools for the design, management and evaluation of cropping systems

Nowadays, cropping systems must be flexible to face the versatility of agricultural policies and integrated to be able to cope with multi-goal crop production (profitability, crop quality, environment). In this new context, a generic approach was proposed for the development and testing of crop management systems. Agronomic background, regional references and simulation studies were combined to build management strategies adapted to production targets (yield, resource use) and constraints (inputs, labour). The strategies were then translated into logical and consistent sets of decision rules. Each rule described the reasoning which is used to apply a technical decision by taking into account observed or simulated environmental conditions or predicted agronomic risks. To evaluate this theoretical approach, three systems representing realistic options of crop management for the South West of France were specified by their objectives and constraints: A=water and labour fully available: optimizing the direct margin per hectare of agricultural land is the main objective; B=input and labour reduction are wanted in a context of limited irrigation: optimizing the direct margin per worker is the main objective; C=drastic input reductions, limited pesticide applications and limitation of time for crop monitoring are governed by the choice of rainfed management in a context of expanding farm areas: reducing production cost per ton of commercial grain is the main objective of such a low-input system. To reach such objectives while respecting the constraints, different crop management strategies were suggested for further evaluation: in system A, the target was potential production by meeting closely water and N plant requirements; in system B, canopy rationing (through plant density and N fertilization) was applied to optimize the use of limited water resources by delaying soil water depletion and to reduce the occurrence of diseases and the subsequent use of fungicides; in system C, avoiding the main limiting factors (water, diseases) was sought after through varietal choice and sowing date, combined with crop rationing, in order to reduce the number of field operations; disease-resistant cultivars and early determined technical schedules were preferred here. The three management strategies were defined by explicit decision rules which were tested from 1995 to 2002 on plots of agricultural size (about 1.5 hectare) in order to test

their feasibility in a fairly realistic situation. The experiment was situated at Auzeville (Haute-Garonne) on the INRA farm, on a deep soil of silty-clay to clay texture. It consisted of 12 plots in a fixed 4-year rotation and 12 plots in a flexible system, where the choice of crops depended on agronomic and economic considerations (*i.e.* the target gross margin). The system A used crops highly responsive to irrigation (e.g. maize, soybean) while systems B and C rotations were composed of drought-tolerant crops, using limited water amounts (e.g. sorghum, sunflower). The two sequences of crops were arranged to limit N leaching as much as possible. The three systems differed by cultivar, plant density, N fertilization, fungicide protection and irrigation, but all aimed at 'best management practices' in terms of use of inputs and environmental issues. This implied the close adjustment of water and N offer to plant demand by using plant indicators and simple balance models. An innovative experimental methodology combining crop diagnosis, analytical trials and simulation was developed to evaluate the management systems. The cropping systems were compared on their feasibility, agronomic, economic and environmental performances using field measurements and simulation data. Indicators were used to evaluate the environmental impacts of cropping systems. The generic strategy using crop rationing (by nitrogen and plant density) and escape (by sowing date and crop cycle) to limit water needs and disease development proved to be agronomically and economically justified in the new context of production. As they were built on realistic yield objectives and consistent input adaptation, the three systems did not result in negative environmental impacts. A simulation indicated that their relative performance was extremely dependent on the crop price level, the relative profitability of the low-input system (C) increasing with decreasing prices. The best economic return would be achieved by combining B and C management options depending on crop-specific subsidies and tolerance to low-input management.

Key words: Methodology; Agronomy; Economy.

Changement du contexte de la grande culture : questions posées à l'agronome

La rupture qu'a introduite la réforme de la Politique agricole commune (PAC) en 1992 dans le contexte socio-économique de la grande culture peut se résumer en trois points : chute des prix, apparition de contraintes environnementales, segmentation du marché en filières de qualité. La chute brutale des prix (de presque 50 %, à peu près compensée par une aide à l'hectare) a incité les agriculteurs à réduire leurs charges opérationnelles et à augmenter significativement la surface par travailleur [1, 2]. On a ainsi parlé d'intensification puis de désintensification des systèmes de grande culture. Le contexte fluctuant et imprévisible de la réglementation agro-environnementale et du montant des aides compensatoires a appelé les agriculteurs à une adaptation rapide de leurs systèmes de production. Enfin, avec l'émergence de filières de qualité,

une céréaliculture plus diversifiée s'est développée sur la base contractuelle de multiples cahiers des charges, combinant obligation de moyens et/ou de résultats. Ces évolutions ne feront que s'amplifier encore dans le contexte réglementaire européen qui tend vers la réduction et l'uniformisation des soutiens à la production, sous condition de respect de normes agro-environnementales.

Dans ce nouveau contexte en recherche d'équilibre, en attendant le cadre clair d'un nouveau « contrat social » entre la société et ses agriculteurs [3], les systèmes de grande culture doivent être intégrés et flexibles : intégrés pour satisfaire un compromis acceptable entre les objectifs de rentabilité, maintien de la fertilité du sol et respect de l'environnement [4], flexibles pour une adaptation rapide au contexte économique et réglementaire, fluctuant et diversifié.

Pour la recherche agronomique, ce contexte renouvelle la demande de conception et d'évaluation des façons de produire, et incite à un profond changement de démarche [5, 6]. Dans le contexte précédent, stable et favorable au productivisme, les systèmes de culture se définissaient par des successions de cultures et des itinéraires techniques standardisés

par l'intensification (qui gomme la diversité des milieux) et aisément validables par l'expérimentation [7, 8]. Dans le contexte actuel, instable et diversifié, l'expérimentation est impuissante à tester toute la gamme des systèmes de culture envisageables, et à apporter ses réponses avant que le contexte ne soit déjà différent.

Aujourd'hui, plus que des systèmes de culture « clés en main », l'agriculteur doit attendre du conseil technique les méthodes et outils pour concevoir, conduire et évaluer par lui-même les systèmes les mieux adaptés à sa situation (objectifs réalistes, valorisation des ressources disponibles). L'objectif scientifique de conception, conduite et évaluation de systèmes de culture revient alors à formaliser la démarche qui permettra *in fine* à l'agriculteur de convertir tout ensemble spécifié d'objectifs et contraintes en un ensemble cohérent de règles de décision, et à élaborer les outils qui lui permettront de les mettre en œuvre et de les évaluer (*figure 1*).

Chaque intervention technique de l'agriculteur est en effet régie par un ensemble de règles de décision souvent implicites mais que l'agronome cherche à formaliser [9-11]. Ces règles constituent le modèle

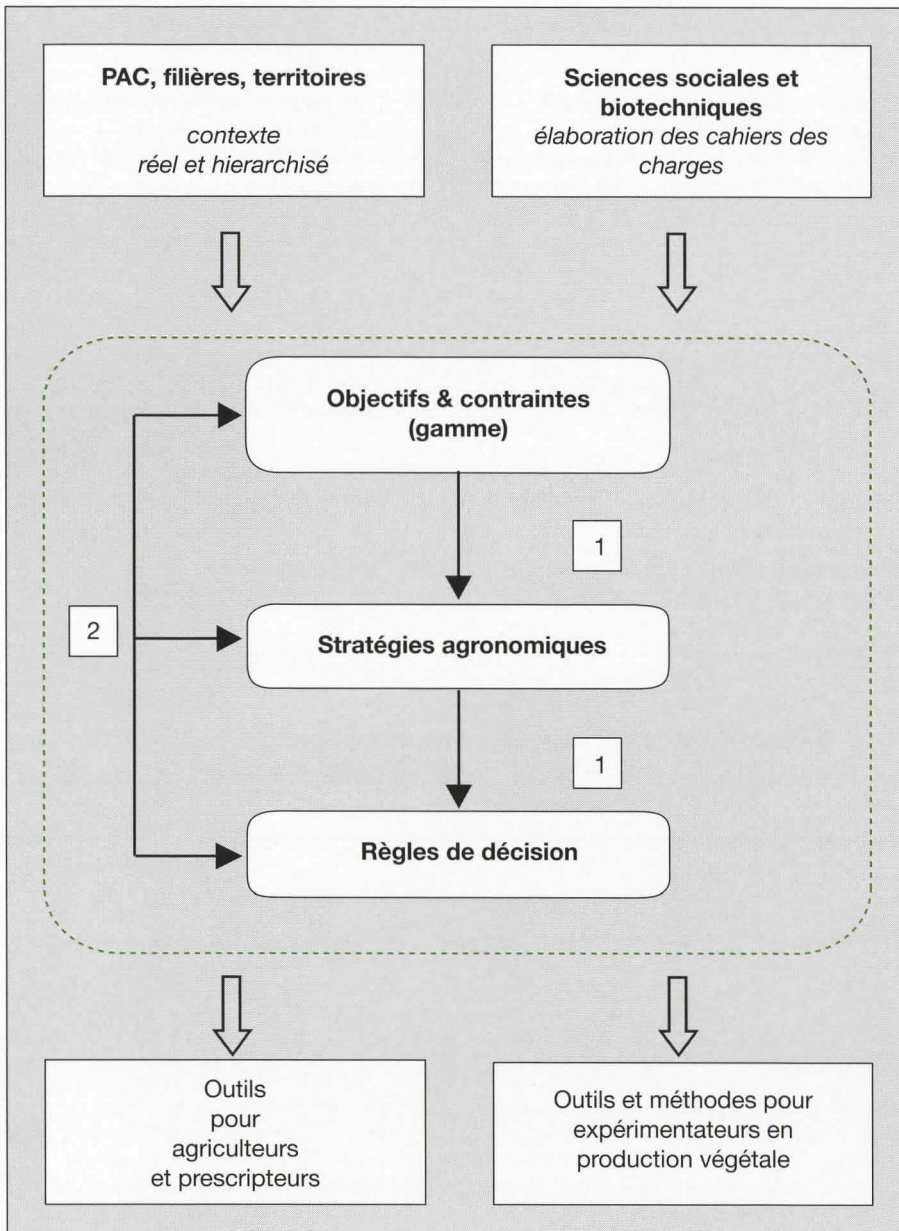


Figure 1. Schéma de la démarche itérative de conception (1)-(auto)évaluation (2) d'un système de culture.

--- précise le contour de l'étude

Figure 1. A generic approach to build and evaluate crop management and cropping systems.

d'action de l'agriculteur pour la conduite de ses cultures : elles tiennent compte de l'état du milieu et de la culture (parcelle), de la disponibilité en ressources (exploitation) et des réglementations extérieures sur l'usage de ces ressources (territoire). Le système de culture peut ainsi être vu comme le résultat de l'application d'un corps de règles de décision sur une surface agricole dans le cadre contraint des ressources (eau, matériel, main-d'œuvre) de l'exploitation.

Évaluer un système de culture consiste à tester son adéquation aux objectifs et contraintes qui lui sont assignés. En se restreignant à une approche annuelle (l'itinéraire technique), Meynard [6, 12] distingue plusieurs niveaux d'évaluation : – une évaluation globale, multicritère, qui consiste à tester l'adéquation d'ensemble de l'itinéraire technique aux objectifs assignés (économiques, environnementaux), sur la base de variables mesurées à maturité ou de variables synthétiques sur l'en-

semble du cycle : ainsi, peut-on obtenir en conduite extensive une marge brute au moins égale à la conduite irriguée, moins rationnée en intrants ;

– une évaluation agronomique, qui consiste à fournir les éléments de compréhension du résultat, et en particulier à vérifier le bien-fondé des hypothèses qui ont servi à construire l'itinéraire technique : ainsi, on cherche à vérifier que la modulation des apports d'azote et l'adaptation de la densité de peuplement permettent d'atteindre en conduite fortement rationnée un développement végétatif plus conforme à la valorisation des ressources hydriques et minérales ;

– une évaluation analytique des règles de décision : il ne s'agit plus ici de vérifier le degré d'atteinte d'un objectif intermédiaire ou la réussite globale des techniques et des règles associées, mais de porter un jugement plus spécifique sur une règle donnée.

Du fait des aléas climatiques ou techniques, l'évaluation globale est toujours insuffisante et ne peut motiver l'économie d'un diagnostic agronomique des résultats obtenus. La diversité et l'instabilité des situations fait que ce diagnostic incombe à l'agriculteur lui-même. Pour des raisons évidentes de lourdeur en temps et coûts, celui-ci n'a pas accès aux outils et méthodes de l'évaluation agronomique tels que les développe l'expérimentateur. Le concept d'auto-évaluation identifie ainsi l'ensemble des outils et méthodes simplifiées dont l'agriculteur doit disposer pour décrire et expliquer le résultat obtenu, porter un jugement sur ses choix techniques et ajuster ses règles de décision. Il est permis de penser que la conduite de systèmes de culture intégrés et flexibles impose d'autant plus une telle auto-évaluation.

Conception de systèmes de grande culture : un cas d'étude dans le sud-ouest de la France

Pour initier une démarche générique de construction et de conduite de systèmes de grande culture, pour concevoir des

outils (modèles et indicateurs) d'accompagnement et pour identifier les informations nécessaires (connaissances agronomiques, variables de milieu, contraintes organisationnelles), nous avons choisi le cadre concret d'une gamme de contextes de production (ensemble d'objectifs et de contraintes) issus d'une prospective régionale pour la région Midi-Pyrénées. La démarche suivie peut se décomposer en quatre temps (*figure 1*):

1. Préciser l'ensemble d'objectifs et contraintes à satisfaire (contexte et cahier des charges).
2. Exprimer une stratégie agronomique « candidate », inspirée par le cahier des charges.
3. Spécifier un ensemble cohérent de règles de décisions.
4. Proposer une démarche d'auto-évaluation.

Un changement de contexte (prix, primes, réglementation...) ou le diagnostic de choix techniques inappropriés (auto-évaluation) amènent naturellement à ajuster, voire à reconstruire, le système (flexibilité des choix de culture et des modes de conduite).

Afin d'évaluer et d'affiner par itérations successives l'ensemble de cette démar-

che, nous nous sommes placés dans le cadre d'une exploitation agricole peu représentative : un domaine expérimental de l'Inra. Les acteurs sont des chercheurs agronomes, qui conçoivent les systèmes et les méthodes d'évaluation, et des techniciens dont certains appliquent et d'autres évaluent les systèmes de culture proposés. L'objectif est de tester une gamme de systèmes prototypes à base de règles, sans prétendre avoir choisi les plus représentatifs ni les plus innovants. Et l'objectif de ce travail est plus de proposer aux agriculteurs *via* leurs prescripteurs des outils et méthodes (testés sur un petit

nombre de systèmes) que des systèmes évalués à reproduire directement (*figure 1*).

Pendant huit années (1995-2002), trois systèmes qualifiés de « productif propre » (A), « extensif technique » (B) et « rustique simple » (C) ont été mis à l'épreuve sur le dispositif expérimental « Systèmes de grandes cultures intégrés » d'Auzeville (*encadré 1*). Le contexte ayant été assez stable, et les choix techniques initiaux s'étant avérés plutôt valides, la définition des systèmes A, B et C a peu évolué au cours des 8 ans. Il est bien entendu que l'on ne peut représenter sur un dispositif

Tableau 1. Succession de cultures pour chaque système, en variante R (rotation fixe).

Table 1. Crop rotation for each system, in fixed 4-year rotation.

	Année 1	Année 2	Année 3	Année 4
A	Maïs puis sorgho (à partir de 2001)	Soja	Pois de printemps	Blé dur
B	Sorgho	Tournesol	Pois d'hiver	Blé dur
C	Sorgho	Tournesol	Féverole puis pois d'hiver (à partir de 1998)	Blé dur puis blé tendre (à partir de 2000)

Encadré 1

Principales caractéristiques du dispositif expérimental SGCI d'Auzeville

Implanté en 1995 sur 33 hectares du Lycée agricole d'Auzeville, le dispositif expérimental comporte 24 parcelles, affectées à trois systèmes de culture (A, B, C), déclinés en deux variantes (F, R) et répétés quatre fois.

- Sur la variante flexible F (12 parcelles), le choix de la succession de culture s'est fait chaque année dans la logique de chacun des systèmes selon le contexte socio-économique et l'état du milieu : blé dur sur les trois systèmes, soja en A et B, tournesol en C ont été les principales cultures (succession blé-tournesol ou blé-soja-tournesol).
- La variante en rotation quadriennale fixe R (12 parcelles) a permis l'étude chaque année d'une large gamme de cultures régionales (*tableau 1*).

Chaque parcelle du dispositif intègre trois échelles de travail (*figure 2*):

1. La parcelle agricole (1,5 hectare) est l'échelle de travail de l'agriculteur qui applique les règles de décision, et auto-évalue le résultat (faisabilité des règles de décision, satisfaction globale des objectifs et contraintes).
2. Sur des stations de 100 m² sont réalisées les observations et mesures du diagnostic agronomique (dynamique et variabilité de mise en place du couvert, de production de biomasse, d'absorption d'azote ; composantes du rendement ; évolution de l'enherbement et de l'état sanitaire).
3. Sur la zone analytique (1/3 de la parcelle, accueil possible de 500 parcelles de 10 m²), on valide expérimentalement les choix de variété, densité de peuplement, protection phytosanitaire et leurs interactions, et on identifie les variétés adaptées à chaque système de culture afin de confirmer ou non les choix effectués.

Le sol d'Auzeville est argilo-calcaire (entre 24 et 34 % d'argile, jusqu'à 50 % en sous-sol), assez profond (réserve utile supérieure à 180 mm) et drainé (mais des problèmes d'excès d'eau et de structure du sol subsistent). Les séquences de culture ont été regroupées par blocs en fonction de la texture du sol : ainsi tous les blés dur (A, B, C) sont implantés sur des parcelles adjacentes et de sols comparables.

Le climat toulousain se caractérise par une somme de températures annuelle de 4 850 degrés.jours⁻¹ (base 0 °C), compatible avec les groupes variétaux demi-tardifs en cultures d'été, une pluviométrie de 710 mm, une évapotranspiration potentielle de 880 mm, un déficit hydrique estival prononcé, l'ensemble étant assorti d'une forte variabilité (climat qualifié de semi-aride à humide selon les années).

Le matériel utilisé (le même pour les trois systèmes étudiés) est celui d'une exploitation de 150 hectares de grande culture (semoir 3 m, épandage 12 m, récolte 3,5 m, tracteurs de 60 à 120 CV).

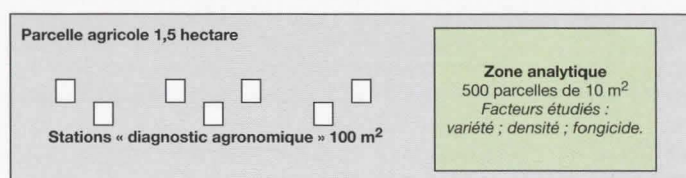


Figure 2. Schéma d'une parcelle expérimentale type.

Figure 2. A typical experimental plot.

expérimental la concurrence entre parcelles et travaux pour le meilleur usage des jours disponibles, telle que la rencontre l'agriculteur sur son exploitation [11]. Cependant, il a été choisi d'expérimenter sur une grande surface (33 hectares, 24 parcelles), pour un certain réalisme agricole.

Contexte et cahier des charges : une gamme de ressources en eau et en main-d'œuvre

Le contexte socio-économique évoqué plus haut justifie que les trois systèmes suivent l'objectif commun d'intégration (rentabilité, maintien de la fertilité, respect de l'environnement), de flexibilité et d'auto-évaluation. Il ne sont différenciés au départ que par le niveau des ressources en eau et en main-d'œuvre.

Lorsque l'agriculteur adopte le système A (« productif et propre »), il ne manque ni d'eau d'irrigation, ni de main-d'œuvre : jusqu'à 240 mm/ha sont consommés en moyenne en cultures d'été (maïs, soja).

Un tel système est pratiqué dans les zones de vallées et terrasses de la région Midi-Pyrénées pour des exploitations d'environ 80 hectares par unité de travail annuel (UTA), où la grande culture est l'activité principale et où les enjeux environnementaux (qualité des eaux) sont importants.

En système B (« extensif et technique »), l'eau et la main-d'œuvre sont plus limitants : l'irrigation ne dépasse pas 120 mm/ha en culture d'été, chaque UTA cultive environ 160 hectares de grande culture et, comme en A, la grande culture est l'activité principale de l'exploitation. L'enjeu pour l'agriculteur est de valoriser de façon optimale des ressources limitées.

Le système C est conduit sans recours à l'irrigation, et la main-d'œuvre y est peu disponible : l'agriculteur est pluri-actif, la grande culture n'est pas sa première préoccupation ; étant peu disponible, il a souvent recours à l'entreprise pour les chantiers d'implantation et de récolte. Aussi recherche-t-il ici un système « simple et rustique ».

Ces différents systèmes peuvent coexister au sein d'une exploitation, en fonction notamment de la nature du parcellaire et des moyens d'irrigation. Pour simplifier et permettre l'expérimentation, nous avons considéré qu'un seul système de culture était pratiqué dans chaque exploitation-type.

Stratégies proposées : productivité, rationnement ou esquivage des problèmes

Les trois systèmes sont « raisonnés » : chacun doit assurer une cohérence durable entre les états du milieu et de la culture et les interventions techniques qu'il est en mesure d'assurer, en tirant profit des synergies possibles entre choix techniques et en gérant des compromis entre leurs effets contradictoires.

À chaque niveau de ressource en eau et en main-d'œuvre, on associe un objectif de rendement (ou un écart au rendement potentiel du lieu), ce qui donne une base de raisonnement et explicite le degré d'extensification choisi (tableau 2).

Pour les cultures et variétés les plus productives (éventuellement tardives et moins tolérantes aux stress biotiques et abiotiques), il est recherché pour le système A l'atteinte du rendement potentiel ou d'une qualité particulière par la satisfaction des besoins de la culture en eau, nutriments et niveau de protection phytosanitaire, mais sans majoration d'assurance sur les intrants (ce qui ne serait ni rentable, ni respectueux de l'environne-

Tableau 2. États objectifs, par culture et par système.

Table 2. Final and intermediate plant targets per crop and per system.

	Systèmes	Maïs (A) sorgho (B, C)	Soja	Tournesol	Pois printemps (P) hiver (H)	Blé tendre	Blé dur
Rendement objectif (q/ha aux normes)	A	128	45	–	50	–	68
	B	90	40	37	45	–	60
	C	68	–	28	37	60	50
Peuplement objectif (plantes/m ²)	A	8,7	39	–	100 P	–	300
	B	33	35	6,7	65 H	–	250
	C	29	–	5,3	40 H	170	200
Consommation d'azote objectif (kgN/ha)	A	270	–	–	–	–	240
	B	210	–	170	–	–	200
	C	150	–	110	–	160	160
Satisfaction du besoin en eau (%)	A	95	85	–	90	–	90
	B	80	80	80	90	–	85

ment). Les cultures possibles sont le maïs, le soja, le pois de printemps et le blé dur. Pour réduire globalement le besoin en eau, le niveau de protection phytosanitaire, les charges opérationnelles et le temps de travail, des cultures moins exigeantes (tolérance aux maladies, plus faibles besoins en eau et en azote) sont choisies en système B (sorgho, tournesol, pois d'hiver, blé dur). Il leur est appliqué un rationnement par l'eau, l'azote et la densité de peuplement, ce qui se traduit en particulier par une réduction de la surface foliaire en phase végétative. On accepte des carences temporaires en azote car on ne vise pas le rendement potentiel. En revanche, il y a obligation de rationner correctement pour assurer un bon compromis entre maintien de la productivité et baisse des charges (régularité de rendement et qualité, maîtrise de l'itinéraire technique).

En système C, il ne suffit pas de rationner la culture (objectif de rendement réduit), il faut aussi « esquiver » les problèmes agronomiques, en choisissant une succession de cultures atténuant les risques et à faibles besoins en eau et en nutriments ou tolérantes à des besoins insatisfaits (les mêmes cultures qu'en B, mais modulation par le choix variétal). Dans le même temps, on cherche à maintenir la fertilité du milieu à moyen terme (fertilité chimique N-P-K, matière organique, structure du sol, stock d'adventices et risque sanitaire réduits).

La figure 3 situe chacun de ces systèmes dans le cadre de la gestion de l'azote, principal levier d'ajustement du degré de rationnement des cultures. Il est suggéré ainsi que l'optimum de fertilisation azotée diminue dès lors que l'on se place en conditions de stress parasitaire ou hydrique probables en fin de cycle, et qu'il ne faut pas alors satisfaire le besoin azoté de la culture en début de cycle.

Règles de décision : spécifier les choix techniques en toutes circonstances

Les décisions se prennent en deux temps successifs. En début de campagne, on se fixe des objectifs de production (espèce, variété, date de semis, succession de cultures, objectif de rendement et objectifs intermédiaires). Puis, au fur et à mesure du déroulement de la campagne, en temps réel, se déroule l'itinéraire technique qui s'adapte aux particularités de

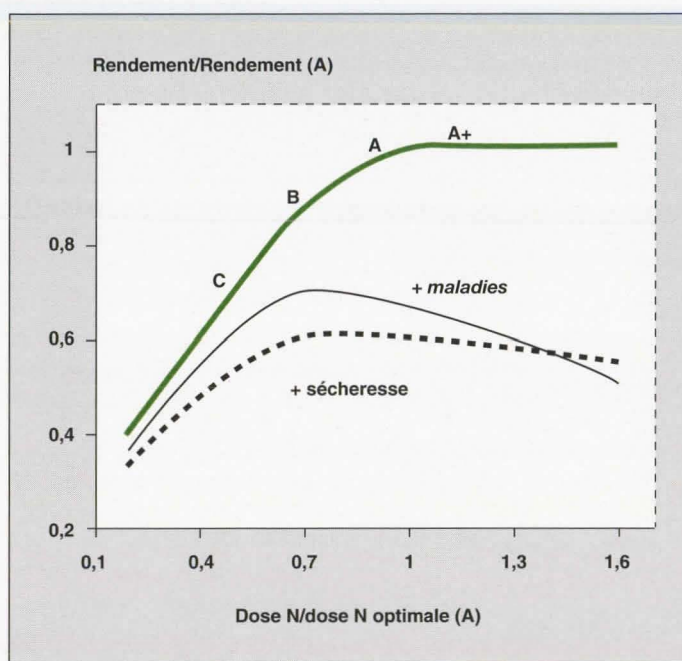


Figure 3. Réponse du rendement à la dose d'azote pour chacun des systèmes.

(A+ = assurance, A = potentiel sans gaspillage, B = eau limitée, C = non irrigué) et en présence de facteurs limitants probables (maladies, sécheresse). Le rendement est représenté relativement au potentiel exprimé en A. La dose d'azote est rapportée à la dose permettant d'atteindre ce potentiel.

Figure 3. Schematic crop response to nitrogen fertilization as a function of systems and limiting factors.

l'année et de la parcelle (climat, indicateurs d'états du sol et de la culture).

En début de campagne (septembre en culture d'hiver, février en culture d'été), s'effectue le choix de culture (encadré 2). Une combinaison culture – variété – période de semis – succession est jugée

possible si on peut lui associer par simulation un itinéraire technique et un résultat technico-économique satisfaisant le cahier des charges. Parmi les cultures possibles (tableau 3), on choisit les plus rentables (marge directe) dans le contexte économique du moment (prix et aides...)

Tableau 3. Avantages agronomiques et risques associés à quelques couples culture précédente – culture suivante en vue d'objectiver le choix d'espèce.

Table 3. Qualitative appreciation of the impact of preceding crops on a range of following crops: Soil structure and fallow period duration (1), weeds and diseases (2), nitrogen residue (3).

Culture suivante	Culture précédente																			
	Blé tendre ou dur				Pois ou féverole				Maïs ou sorgho				Soja				Tournesol			
	1	2	3	n	1	2	3	n	1	2	3	n	1	2	3	n	1	2	3	n
Blé tendre ou dur	+	i	=	0	+	±	+	39	-	+	-	0	-	+	=	15	+	+	=	10
Pois ou féverole	+	±	=	8	+	i	-	0	-	+	=	0	-	±	=	10	+	±	=	16
Maïs ou sorgho	+	+	+	32	+	+	±	2	±	-	-	0	±	=	+	2	+	+	=	4
Soja	+	+	=	16	+	±	i	0	±	=	=	17	±	-	=	0	+	-	=	0
Tournesol	+	+	+	10	+	±	±	0	±	±	=	20	±	-	=	3	+	-	=	0
Colza	+	±	=	0	+	=	+	0	i	+	-	0	i	=	=	0	=	=	=	0

+ : effet favorable ; = : neutre ; - : défavorable ; ± : variable ; i : très défavorable ; durée d'interculture et état structural (1), risque adventices et maladies (2), reliquat azoté (3) ; n = nombre de situations.

Encadré 2

Les choix de début de campagne : culture, variété, date de semis

Le choix de culture commence par l'établissement d'une liste d'espèces possibles : la gamme des grandes cultures cultivées en Midi-Pyrénées, à l'exclusion du colza, non étudié à l'Inra de Toulouse et par ailleurs de résultat fort aléatoire dans cette région.

Le *tableau 3* résume les avantages (+) et inconvénients (--) de chaque couple précédent-suivant, pour les critères de durée d'interculture et état structural (1), de risque adventices et maladies (2), de reliquat azoté (3), dans le cadre d'un labour annuel (sauf avant blé) et sans culture intercalaire. On précise également si l'effet précédent est neutre (=) et si le couple précédent-suivant est interdit en raison de risques trop élevés (i). Le nombre d'occurrences (n) pour chacun des couples (204 situations) est à mettre en perspective avec l'importance des avantages agronomiques.

Ainsi, on s'interdit blé/blé et pois/pois à cause du risque sanitaire, soja/pois en raison du fort reliquat d'azote qui ne peut être valorisé, et colza/culture d'été qui imposerait un semis trop tardif. À part cela, toutes les séquences sont possibles, avec plus ou moins d'avantages. Ce formalisme ne représente pas bien le risque que l'on encourt à plus long terme à exagérer la fréquence des cultures d'hiver (adventices), des cultures d'été irriguées (structure), des oléo-protéagineux (maladies). Chaque année, sur chaque parcelle, l'agriculteur peut choisir la culture suivante sur observation de l'état réel du reliquat azoté, de la structure du sol et du temps dont il dispose pour l'implanter, alors qu'adventices, et surtout maladies, restent perçus comme des risques plus difficiles à apprécier.

Exigeant en eau, le maïs n'est envisagé qu'en **A**. Le semis du 10 avril autorise la variété Cécilia (groupe très tardif). Le sorgho, tolérant la sécheresse, le remplace en **B** et **C**, semé vers le 1^{er} mai (besoin élevé en température). DK18 choisi en **C** est plus précoce que DK26 en **B**. Sorgho **B** et maïs **A** bénéficient d'une aide à l'irrigation de 183 euros/ha. Maïs et sorgho ont souvent été pratiqués après blé, précédent favorable pour l'état structural (sous-solage d'été).

Avec 685 euros/ha, le soja est la culture la plus aidée (prime irrigation puis « soja de pays »). D'abord choisi seulement en **A** pour son besoin en eau élevé, il s'est avéré plus rentable en **B** que le tournesol (moins soutenu). Il est semé fin avril (entre tournesol et sorgho). Imari ou Dekabig (groupe 1) ont remplacé Queen (tardif et moins productif). Le tournesol, très tolérant à la sécheresse, est cultivé en **B** et **C**, mais n'est compétitif qu'en **C**. Santiago puis Melody sont semés vers le 10 avril en **B**. Albena est semé après le 20 avril en **C**. Soja et tournesol se sont bien accommodés d'un précédent peu favorable (maïs ou sorgho), qui leur évite un développement végétatif exagéré.

Après tournesol (**B**, **C**), on sème sans problème début décembre un pois d'hiver, variété Victor ou Cheyenne. Après le soja récolté tard (**A**), on sème Baccara (type printemps) à partir du 1^{er} février (jusqu'au 15 mars en hiver humide). Baccara irrigué est plus productif que le pois d'hiver avec une protection sanitaire moindre, mais son implantation est plus aléatoire. Sans variété rustique ni facile à récolter, le pois n'est pas bien adapté à **C**. Pour limiter la perte d'azote, le pois est toujours suivi du blé, à défaut de colza ou de culture piège à nitrates.

Autre culture régionale bien aidée (550 euros/ha), le blé dur s'impose dans les trois systèmes, semé le 10 novembre en **A** et **B**, après le 20 novembre en **C**. Le choix variétal (Néodur, Nefer, Arcalis) a posé problème en **C** : en l'absence de variété alliant résistance aux maladies et au mitadinage, le blé tendre rustique (Cézanne, Apache) a été préféré les dernières années avec un résultat économique moins attractif mais plus assuré.

et sous contraintes de succession de cultures (risques agronomiques) et d'organisation du travail (pointes de travaux, concurrences). Ce choix fixe l'assolement et le cadre de conduite de chaque culture. Le rendement objectif est fonction de la variété, du déficit hydrique prévu, du niveau de rationnement recherché et de la protection phytosanitaire consentie (*tableau 2*). Le peuplement objectif est proportionnel au rendement objectif et majoré en semis retardé de cultures d'hiver (blé C, pois de printemps A). Hors légumineuses, la fumure azotée est raisonnée selon la méthode du bilan prévisionnel de l'azote généralisée à toutes cultures [13], selon le principe :

Dose engrais N = (rendement objectif × besoin N) – fourniture N du sol

Par la modulation du besoin en azote (kg N par quintal de grain), on se donne les moyens de piloter le rationnement de la

culture, besoin et rendement objectif augmentant de C vers A. En fractionnant l'apport, on ajuste la dynamique de rationnement à la dynamique des besoins de la culture (croissance, qualité) et on optimise le coefficient d'utilisation de l'azote. Cependant, pour les cultures d'été non irriguées (C), il est choisi de bloquer les apports d'azote au semis, ce qui nuit à la maîtrise du rationnement. Enfin, on utilise l'eau d'irrigation (A, B) en priorité sur les cultures sensibles (maïs, soja, pois) et sur leurs périodes critiques (floraison). Les décisions prises en cours de campagne (dites « en temps réel ») concernent le choix du travail du sol, la densité de semis, la protection sanitaire, la dose et la date d'apport de l'eau et de l'azote et, enfin, la date de récolte. Ces choix sont raisonnés sur l'état du sol et de la culture, observé ou simulé en temps réel en A et B, davantage prévu en C (économie d'ob-

servations) : la même règle de décision pour les trois systèmes amène évidemment à des interventions bien différenciées selon les choix de début de campagne (moins d'adventices en semis tardif, moins de maladies avec variété rustique et rationnement par l'azote et la densité, meilleure structure du sol en système peu irrigué, fournitures du sol en azote très liées à l'histoire culturale...). Les doses d'azote et d'irrigation résultant de l'activation des règles illustrent bien par leur amplitude la variabilité des contextes (climat, précédent) et des objectifs (A, B, C) qui sont pris en compte dans les décisions techniques (*figure 4 a-b*).

Dans les trois systèmes, les résidus de récolte sont restitués et enfouis. À Auzerville, les sols argileux de structure fragile imposent un sous-solage (après céréales) et un labour d'automne (effet bénéfique du gel sur la structure) en vue de l'implan-

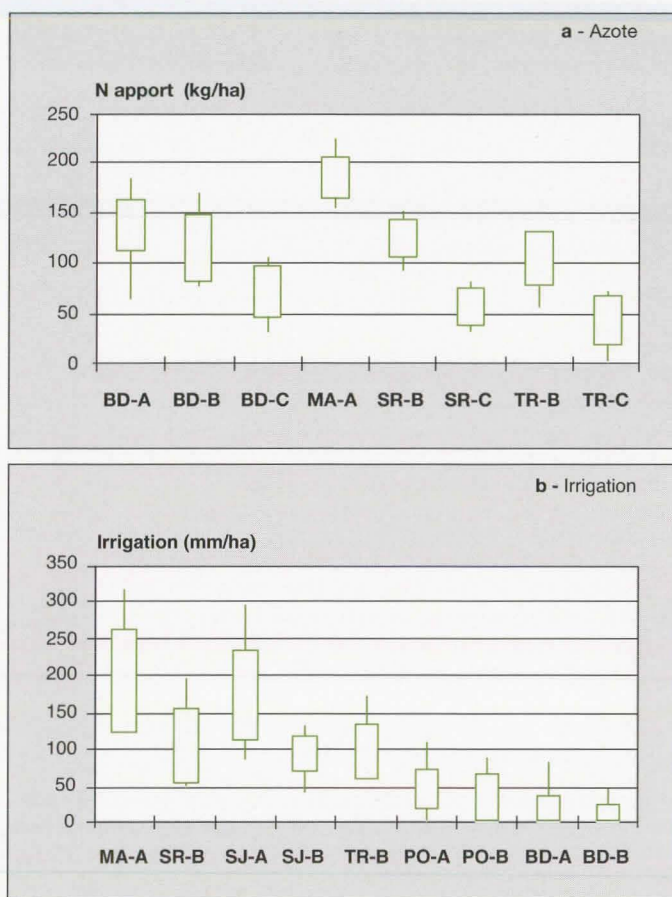


Figure 4. Doses d'azote (a) et d'irrigation (b) résultant de l'application des règles de décision.

Valeur moyenne \pm écart-type (boîtes), valeurs minimales et maximales (traits verticaux).

BD = blé dur ; MA = maïs ; PO = pois de printemps ; SJ = soja ; SR = sorgho ; TR = tournesol.

Figure 4. N rates and irrigation amount resulting from the application of decision rules.

tation des cultures d'été : il n'a pas été pratiqué de cultures intercalaires (difficiles à mettre en œuvre dans ce cas), mais ce choix ne doit évidemment pas être interprété comme un désintérêt pour les techniques culturales simplifiées (TCS) qui permettent de réduire le temps de travail et les cultures pièges à nitrate (CIPAN). L'expérimentation se place ici dans le cadre d'équipements classiques adaptés aux sols de vallées à tendance hydromorphe (*encadré 1*) alors que les TCS ont vocation à être appliquées en sols de coteaux pentus pour limiter les risques d'érosion hydrique.

Démarche d'auto-évaluation : juger par soi-même de la validité de ses choix techniques

Évaluer un système de culture, c'est confronter ses résultats aux exigences du

cahier des charges. Ce travail revient en priorité à l'agriculteur, le mieux placé pour apprécier les circonstances pédo-climatiques et organisationnelles de ses choix techniques, interpréter le résultat particulier obtenu sur chacune de ses parcelles et ainsi contester, valider ou améliorer ses choix techniques.

L'auto-évaluation doit mettre en œuvre des méthodes et outils praticables par l'agriculteur, par opposition à l'évaluation agronomique qui met en jeu sur un dispositif expérimental des modèles, observations et mesures lourdes et coûteuses en temps ou en argent. Cela oppose sur notre dispositif les modèles simples de tenue de bilans hydrique et azoté (bilH, bilN) à des modèles de simulation du fonctionnement de la parcelle cultivée plus exigeants en données d'entrée, et les observations qualitatives de tour de plaine aux mesures de composantes du rendement, d'indice foliaire, d'indice de nutrition azotée réalisées sur les stations de diagnostic agronomique (*encadré 3*).

L'évaluation se fait selon trois axes de nature bien différente ; il s'agira plus d'apprécier si le compromis entre ces trois axes est acceptable que d'optimiser une fonction d'utilité les combinant :

1. Pour l'évaluation technico-économique, on dispose de critères quantifiés à l'échelle de la parcelle : il s'agit d'apprécier si l'usage du facteur de production le plus limitant (surface, main-d'œuvre) a dégagé la meilleure rentabilité, sous contrainte de respect du cahier des charges (niveaux d'intrants, qualité de récolte...). Le critère économique de marge directe (MD = produit brut - coûts des intrants - charges de matériel) est satisfaisant pour apprécier la rentabilité des trois systèmes, et pour les comparer sans biais. Chaque système a son facteur limitant (surface en A, main-d'œuvre en B, simplicité en C). A sera donc jugé sur MD/ha, B et C sur MD/temps de travail par hectare. Il n'a pas été trouvé de critère satisfaisant pour évaluer la simplicité en C.

2. L'évaluation organisationnelle apprécie plus qualitativement la faisabilité des règles de décision à l'échelle de l'exploitation (pointes de travaux, jours disponibles, adéquation du matériel). Le dispositif (à l'échelle de la parcelle) ne permet qu'une appréciation empirique de la faisabilité des systèmes.

3. Par l'analyse dynamique des états du sol et de la culture, l'évaluation agro-environnementale permet d'interpréter le résultat en comprenant l'effet année, d'apprécier l'état du milieu laissé à la culture suivante (fertilité) et les risques de pollution encourus à l'échelle du bassin-versant. Outils et méthodes pour formaliser la démarche de diagnostic agronomique *a posteriori* sont seulement esquissés.

Ensemble intégré d'outils et méthodes de gestion du système d'information

La mise en œuvre de la démarche décrite dans les sections précédentes fait appel à trois types d'actions :

1. Simuler l'itinéraire technique sur une gamme de climats (et sols), pour en apprécier la faisabilité et l'intérêt technique, économique et environnemental.
2. Moduler les choix techniques en temps réel par l'observation ou la simulation d'indicateurs d'états de sol et de culture.
3. Porter un diagnostic *a posteriori* pour juger et ajuster les règles de décision appliquées.

Outils de raisonnement et de diagnostic de l'eau et de l'azote

Sur chaque campagne et chaque parcelle, la tenue des bilans hydrique et azoté est assurée par un modèle couplant bilan d'azote (bilN) et bilan d'eau (bilH), qui gère les données de climat (pluie, ETP, température), sol (réserve utile, teneur en argile), culture (précocité, vigueur, besoin en eau et en azote) et itinéraire technique (semis, fertilisation, irrigation, récolte), et qui calcule l'état hydrique et azoté du sol (% réserve utile, teneur en nitrate, pertes par lessivage) et de la culture (taux de satisfaction en eau et en azote, consommations).

Le conseil d'irriguer est donné quand la satisfaction en eau passe sous le seuil choisi pour chaque culture. Le conseil de fumure intègre l'objectif de consommation d'azote, variable selon les systèmes (tableau 2).

L'état final calculé d'une campagne est pris comme état initial de la campagne suivante.

Un graphique donne *a posteriori* une représentation synthétique du déroulement de la campagne sur chaque parcelle.

Outils de simulation du résultat technico-économique

Les itinéraires techniques prévus, puis réellement appliqués, ont été évalués à partir d'une base de données techniques (temps de travaux moyens ou réels) et économiques (prix des intrants et des livraisons de grains de la coopérative « La Toulousaine de Céréales »). Le coût des interventions s'apprécie sur la base des tarifs d'entraide. On fait l'hypothèse d'un matériel amorti sur une grande surface et on ne compte pas de coût de main-d'œuvre.

Au moyen d'une feuille de calcul, on détermine, par parcelle, à l'établissement de l'assolement (prix prévus, temps de travail moyen) et à la récolte, les variables suivantes :

TW : temps de travail/ha ;

ChM : charges d'équipement ;

ChO : charges opérationnelles ;

PB : produit brut = rendement × prix net/quintal ;

MD : marge directe = PB + aides – ChO – ChM.

La gestion des informations mobilisées par ces trois types d'actions, dans les faits fortement imbriquées (avec un état de culture, on juge les choix passés et on ajuste les choix futurs), requiert un ensemble intégré, cohérent et simple d'usage d'outils et méthodes d'aide à la décision.

Dans les trois systèmes étudiés, on a accès aux « avertissements agricoles » (diffusé par le Service régional de la protection des végétaux) et aux informations techniques (variétés, produits phytosanitaires) édités par le « Développement agricole » (instituts techniques, coopératives, services techniques de Chambres d'agriculture...).

L'utilisateur de modèles d'aide à la décision doit pouvoir à tout moment confronter simulations et observations de tour de plaine, et ainsi faire l'apprentissage de l'outil (paramétrage) et orienter son observation. Par exemple, le coefficient cultural (k_c) qui définit le besoin en eau de la culture est ainsi modulé par les notations de vigueur de végétation établies lors des tours de plaine.

Le choix des outils développés en priorité (encadré 3) est justifié par le fait que les trois systèmes étudiés mettent une priorité sur la maîtrise des facteurs eau (ressource plus ou moins limitée) et azote (premier levier de contrôle du rationne-

ment) ainsi que sur le résultat technico-économique.

Éléments d'évaluation des trois systèmes de culture étudiés

Seuls quelques résultats sont présentés en vue d'illustrer les démarches d'évaluation agronomique, technico-économique, et agro-environnementale mises en œuvre dans le cadre du dispositif systèmes de grande culture intégrés (SGCI).

Validité de la stratégie de rationnement et d'esquive : nécessité du diagnostic

Cette évaluation se fait par l'observation des interactions entre date de semis – densité de peuplement – azote – irrigation et de leurs conséquences sur la mise en place et le développement de la culture, l'apparition et les dégâts des maladies fongiques et l'élaboration du rendement. La validité de la stratégie de

rationnement et d'esquive a été globalement vérifiée sur l'ensemble des cultures : réduire azote et densité concourt bien à réduire la pression des maladies et le besoin en eau ; semer tard réduit bien le salissement par les adventices et la pression des maladies, mais augmente le risque de sécheresse.

Nous n'apportons ici qu'une illustration de ce travail de diagnostic agronomique sur l'exemple du tournesol, pour deux années à forte pression de phomopsis (une maladie responsable d'un dessèchement prématuré des feuilles et tiges). Les résultats analysés ici relèvent de l'évaluation agronomique permise par le dispositif expérimental, mais on peut penser que l'agriculteur attentif au suivi de ses cultures (tours de plaine) serait arrivé aux mêmes conclusions par auto-évaluation.

Le tableau 4 décrit les itinéraires techniques du tournesol pour chaque système (B, C) et ses variantes (B_nt non traité, C_sp semis précoce), le pourcentage de tiges gravement atteintes par le phomopsis (*Diaporthe helianthi*) et le rendement atteint. Les variétés de tournesol utilisées ont le même degré de sensibilité au phomopsis. En 2000, un même état sanitaire acceptable est obtenu en B (semis précoce et dense, azote élevé, un traitement fongicide) et en C avec la stratégie intégrée de rationnement (entre

Tableau 4. Itinéraires techniques du tournesol en 2000 et 2001 et dégâts de phomopsis.

Table 4. Sunflower management systems in 2000 and 2001 and stem canker damage.

Itinéraire technique	2000				2001		
	B	B_nt	C_sp	C	B	B_nt	C_sp
Précédent	Sorgho irrigué		Sorgho sec	Blé dur	Sorgho irrigué		Sorgho sec
Variété	Melody		Albena		Melody		
Date de semis	22/04		22/04	3/05	17/04		
Peuplement (pl/m ²)	6,7		5,4		6,6		5,5
Objectif rendement (q/ha)	39		27		39		27
Fourniture du sol en azote (kg/ha)	83		86	127	90		92
Azote apporté (kg/ha)	122		63	19	118		51
Irrigation (mm/ha)	81		0		64		0
Fongicide	1	0	0		1	0	0
% phomopsis	40	85	60	35	4	20	55
Rendement à 9 % (q/ha)	42	32	28	32	36	20	18

B et C_{sp}, - 25 % de symptômes en réduisant azote et densité de semis) et d'esquive (entre C_{sp} et C, - 25 % en retardant le semis) : comme les années précédentes, cette stratégie semble bien validée. Mais ce résultat est contredit en 2001, C étant le plus malade, avec un résultat technique assez désastreux (18 q/ha) : en fait, cette année-là, dans un premier temps, la parcelle C dont le sol est bien structuré et qui a reçu l'azote uniquement au semis était plus couvrante que la parcelle B (de structure dégradée et pour laquelle le principal apport d'azote a été retardé avant la première irrigation) ; avec une attaque de phomopsis particulièrement précoce, c'est donc paradoxalement B qui vérifie l'intérêt du rationnement. En 2001, l'avertissement du Service régional de la protection des végétaux indiquait un risque phomopsis exceptionnel, et l'échec du rationnement était visible en tour de plaine. En C, ne pas traiter ne doit donc pas être un choix normatif. Hors essai, on a bien observé de moindres dégâts en semis de début mai. En C, il fallait ici semer plus tard (même s'il est difficile de retarder volontairement le semis quand les conditions sont favorables) ou alors utiliser un fongicide.

Évaluation technico-économique (regroupement 1996-2001)

Les systèmes étudiés ont été suffisamment stables sur 6 ans (pas de dérive nette de contexte économique, ni d'états du mi-

lieu) pour autoriser les regroupements des résultats annuels, par systèmes (tableau 5) puis par combinaisons culture-système (tableau 6).

On trouve dans l'encadré 3 le mode de calcul de PB (produit brut) et MD (marge directe), TW (temps de travail), ChM (charges de matériel), ChO (charges opérationnelles) résultant de l'enregistrement régulier des pratiques.

Les trois systèmes sont bien discriminés sur les données techniques, les charges et le niveau des aides (tableau 5). Sans différentiel d'aide, ou par heure travaillée, le système C est largement le plus rentable dans les conditions expérimentales (sol profond) et le contexte 1996-2001.

En blé dur, la meilleure marge directe est obtenue en B (ou A). La conduite C a souffert de graves attaques de rouille

brune (cv. Néodur, variété sensible) ou de qualité (cv. Nefer trop mitadiné a été déclassé en blé fourrager) : du blé tendre a été réintroduit à partir de 2000 (deux parcelles). Le blé a profité de précédents pois (A, B, C) et tournesol (C), favorables pour les reliquats d'azote et la structure du sol, mais a souffert du précédent soja irrigué et récolté tard (A : quatre situations, B : huit situations).

Le pois de printemps cv. Baccara implanté en A après soja est plus aléatoire que cv. Victor ou Cheyenne, variétés d'hiver semées en B et C en décembre après tournesol. C ne profite pas de l'aide complémentaire à l'irrigation accordée au pois. Et sans le levier azote, le rationnement de C n'est pas assez maîtrisé pour esquiver correctement les maladies.

Le maïs, cultivé seulement en A, assure le plus fort produit brut, mais est très décevant en marge directe : il fait jeu égal avec le sorgho en B et serait, sans aide à l'irrigation, largement dépassé par le sorgho en C (qui surpasse dans ce contexte toutes les autres cultures). Notons cependant que le sorgho C bénéficie à Auzeville d'un sol profond et d'un précédent blé favorable.

Le soja a connu de sévères attaques de sclérotinia (*Sclerotinia sclerotiorum*) en A (variante F, quatre situations), en raison d'un retour trop fréquent des oléoprotéagineux sur ces parcelles. Le rationnement en eau (conduite B), la longueur de la rotation (retour tous les 4 ans) ou une structure du sol dégradée (A, variante R) ont limité l'exubérance végétative et la pression de la maladie. Le soja a été par ailleurs la culture la plus soutenue, et n'aurait sans cela pas été très compétitive. Implanté après sorgho, le tournesol ne bénéficie pas d'un précédent favorable

Tableau 5. Résultats technico-économiques (1996-2001) : moyennes par système.

Table 5. Technical and economical performances of each system.

	Données techniques										Charges euros/ha		Produits euros/ha euros/h			
	nb	%rdt	N	Eau	TW	ChM	ChO	Sem	Fert	Pest	PB	aidC	MD	MD0	MDh	
A	48	92	87	87	12,7	298	324	84	52	122	801	562	701	140	55	
B	48	88	79	58	11,9	269	264	66	52	103	724	558	714	156	60	
C	48	75	50	0	9,0	204	176	61	35	79	626	432	647	215	72	

nb : nombre de situations « parcelles*années » regroupées ; %rdt : rendement en % du rendement potentiel (objectif A) ; N : fumure azotée en kg N/ha ; eau : irrigation en mm/ha (coût : 0,76 euro/mm) ; TW : temps de travail (hors observations et transports) en h/ha ; ChM : charge « matériel » en euros/ha (hors main-d'œuvre) ; ChO : charges opérationnelles en euros/ha ; dont Sem, Fert, Pest : semences, engrais, pesticides (euros/ha) ; PB : produit brut (Rdt * prix), en euros/ha ; aidC : aides compensatoires (avec compléments irrigué, blé dur, soja de pays), euros/ha ; MD : marge directe (euros/ha) ; MD0 : marge directe sans aide (effet « aide/ha commune à toutes les cultures »), euros/ha ; MDh : marge directe horaire (MD/TW).

Tableau 6. Résultats technico-économiques (1996-2001) : moyennes par culture et par système.

Table 6. Technical and economical performances per crop and per system.

		Données techniques					Charges euros/ha					Produits euros/ha			
		nb	rdt	N	eau	TW	ChM	ChO	Sem	Fert	Pest	PB	aidC	MD	MD0
Blé dur	A	16	63	141	5	9,6	188	290	54	78	154	775	552	809	257
	B	16	57	118	6	9,0	178	235	43	71	115	714	551	815	264
	C	16	50	73	0	7,3	156	192	48	49	95	609	518	748	230
Pois	A	10	47	2	45	12,8	309	233	64	22	113	616	578	623	45
	B	8	48	0	23	12,4	291	203	40	27	118	608	585	670	85
	C	6	38	0	0	10,3	243	152	36	26	91	492	400	476	75
Maïs	A	10	122	190	193	17,8	429	457	135	100	74	1176	434	623	188
Sorgho	B	8	88	132	108	14,9	345	257	74	69	30	842	439	625	186
	C	10	80	60	0	11,2	253	128	71	43	13	755	253	578	325
Soja	A	12	36	0	139	12,6	326	332	98	2	126	702	667	688	21
	B	10	39	11	97	13,1	319	317	101	21	120	755	705	799	94
Tournesol	B	6	37	119	105	13,5	298	346	88	59	119	694	452	479	27
	C	14	31	46	0	8,9	204	190	72	23	97	578	451	615	165

nb : nombre de situations « parcelles * années » regroupées ; %rdt : rendement en % du rendement potentiel (objectif A) ; N : fumure azotée en kg N/ha ; eau : irrigation en mm/ha (coût : 0,76 €/mm) ; TW : temps de travail (hors observations et transports) en h/ha ; ChM : charge « matériel » en €/ha (hors main d'œuvre) ; ChO : charges opérationnelles en €/ha dont Sem, Fert, Pest : semences, engrais, pesticides (€/ha) ; PB : produit brut (Rdt * prix), en €/ha ; aidC : aides compensatoires (avec compléments irrigué, blé dur, soja de pays), €/ha ; MD : marge directe (€/ha) ; MD0 : marge directe sans aide (effet « aide/ha commune à toutes les cultures »), €/ha ; MDh : marge directe horaire (MD/TW).

surtout en B (faibles reliquats d'azote minéral, profil dégradé). En C, le semis en général plus tardif et le rationnement par l'azote et le peuplement ont le plus souvent limité correctement les maladies. Comme le sorgho, le tournesol profite du sol profond à Auzeville.

Évaluation agro-environnementale : encore des problèmes de choix de méthodes

Les trois systèmes sont ici évalués par le calcul d'indices agro-environnementaux (méthode INDIGO® de l'Inra de Colmar) [14] sur les campagnes 1999 et 2000, en variantes R « rotation fixe » uniquement. Contrairement à la plupart des autres méthodes à base d'indicateurs, INDIGO® se situe à l'échelle de la parcelle et combine l'appréciation de conduites à risques (stades d'intervention, doses, nature des pesticides, fréquence de sol nu... : indicateurs IN, IPhy, ISC) au calcul de bilans simplifiés (apports-besoins) tenant compte du type de sol, du climat de l'année, des besoins de la culture (Imo, IN, IP, Irr).

La figure 5 présente la valeur prise par chaque système de culture pour les huit indices calculés. Les valeurs supérieures à 7 sont considérées comme satisfaisantes.

• IEn, l'indice bilan d'énergie, est bon en C malgré le niveau élevé de travail du sol (labour). Le coût énergétique de l'azote et

de l'irrigation pénalise A et B. Au quintal produit, le rendement énergétique des trois systèmes est cependant comparable.

• Irr, l'indice d'irrigation, est acceptable parce que l'irrigation est raisonnée sur le besoin en eau de la culture. Il n'y a pas de bonification appréciable pour le rationnement poussé de B.

• IPhy, l'indice d'usage des produits phytosanitaires, est presque acceptable dans les trois systèmes qui utilisent des produits à faible toxicité en respectant les doses appliquées à l'aide d'un pulvérisateur en bon état.

• IN, l'indice azote, est insatisfaisant dans les trois systèmes, le sol nu en hiver étant fortement pénalisé, sans nuance de pro-

fondeur de sol ni de type de succession de cultures.

• IP, l'indice phosphore, est à peine satisfaisant, la fumure pratiquée ne suffisant pas au maintien de la fertilité du sol (ce que l'analyse de sol a confirmé). A, qui reçoit la même fumure et exporte plus que B et C, est un peu plus pénalisé.

• Imo, l'indice de matière organique, n'est pas satisfaisant du fait de la pratique du labour (dilution) et de l'irrigation (minéralisation plus rapide). A limite la chute de cet indice par une restitution importante de pailles.

• ISC, l'indice de succession de cultures, est à peine suffisant parce que les successions tournesol ou soja – pois comportent

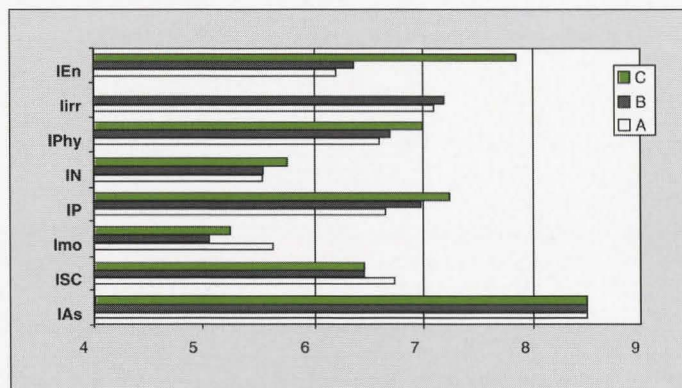


Figure 5. Valeurs des huit indices INDIGO® pour les trois systèmes de culture.

IEn : bilan énergétique ; Irr : irrigation ; IPhy : produits phytosanitaires ; IN : azote ; IP : phosphore ; Imo : matière organique ; ISC : succession de cultures ; IAs : assolement.

Figure 5. Values of the eight INDIGO® indices for the three cropping systems.

Tableau 7. Simulation des pertes en azote pour les trois systèmes, puis pour les principaux couples « précédent/suivant » (3 systèmes regroupés) : modèle bilN [13].

Table 7. Simulation of N leaching using bilN for different crop situations.

		IC mois	Drain mm/ha	Reh kg/ha	NLt kg/ha	NO ₃ mg/L
Effet système	A B C	5,9	175	64	14	32
		6,3	170	62	12	29
		6,5	155	63	11	27
Effet année	1996 1999	6,2	213	76	20	39
		6,1	120	53	5	18
Effet succession de cultures : culture/précédent	blé/pois	4,9	165	129	23	54
	soja-tournesol/blé	9,7	172	67	17	41
	maïs-sorgho/blé	9,5	190	69	18	40
	pois/tournesol-soja	3,3	143	57	10	29
	blé/tournesol-soja	1,6	140	59	5	8
	tournesol/sorgho	6,5	172	4	1	3
	soja/maïs-sorgho	7,0	193	10	4	9

IC : durée de la période de sol nu en interculture ; Drain : lame d'eau drainée ; Reh : reliquat d'azote minéral entrée hiver ; NLt : azote perdu par lessivage en un an ; NO₃ : teneur en nitrates de l'eau percolée.

un risque sanitaire élevé (risque non vérifié sur la durée de l'expérimentation) : de telles normes devront être régionalisées.

• IAs, l'indice d'assolement est excellent, avec quatre cultures (et forfaitairement 20 % de prairie en gel fixe), mais ce jugement ne porte que sur la variante R en rotation fixe.

Avec INDIGO[®], IN juge sévèrement les trois systèmes alors que le raisonnement de l'azote est au cœur de leur conduite : pour approfondir cette question, nous pouvons confronter ce résultat à ceux obtenus avec le modèle bilH-bilN pour simuler la lixiviation du nitrate (regroupement de 1995 à 1999) (tableau 7).

NO₃, la teneur en nitrates de l'eau percolée, est calculée en diluant NLt (azote perdu par lessivage en un an) dans Drain (lame d'eau drainée) ; Reh (reliquat d'azote minéral entrée hiver), Fum (apport d'azote) et IC (durée de la période d'interculture de sol nu) sont des variables explicatives potentielles. En moyenne, les trois systèmes sont en dessous de la norme de 50 mg de nitrate/L et peu différents : ce résultat s'explique évidemment par le fait que la fumure azotée, même en A, n'a jamais été excessive (ce que confirment les valeurs d'indice de nutrition azotée et les reliquats post-récolte), et par le fait que nous sommes en sol profond. Si l'on compare 1996 (année sèche) et 1999 (année humide), on note que l'effet année est bien plus élevé que l'effet système. L'effet succes-

sion de cultures (classement NO₃ décroissant, en moyenne sur 5 ans) est le plus

significatif : le pois laisse beaucoup de reliquats azotés que le blé (pourtant le meilleur choix de culture suivante envisagée) exploite imparfaitement. Le problème des intercultures longues (en sol nu) se pose ensuite, seulement dans le cas où les reliquats sont élevés à l'entrée de l'hiver. Les précédents maïs et sorgho, qui restituent au sol de grandes quantités de pailles susceptibles d'immobiliser de l'azote minéral, ne conduisent pas à des valeurs de reliquats nitriques élevées.

Conclusions : intégrer connaissances, méthodes et expérience

Les systèmes étudiés et le contexte de la grande culture

Il est entendu que les résultats de l'essai sont indissociables du milieu d'Auzeville

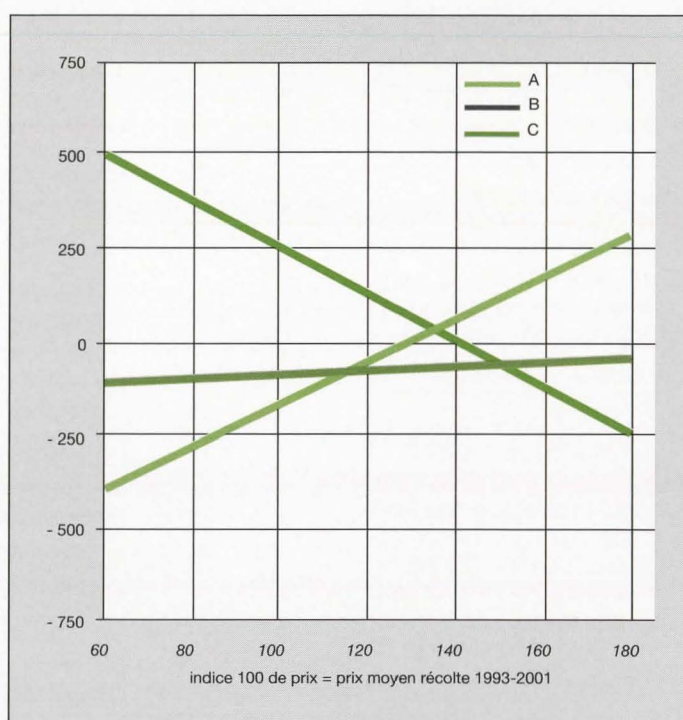


Figure 6. Classement de la marge directe pour les trois systèmes de culture A, B et C selon les prix relatifs intrants-récoltes.

Sur la base des données technico-économiques moyennes obtenues sur le dispositif de 1996 à 2001, la figure illustre la sensibilité au prix des récoltes du classement des trois systèmes sur le critère de marge directe par hectare.

$$\Delta MD = \Delta \text{rdt} \cdot \text{lprix} - \Delta \text{ChO} - \Delta \text{ChM}$$

(avec ΔX , l'écart de la valeur de chaque variable pour chaque système à la moyenne des trois systèmes).

Figure 6. Variation of direct margin with crop prices for the 3 cropping systems.

et du contexte passé. On peut cependant en tirer quelques conclusions pratiques et générales, en prenant A, B et C pour représentants de trois attitudes type en grande culture : productivisme, extensification, simplification.

Au vu du résultat économique, le système A (productif), normalement le mieux placé en produit brut et marge brute, fait à peine jeu égal avec B (extensif) sur le critère de marge directe par hectare. Et c'est même C (rustique) qui aurait la plus forte marge directe si A et B n'avaient pas profité du supplément d'aide à l'irrigation.

La *figure 6* simule l'effet du prix des récoltes en marge directe par hectare sur le classement des trois systèmes. On note que l'augmentation du prix de récolte est bien sûr favorable à l'intensification, et que, sans supplément d'aide à l'irrigation, les systèmes A, B et C seraient équivalents avec un indice de prix de 130 (l'indice de prix avant la PAC 1992 était de 170 environ).

Ce résultat très en faveur de l'extensification se vérifie sur toutes les espèces de grande culture étudiées : le meilleur résultat économique serait apporté par un système mixte B-C, selon les niveaux d'aide et de tolérance de la qualité au rationnement de la culture. Il est clair aussi que ce contexte n'est pas directement favorable à la création d'emplois en grande culture.

C'est aussi en A que les principaux problèmes agronomiques ont été rencontrés : dégradation de structure du sol avec l'irrigation, problème de sclérotinia en soja. Dans le contexte actuel, la conduite A des grandes cultures n'a plus lieu d'être et, en situation de disponibilité en eau et main-d'œuvre, il serait justifié de faire évoluer ce système vers des productions de qualité particulière et de prix élevé. Que A évolue vers l'agriculture biologique (système à forte obligation de moyens, exigeant en temps d'observation, nombre et qualité des interventions culturales) serait donc paradoxal mais raisonnable.

Sur la période d'étude, le différentiel d'aide compensatoire entre cultures a favorisé soja et blé dur. Une aide compensatoire unique aurait, en revanche, pénalisé l'ensemble des oléoprotéagineux. Primes rotationnelles, diversification des filières qualité seront-elles suffisantes pour dissuader la pratique de systèmes peu agronomiques,

tendant vers des rotations très courtes ou des monocultures ?

Sur le plan de l'environnement, les trois systèmes qui mettent en œuvre des interventions raisonnées paraissent assez équivalents. Et le risque d'interventions mal ciblées est en fait plus élevé en B et C, du fait du manque de temps pour observer (C) et/ou intervenir juste au bon moment (B) mais aussi du manque d'eau pour optimiser l'efficacité des apports d'azote (C).

Sur notre dispositif expérimental, les systèmes étudiés ont privilégié la contrainte hydrique et le levier de rationnement par l'azote (sauf en légumineuses) : plus efficace et mieux contrôlé que date et densité de semis, le rationnement par l'azote pose encore problème s'il s'agit de maîtriser la teneur en protéines du grain (blé dur). Ce constat peut motiver l'orientation de la sélection vers la recherche de nouveaux types variétaux « bas-intrants » assurant une qualité acceptable sous conduite rationnée en azote (ce besoin s'exprime aussi en agriculture biologique).

Le dispositif n'a en revanche pas suffisamment approfondi les questions de protection intégrée (adventices, insectes, maladies) et de simplification du travail du sol, pourtant aujourd'hui centrales dans la gestion des systèmes de grande culture.

Le temps d'observation des cultures (tours de plaine de l'ordre de 3h/parcelle/an sur le dispositif) n'a pas été comptabilisé avec le temps de travail : le tour de plaine s'organise en effet à l'échelle de l'exploitation, sa durée fluctue beaucoup avec la diversité de l'assolement, l'occurrence des problèmes et l'homogénéité supposée du milieu, et il est contestable de chercher à l'exprimer par hectare.

La démarche : expérimentations et modèles, échelles de travail

À partir de l'analyse du contexte de la grande culture (instable et en cours de segmentation), il nous a semblé que la durabilité des systèmes de culture devait passer par leur adaptation continue, ce qui fait évoluer l'idée de conception de systèmes de culture innovants vers celle

de systèmes de culture dynamiques capables d'intégrer en continu les spécificités locales, les changements de contexte socio-économique ou les innovations techniques. Formation et développement agricole ont à co-construire de tels systèmes avec l'agriculteur qui les pilotera. Le dispositif d'Auzeville, réfléchi comme un lieu concret d'élaboration de cette démarche originale, n'a évidemment pas épuisé les questions méthodologiques que cela pose.

Sur notre dispositif expérimental, à l'échelle du système de grande culture, on a pu confirmer l'importance du raisonnement de la succession de cultures et apprécier la possibilité d'une formalisation très générique des règles de décisions, outils (modèles) de conduite et méthodes d'évaluation (en grande partie communs à l'ensemble des cultures). Mais le travail d'intégration des connaissances et méthodes disponibles en un seul outil de conduite de l'atelier grande culture reste à faire, ce que l'organisation du conseil agricole en filières ou en disciplines ne facilite pas. Et l'idée d'auto-évaluation, attachée à celle d'agriculteur responsable de son système de culture, manque encore d'outils et méthodes faciles à transmettre, explicitant le travail d'adaptation et de validation des stratégies et des règles de décision qu'elle doit permettre.

Bien qu'encore imparfaitement maîtrisée, l'échelle du système de culture s'avère maintenant insuffisante : (i) pour raisonner l'organisation et l'affectation des facteurs de production, et pour gérer les concurrences entre parcelles (fortes en systèmes extensifs mais aussi en systèmes irrigués lorsque la ressource en eau est limitée), il faut se placer à l'échelle de l'exploitation ; (ii) pour gérer et évaluer la durabilité des systèmes de production agricole, il faut se placer à l'échelle du territoire (bassin-versant, bassins de collecte ou d'emploi, terroirs...).

Il serait cependant dommage que le nouveau contexte d'aspiration au développement durable et à la traçabilité des pratiques agricoles amène à court-circuiter l'échelle du système de culture, à laquelle se pratique le diagnostic agronomique toujours nécessaire à la compréhension de ce qui s'est passé, au raisonnement des ajustements de pratiques à la diversité des milieux et contextes et à la prévision de leurs conséquences, plutôt que de poursuivre exclusivement dans la voie de la normalisation des façons de produire ■

Remerciements

Nos remerciements vont à tous ceux qui ont permis l'installation, la conduite et le suivi de ce dispositif : équipes techniques du Domaine expérimental d'Auzeville et de l'unité d'Agronomie de Toulouse, partenaires du Lycée agricole d'Auzeville (mise à disposition de 33 hectares de son exploitation), de la Chambre régionale d'agriculture de Midi-Pyrénées et de la Station inter-instituts de Bazège (contribution à l'élaboration des règles de décision et à l'évaluation). Nous remercions également tous les collègues qui nous ont fait part de leurs remarques avisées et de leurs encouragements aux diverses étapes de ce projet, parmi lesquels M. Benoît, J.-E. Bergez, C. Bockstaller, J. Boiffin, P. Castillon, Y. Chabanel, B. Colomb, M. Duru, N. Girard, Ph. Girardin, E. Justes, J. Lambert, Ph. Leterme, C. Longueval, J.-M. Meynard, P.L. Osty, F. Papy. Ce projet a bénéficié du soutien financier du Conseil régional Midi-Pyrénées.

Références

1. Poiret M. Maîtrise de la production et conduite économique pour les grandes cultures. In : Bilan de trois années d'application de la réforme. *Agreste, Les Cahiers* 1996 ; 1/2 : 37-45.
2. Ministère de l'Agriculture et de la Pêche. *Recensement agricole 2000*. www.agreste.agriculture.gouv.fr.
3. Landais E. Agriculture durable : les fondements d'un nouveau contrat social. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA* 1998 ; 33 : 5-22.
4. Viaux P. Les systèmes intégrés : approche agronomique du développement agricole durable. *Aménagement et Nature* 1995 ; 117 : 31-45.
5. Meynard JM, Girardin P. Produire autrement. *Le Courrier de la Cellule Environnement INRA* 1991 ; 12 : 25-31.
6. Meynard JM. La modélisation du fonctionnement de l'agrosystème, base de la mise au point d'itinéraires techniques et de systèmes de culture. In : Biarnès A, Fillonneau C, Milleville P, eds. *La gestion des systèmes de culture : regards d'agronomes*. Paris : Orstom 1997 : 29-54.
7. Debaeke P, Doré T, Viaux P. Production de références sur les successions de culture. In : *Expérimenter sur les conduites de cultures : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*. Paris : DERF-ACTA, 1996 : 87-98.
8. Reau R, Meynard JM, Robert D, Gitton C. Des essais factoriels aux essais « conduite de culture ». In : *Expérimenter sur les conduites de cultures : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*. Paris : DERF-ACTA, 1996 : 52-62.
9. Sebillotte M, Soler LG. Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *CR Acad Agr Fr* 1988 ; 74 : 59-70.
10. Aubry C, Papy F, Capillon A. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 1998 ; 56 : 45-65.
11. Papy F. Interdépendance des systèmes de culture dans l'exploitation. In : Malézieux E, Trébuil G, Jaeger M, eds. *Modélisation des agroécosystèmes et aide à la décision*. Paris : Cirad-Inra 2001 : 51-74.
12. Meynard JM, Reau R, Robert D, Saulas P. Evaluation expérimentale des itinéraires techniques. In : *Expérimenter sur les conduites de cultures : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation*. Paris : DERF-ACTA, 1996 : 63-72.
13. Nolot JM, Debaeke P. *A generic model to manage N in cropping systems differing by water availability*. Proc 11th Nitrogen Workshop, Reims (France), 9-12 September 2001 : 401-2.
14. Girardin P, Bockstaller C, van der Werf H. Indicators: Tools to evaluate the environmental impacts of farming systems. *Journal of Sustainable Agriculture* 1999 ; 13 : 5-21.