

associer des itinéraires techniques de niveau d'intrants variés à des variétés rustiques de blé tendre : évaluation économique, environnementale et énergétique

Christine Bouchard^a, Marie-Hélène Bernicot^b, Irène Félix^c, Olivier Guérin^d,
Chantal Loyce^e, Bertrand Omon^f, Bernard Rolland^g

^a INRA UMR 211 INRA / AgroParisTech, bâtiment EGER, F-78850 Thiverval-Grignon

^b ARVALIS-Institut du végétal, La Minière, 78280 Guyancourt

^c ARVALIS-Institut du végétal, domaine du Chaumoy, 18570 Le Subdray

^d Chambre d'agriculture de Charente Maritime, 12 boulevard Lair, 17400 Saint-Jean-d'Angély

^e AgroParisTech UMR 211 INRA / AgroParisTech, bâtiment EGER, F-78850 Thiverval-Grignon

^f Chambre d'agriculture de l'Eure, 12 rue Georges Clémenceau, 27150 Etrepagny

^g INRA AgroCampus, UMR 118 Amélioration des plantes et biotechnologies végétales, 35653 Le Rheu

*bouchard@grignon.inra.fr ; mh.bernicot@arvalisinstitutduvegetal.fr ; i.felix@arvalisinstitutduvegetal.fr ;
olivier.guerin@charente-maritime.chambagri.fr ; loyce@grignon.inra.fr ; bertrand.omon@eure.chambagri.fr ;
b.rolland@rennes.inra.fr*

L'impact de l'utilisation des engrais azotés et des pesticides (Aubertot *et al.*, 2005) sur l'environnement ainsi que l'instabilité des prix de vente des céréales ont suscité un certain nombre de réflexions sur de nouvelles manières de produire du blé tendre d'hiver, en prenant notamment appui sur le progrès variétal. Ainsi, à partir de 1999, l'INRA, l'ITCF (puis ARVALIS-Institut du végétal), les sélectionneurs du GIE Club des -Cinq et les chambres d'agriculture d'Indre-et-Loire et du Morbihan ont engagé une collaboration afin d'évaluer l'intérêt des variétés rustiques conduites avec des itinéraires techniques à niveaux d'intrants réduits. Ces variétés ont été choisies parmi celles présentant des caractères de multirésistance aux maladies et à la verse, tout en s'assurant d'un niveau de rendement comparable aux autres cultivars du catalogue. Le réseau expérimental multilocal mis en place de 2000 à 2002 a révélé des performances économiques satisfaisantes de ces itinéraires techniques au regard des recommandations locales, et ce pour le prix de vente moyen de cette période, à savoir 100 € par tonne (Loyce *et al.*, 2001 ; Félix *et al.*, 2002 ; Rolland *et al.*, 2003 ; Loyce *et al.*, accepté).

Ces résultats encourageants ont incité les agents du développement agricole à poursuivre le travail engagé en vue d'une diffusion locale auprès des agriculteurs. Un nouveau réseau expérimental associant les chambres d'agriculture de divers départements, ARVALIS-Institut du végétal et l'INRA a donc été mis en place en 2003 (Rolland *et al.*, 2005). Dans cet article, nous proposons de réaliser une analyse économique des résultats de ce dernier réseau de 2003 à 2006, en prenant en compte différents contextes de prix du blé pour le calcul des marges. Les premiers résultats économiques de la récolte 2007 seront également présentés et resitués par rapport à cette synthèse pluriannuelle. Cette analyse sera complétée par une évaluation de l'efficacité des intrants (au plan économique et du point de vue de l'utilisation de l'engrais azoté), une évaluation environnementale (en relation avec les risques de pertes d'azote et l'usage des produits phytosanitaires) et une évaluation énergétique des résultats.

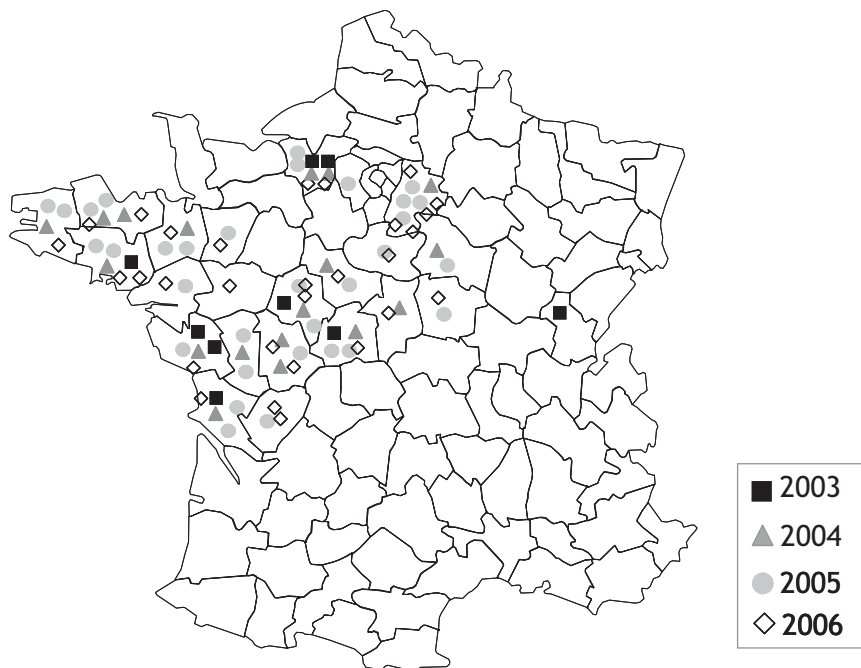


Figure 1. Localisation des essais.

Un réseau expérimental multilocal et pluriannuel

Le réseau expérimental établi en 2003 s'est ensuite progressivement étoffé : le nombre d'essais est en effet passé de 9 en 2003, à 20 en 2004, puis 30 en 2005 et 2006. La synthèse présentée dans cet article porte sur 76 essais, 13 essais n'ayant pu être retenus du fait d'accidents survenus en cours de culture (rendant les résultats peu précis) ou d'écart trop importants au protocole, que ce soit dans le choix des variétés ou dans l'application des règles de décision des itinéraires techniques.

Sur chacun de ces essais, situés pour la majorité dans un tiers nord-ouest de la France (fig. 1), deux itinéraires techniques ont été appliqués sur un ensemble de variétés. Chaque combinaison « variété x itinéraire technique » est répétée 3 ou 4 fois sur chaque essai.

Les itinéraires techniques testés

Les règles de décision pour les conduites testées reprennent en grande partie celles qui avaient été définies dans le réseau d'essais mis en place entre 2000 et 2002 (Rolland et al. 2003). Elles s'appuient également sur des travaux antérieurs menés sur les conduites du blé à bas niveau d'intrants (Meynard, 1985, 1991 ; Loyce *et al.*, 2002a, 2002b). Pour réduire les coûts expérimentaux, seules les conduites ITK2 « conduite de référence » et ITK3 « conduite à coûts réduits » ont été évaluées dans le réseau 2003-2006. Les conduites ITK1 « intensive » et ITK4 « extensive », aux résultats économiques inférieurs dans le réseau 2000-2002, n'ont pas été retenues ici. Des discussions très fructueuses nous ont amenés à préciser, de manière consensuelle, les règles de décision relatives à chaque choix technique de façon à prendre en compte la diversité des conditions pédo-climatiques des sites d'essais. Ainsi, les niveaux d'intrants pour un même itinéraire peuvent varier d'une année à l'autre et entre lieux, mais les règles

de décisions (RDD) établies sont communes (encadré 1 et tableau 1). Le travail du sol, la fertilisation phospho-potassique, la date de semis, le désherbage et la protection contre les insectes sont identiques pour les deux conduites.

L'itinéraire de référence (ITK2) correspond aux recommandations locales d'ARVALIS-Institut du végétal et/ou des chambres d'agriculture pour des variétés à haut potentiel de rendement. Il vise l'obtention d'un rendement élevé avec un objectif calé sur le deuxième quintile des rendements les meilleurs. Les règles de décision associées concernant la densité de semis, la fertilisation azotée, la protection fongicide et l'emploi d'un régulateur de croissance figurent dans le tableau 1. Elles sont choisies pour atteindre l'objectif de rendement assigné à cet itinéraire dans le cas de variétés plutôt sensibles aux maladies (voir

Tableau 1. Les règles de décision associées à chaque itinéraire technique.

ITK	Choix technique	Règle de décision
ITK2	Densité de semis	Suivre les recommandations locales.
	Fertilisation azotée	Estimer la dose totale d'azote à apporter X2 à partir de la méthode des bilans (ou de la méthode dite du CAU en sols caillouteux), pour un objectif de rendement correspondant au deuxième quintile des rendements les meilleurs ; la répartir en 3 apports à mi-tallage, au stade « épi 1 cm » et au stade gonflement. Le déclenchement des apports tallage et « épi 1 cm » pourra se faire grâce au suivi d'une Bande double densité (BDD).
	Protection fongicide	Effectuer 2 à 3 traitements, selon les risques de maladies identifiés sur variétés sensibles à partir d'observations au champ ou de prévisions issues d'un modèle épidémiologique ; le risque fusariose sera apprécié selon le risque parcellaire et les conditions climatiques à la floraison. L'ITK2 peut comprendre 3 traitements dans le cas de régions à forte pression de maladies, ou si le risque de piétin verse ou de fusariose est élevé. La protection fongicide descendra exceptionnellement à un traitement en cas de climat défavorable aux maladies ; la quasi-totalité des conseillers préconisent un seul traitement sur les variétés sensibles. Respecter un intervalle de 4 semaines environ entre traitements. On n'utilisera pas plus d'une strobilurine ^a .
	Régulateur de croissance	Réaliser un traitement préventif contre la verse, sauf si les risques sont localement très faibles pour la variété la plus sensible.
ITK3	Densité de semis	Appliquer une densité de semis réduite de 40% par rapport à celle de l'ITK2.
	Fertilisation azotée	Réduire la dose totale d'azote de 30 kg par hectare par rapport à l'ITK2 et répartir cette dose X3 en 2 apports, au stade "épi 1 cm" et au stade gonflement à épiaison. 3 apports dans des situations de très faibles fournitures en azote du sol. L'outil d'aide à la décision proposé pour déclencher éventuellement un apport d'azote au tallage est la BDD (encadré 1), adaptée à la densité de l'ITK3.
	Protection fongicide	Réaliser 1 traitement au stade « dernière feuille déployée ». Aucun si le programme retenu sur l'ITK2 se limite à un traitement et si les risques d'apparition des maladies sont très faibles. Le programme est optimisé par rapport au groupe des variétés rustiques et raisonné à partir des Avertissements agricoles de la P.V. « corrigés » des observations calées sur une variété résistante, Caphorn, cultivée en situation peu favorable aux maladies (semis clair, azote réduit). Le traitement se fera vers le stade « dernière feuille-gonflement » et au plus tard à l'épiaison. Pas de protection spécifique contre la fusariose. Il n'est pas fait usage de strobilurines ni d'associations de matières actives dont l'efficacité dans les conditions d'utilisation ne serait pas avérée. Les doses utilisées sont comprises entre 0,5 et 0,7 fois la dose homologuée.
	Régulateur de croissance	Ne pas effectuer de traitement.

a. Les règles concernant le choix des produits ont évolué au cours des années pour prendre en compte l'émergence des résistances à certaines familles de matières actives.

Encadré 1. La règle de décision « bande de double densité »

La règle de décision est la suivante :

« Si la décoloration de la BDD mise en place pour l'ITK3 est précoce (au moins 3 semaines avant le stade « épi 1 cm ») alors trois apports sont effectués :

- 40 kg par hectare au moment de la décoloration (avec une tolérance pour la date effective de l'apport de deux à trois semaines après que la décoloration ait été visible) ;
- X3-40-1/3(X3) au stade « épi 1 cm » ;
- 1/3(X3) au stade gonflement.

Si la décoloration de la BDD mise en place pour l'ITK3 est tardive (à savoir une décoloration au-delà de 3 semaines avant le stade « épi 1 cm »), alors le premier apport est supprimé car il est le plus mal valorisé par le peuplement et potentiellement le plus polluant. La dose X3-1/3(X3) est appliquée au stade « épi 1 cm » et la dose 1/3(X3) au stade gonflement.

Si la BDD ne décolore pas alors qu'on se situe au stade « épi 1 cm », alors on déclenche l'apport X3-1/3(X3) au stade « épi 1 cm » et la dose 1/3(X3) au stade gonflement.

Note : si le calcul de 1/3(X3) aboutit à un résultat inférieur à 40 kg par hectare, alors on applique 40 kg par hectare au stade gonflement ».

en particulier la règle de décision retenue pour la protection fongicide). Les outils d'aide à la décision en cours de campagne sont utilisés selon les besoins et les pratiques locales : le calage de la protection fongicide d'après les informations issues des modèles épidémiologiques est généralisé ; l'observation des bandes double densité (Limaux *et al.*, 2001) pour le déclenchement des apports d'azote est proposé dans les régions où cet outil est largement diffusé (sols superficiels). En revanche, afin de maintenir des règles de décision simples, il n'est pas fait appel aux outils d'ajustement de la dose d'azote en cours de campagne.

Dans l'itinéraire technique à niveau d'intrants réduits (appelé ITK3), on accepte une baisse modérée de rendement. On vise une réduction cohérente des intrants, qui se raisonne dès le semis. La réduction de la densité de semis (100 à 250 grains/m² selon les sols et les régions soit environ 40 % de moins que les conseils de référence) présente deux atouts : la dépense en semences est sensiblement moindre et la faible densité de semis réduit la biomasse du peuplement de blé avec pour conséquence des risques de verse limités (Berry *et al.*, 2000), moins de maladies comme l'oïdium (Tompkins *et al.*, 1992) ou le piétin-verse (Huet, 1986; Colbach et Saur, 1998), moins de consommation d'azote. Quand arrive le printemps, les avantages des choix faits à l'automne se manifestent. Il est très souvent possible de supprimer le premier apport d'azote ainsi que le traitement fongicide contre le piétin-verse, tandis que le régulateur de croissance est le plus souvent inutile. L'azote est en général apporté en deux fois, début montaison ou GS 30¹ (Zadocks *et al.*, 1974) puis entre le gonflement (GS 45) et l'épiaison (GS 55), avec une dose totale inférieure de 30 kg par hectare à la dose apportée dans la conduite de référence (ITK2). Dans certaines situations, il est toutefois fait usage d'informations issues d'une bande double densité pour déclencher un apport d'azote plus précoce (encadré 1). Enfin, associée à une date de semis pas trop précoce et à une baisse de densité, la diminution des apports azotés réduit les risques de maladies (Saulas et Meynard, 1998). En effet, si les effets d'une fertilisation azotée réduite restent variables sur une maladie telle que la septoriose (Leitch et Jenkins, 1995 ; Lovell *et al.*, 1997 ; Verjux, 1997 ; Simon *et al.*, 2003), ils sont positifs pour réduire la pression de rouille jaune (Danial et Parlevliet, 1995 ; Neumann *et al.*, 2004), de rouille brune (Verjux, 1997) et d'oïdium (Olesen *et al.*, 2003). Une intervention fongicide unique au stade dernière feuille déployée (GS 41) est donc jugée suffisante dans des conduites à coûts réduits et dans les régions concernées par le réseau de 2003 à 2006.

Dans les deux itinéraires techniques, on vise une teneur en protéines supérieure ou égale à 11,5 %, ce qui justifie le maintien d'un apport d'azote d'au moins 40 kg par hectare au stade épiaison.

1. GS pour *stages of growth*. GS 30, GS 45, *etc.* correspondent à des stades phénologiques identifiés de la plante.

Tableau 2. Présentation des variétés retenues sur l'ensemble des essais (en 2003 pour Oratorio, de 2004 à 2006 pour Orvantis et sur les 4 années pour Apache et Caphorn).

Variété	Année d'inscription	Note de résistance aux maladies ^a						Note de résistance à la verse ^a
		SE ^b	RB ^c	RJ ^d	PV ^e	Oj ^f	Fu ^g	
Apache	1998	4	5	8	2	5	7	8
Caphorn	2001	5	8	8	3	6	3	6
Oratorio	1996	5	7	9	3	7	4	8,5
Orvantis	2000	3	3	5	2	5	3,5	4,5

a : de 1 (très sensible) à 9 (résistante) ; b : septoriose due à *Mycosphaerella graminicola* ; c : rouille brune ; d : rouille jaune ; e : piétin verse ; f : oïdium ; g : fusariose de l'épi.

Sources : Zhang (2005) pour les notes de résistance à la septoriose ; CTPS, ARVALIS-Institut du végétal pour les autres notes de résistance.

Par ailleurs, sur 20 essais, l'ITK2 et/ou l'ITK3 ont été conduits sans apport d'engrais azoté sur une, voire deux variétés. Ces traitements, appelés « témoins 0N », permettent d'estimer la fourniture du sol en azote (par la mesure de la quantité d'azote absorbé par le blé à la récolte), information qui nous sera ensuite utile pour estimer l'efficacité de l'engrais et réaliser une partie de l'évaluation environnementale.

Les variétés retenues dans les essais

De manière à pouvoir établir des comparaisons entre des couples « variété x itinéraire technique » à l'échelle du réseau, un « tronc commun » de 3 variétés destinées à être cultivées sur chaque essai et pour les deux itinéraires techniques a été défini. Ces variétés ont été choisies pour leurs notes de résistance aux maladies et à la verse (tabl. 2) et leur classement par rapport aux pertes de rendement en l'absence de traitement fongicide (tabl. 3). Ainsi, en 2003, ont été retenues (i) Apache, plutôt productive et moyennement résistante aux maladies, (ii) Oratorio et Caphorn, toutes deux de type multirésistant aux maladies et à la verse. A partir de 2004, Oratorio a été retirée du tronc commun au profit d'Orvantis (plus sensible aux maladies et à la verse qu'Apache), de manière à avoir des choix variétaux plus contrastés en matière de résistance variétale. Ne sont présentés par la suite que les résultats sur les variétés présentant un nombre significatif de situations sur plusieurs années, soit Apache, Caphorn et Orvantis.

Ces trois variétés ont été très largement cultivées en France pendant les campagnes 2003, 2004, 2005 et 2006 : Apache est la première variété cultivée, Caphorn la seconde à partir de 2004 et Orvantis arrive en quatrième ou cinquième place (ONIGC, 2003, 2004, 2005, 2006).



Tableau 3. Classement des variétés des plus sensibles aux plus tolérantes par rapport aux pertes de rendement en l'absence de traitement fongicide (essais du Nord de la France, maladies dominantes *Septoria tritici* et rouille brune).

Les plus tolérantes					
Attlas	(Antonius)				
(Koreli)	(Nuage)				
Raffy	Toisondor	Oratorio			
Campari	Centenaire	Ephoros	Pericles	(Inspiration)	
(Azzuro)	Caphorn	(Manager)	Pr22r28		
Avantage	Paledor	Pr22r58	Samurai		
(Paladain)	(Picador)	(Raison)	Sankara		
(Caribou)	Incisif	Nirvana	Quebon	Robigus	
Maxyl	Mercato	Rosario	(Seyrac)	Sponsor	
(Campero)	(Epidoc)	Exotic	Hysun	Mendel	(Hausmann)
Allister	Forban	Intact	Raspail	(Richepain)	(Sogood)
Apache	(Graindor)				
Aguila	Charger	(Hyscore)	Isengrain	Kalango	Vivant
(Garcia)	(Instinct)	Perfector			
(Arack)	Autan	Bastide	Hattrick	Orvantis	
Aztec	Cordiale	Glasgow	Lancelot		
Agrestis	Alixan	Ambrosia			
Andalou					
Acienda	Dinosor				
Les plus sensibles					

Source : ARVALIS-Institut du végétal, essais zone nord, 18 essais en 2006.

() : variétés dont le positionnement est à confirmer.

Sont signalées en gras les quatre variétés faisant partie du tronc commun.

Les indicateurs retenus pour l'évaluation des couples « variété x itinéraire technique »

L'évaluation économique repose sur la marge brute (MB), qui a été calculée, sur les 76 essais retenus, selon la formule $MB = p.R - CO$, avec : p : prix de vente du blé (auquel peuvent être retranchées des réfections liées à la teneur en protéines des grains et/ou au poids spécifique selon le barème de la Fédération française des coopératives agricoles de collecte, d'approvisionnement et de transformation) ; R : rendement (tonne par hectare) ; CO : charges opérationnelles (€ par hectare).

Les charges opérationnelles sont calculées en prenant en compte l'ensemble des intrants apportés sur la culture. L'azote est valorisé à 0,61 € par kilo, les passages de pulvérisateur à 11 € par hectare et d'épandeur à 7,5 € par hectare. Il n'y a pas de comptabilisation de la fumure de fond. Pour obtenir le montant des charges opérationnelles sans compter le coût des passages, il faut déduire environ 80 € par hectare en conduite classique (ITK2) et 50 € par hectare en conduite à coûts réduits (ITK3). On considère que des semences certifiées sont utilisées, car c'est ce qui est fait dans le réseau d'essais. Par rapport à une situation avec un recours aux semences de ferme, ce choix conduit à accentuer de 15 € par hectare en moyenne les écarts de charges entre les deux conduites. Par rapport au taux moyen d'utilisation des semences certifiées en France qui est de 50 % environ, l'écart est accentué de la moitié soit 7 euros/ha environ.

Pour ce qui concerne l'efficacité des intrants, nous avons retenu deux indicateurs : le coût de production relatif aux charges opérationnelles (qui renvoie à un calcul d'efficacité économique des intrants) et le coefficient apparent d'utilisation de l'azote, qui permet d'apprécier l'efficacité de l'utilisation de l'engrais azoté.

On appelle CPop (coût de production partiel relatif aux charges opérationnelles ou coût des intrants par tonne) le rapport entre les charges opérationnelles telles que définies ci-dessus et le tonnage produit. Cet indicateur, qui permet d'approcher la charge en intrants par tonne produite, est l'inverse de l'efficacité économique des intrants : $CPop = CO/R$

Le coefficient apparent d'utilisation de l'Azote (CAU) se définit comme le rapport entre la différence d'azote absorbé par un peuplement de blé fertilisé (Nabs) et les fournitures en azote du sol (approchées par la quantité d'azote absorbée par un peuplement non fertilisé (Nabs0)), cette différence, calculée sur 20 essais, étant rapportée à la quantité d'azote apportée (DN) : $CAU = (Nabs - Nabs0)/DN$

L'évaluation environnementale s'appuie sur un indicateur relatif à l'emploi des produits phytosanitaires et sur deux indicateurs relatifs aux risques de pertes d'azote dans l'environnement.

L'indicateur que nous avons adopté pour caractériser les conduites du point de vue de l'emploi des produits phytosanitaires est l'indicateur de fréquence de traitement (IFT) (Champeaux, 2006). Il est défini comme la somme des IFT par produit de traitement de l'ensemble des traitements phytosanitaires (traitements fongicides, herbicides, insecticides et application de régulateurs) effectués sur la parcelle : $IFT = \text{Somme des « IFT produit »}$ avec $IFT \text{ Produit} = \text{doses appliquées par ha} / \text{doses homologuées par ha}$

Cet indicateur a été calculé sur l'ensemble des essais pour les applications de produits phytosanitaires des deux itinéraires techniques, sachant que les traitements herbicides et insecticides sont identiques entre itinéraires techniques pour un lieu donné. Il ne tient pas compte du traitement des semences. Ce calcul a pu se faire sur 70 essais, ceux pour lesquels nous disposions des variables nécessaires à l'estimation de l'indicateur.

Concernant les risques de pertes d'azote dans l'environnement, nous avons retenu comme indicateur la quantité d'azote de l'engrais non utilisée par la culture (QNEU en kg par hectare), estimée comme suit : $QNEU = (1 - CAU) \times DN$, ou $QNEU = DN - (Nabs - Nabs0)$. Cet indicateur a été calculé sur 20 essais, là où l'on disposait de la mesure de Nabs0 sur les traitements non fertilisés.

Afin d'étendre la mise en œuvre d'une évaluation environnementale à un plus grand nombre d'essais (n=31), nous avons également utilisé le solde du bilan « entrée-sortie » (BES en kg par hectare), calculé selon la formule suivante : $BES = DN - Nabs$. Notons cependant que le CORPEN réserve plutôt cet indicateur pour des évaluations à l'échelle de l'exploitation ce qui n'est pas le cas dans le cadre de notre étude.

Pour ce qui relève de l'évaluation énergétique, nous avons utilisé le calcul des consommations d'énergie, directes (dues aux machines) et indirectes (dues à la production des engrais et des pesticides) (Pervanchon *et al.*, 2002). La consommation d'énergie totale (Et), exprimée en MJ/ha, résulte de la somme de trois postes de consommation :

- le machinisme : Emach est la somme des consommations de tous les outils utilisés sur la parcelle (Bockstaller, 2004). Pour le calcul de Emach, en l'absence de description des itinéraires d'implantation de chaque parcelle, nous avons choisi un itinéraire type faisant appel au labour.
- la production d'engrais azoté (ammonitrate 33,5%) : Efert calculé à partir de la dose d'engrais appliquée sur la parcelle à laquelle on applique un coefficient de 16,15MJ/kg.
- la production des produits phytosanitaires : Ephyto.

Nous avons aussi calculé un ratio énergétique (exprimé en MJ par tonne) en divisant Et par le rendement de chaque couple « variété x ITK » à la récolte, et un bilan énergétique (Eproduite – Et) où l'énergie produite correspond à l'énergie potentielle maximale contenue dans la part exportée des cultures. Il s'agit de l'énergie qui serait restituée lors d'une combustion totale des parties exportées. Elle s'exprime en MJ

par hectare. Le ratio permet d'approcher l'efficacité de l'énergie utilisée. Le bilan permet d'estimer la contribution de chaque hectare à la production de biomasse pour une vocation énergétique.

Évaluation économique des combinaisons « variété x itinéraire technique »

Selon les variétés et les années, pour un blé vendu à 100 € par tonne (qui correspond au prix de vente moyen payé à l'agriculteur entre 2003 et 2006), la marge de l'ITK3, pour la moyenne des essais retenus, est supérieure de 30 à 60 € par hectare à la marge obtenue en conduite de référence (ITK2) (tabl. 4). Ceci s'explique par le fait que les économies de charges opérationnelles (de 100 à 110 € par hectare), compensent la baisse de rendement (de 4 à 8 q par hectare) et de teneur en protéines (prise en compte dans les calculs économiques), qui varie de 0 à 0,3 % (tabl. 4). Les écarts de marge sont atténués (0 à 40 € par hectare au profit de l'ITK3) ou accentués (40 à 70 € par hectare toujours au profit de l'ITK3) respectivement quand le prix du blé atteint 140 € la tonne ou baisse à 80 € la tonne. La conduite la plus intensive devient aussi performante que la conduite à coûts réduits pour un prix de base du blé de 140 à 250 € la tonne selon les variétés et les années. Cette fourchette de prix inclut le prix de vente récent constaté pour le blé, orienté aujourd'hui à la hausse (140 € la tonne en moyenne sur 2007, voire 160 en juillet).

Tableau 4. Comparaison des performances des deux itinéraires techniques pour les variétés Apache, Caphorn et Orvantis. Moyennes annuelles.

Année de récolte	Nombre d'essais	Variété	Itinéraire technique	Charges (€/par hectare)	Rendement (quintal par hectare)	Protéines (%)	Poids spécifique	Marge (p= 100 € par tonne)	Prix du blé (€/par tonne) pour une équivalence de marge entre les deux conduites	CPop (charge en intrants à la tonne (€))
2003	8	Apache	ITK2	309	77,6	12,0	78,1	455	140	40
			ITK3	227	71,3	12,1	77,7	479		32
		Caphorn	ITK2	312	78,9	12,4	77,3	472	170	40
			ITK3	229	73,9	12,3	77,0	505		31
2004	12	Apache	ITK2	391	86,0	11,2	77,0	431	160	45
			ITK3	283	79,6	10,7	76,7	469		36
		Caphorn	ITK2	393	89,3	11,1	77,1	463	150	44
			ITK3	284	80,7	10,9	78,1	489		35
		Orvantis	ITK2	388	90,4	10,7	76,8	466	190	43
			ITK3	283	85	10,4	78,1	518		33
2005	30	Apache	ITK2	352	82,6	11,9	77,4	457	160	43
			ITK3	239	75,8	11,6	77,4	497		32
		Caphorn	ITK2	352	87,2	11,9	76,5	501	140	40
			ITK3	239	79	11,7	76,4	530		30
		Orvantis	ITK2	352	85,3	11,6	76,9	477	140	41
			ITK3	239	77,7	11,3	76,8	511		31
2006	26	Apache	ITK2	334	80,7	12,2	77,5	461	250	41
			ITK3	232	76,6	11,9	77,6	521		30
		Caphorn	ITK2	334	85,3	12,2	76,6	507	190	39
			ITK3	232	79,9	12,0	76,8	556		29
		Orvantis	ITK2	335	85,4	11,8	77	501	220	39
			ITK3	233	80,7	11,8	76,9	558		29

Il existe cependant une variabilité importante des résultats entre essais sur les trois variétés communes (Apache, Caphorn et Orvantis), comme l'indique la figure 2. Toutefois, pour un prix du blé de 100 € la tonne, la stratégie à coût réduit dégage une marge supérieure dans 80 % des cas pour Apache, 76 % pour Caphorn, 78 % pour Orvantis. Ces valeurs sont respectivement de 92 %, 88 % et 89 % pour ces trois variétés avec un prix de base du blé de 80 € la tonne, de 60 %, 58 % et 65 % à 140 € la tonne et de 55 %, 42% et 52 % à 180 € la tonne. Les variétés Caphorn et Orvantis donnent des résultats plus contrastés qu'Apache, qui valorise bien les densités faibles, ce qui renforce l'intérêt d'une connaissance fine des variétés pour identifier leur mode d'emploi.

Des synthèses pluriannuelles par région suggèrent quelques spécificités régionales : les conduites à coût réduit sont très régulièrement en tête dans le grand Bassin parisien entre 2003 et 2006 ; elles procurent des gains de marge moindres dans les régions à potentiel plus réduit du sud du Bassin parisien ou du Poitou, probablement en raison d'un ajustement déjà très étudié des conduites « classiques » et d'un milieu moins généreux en azote où Caphorn, notamment, peut être mis en défaut; elles demandent un ajustement en fongicide à préciser régionalement dans les régions très arrosées de la pointe de la Bretagne. On confirme aussi la nécessité de choisir des variétés agronomiquement adaptées à la région : une variété demi-précoce de type Oratorio, par exemple, n'était pas la mieux adaptée aux sols superficiels du sud du Bassin parisien.

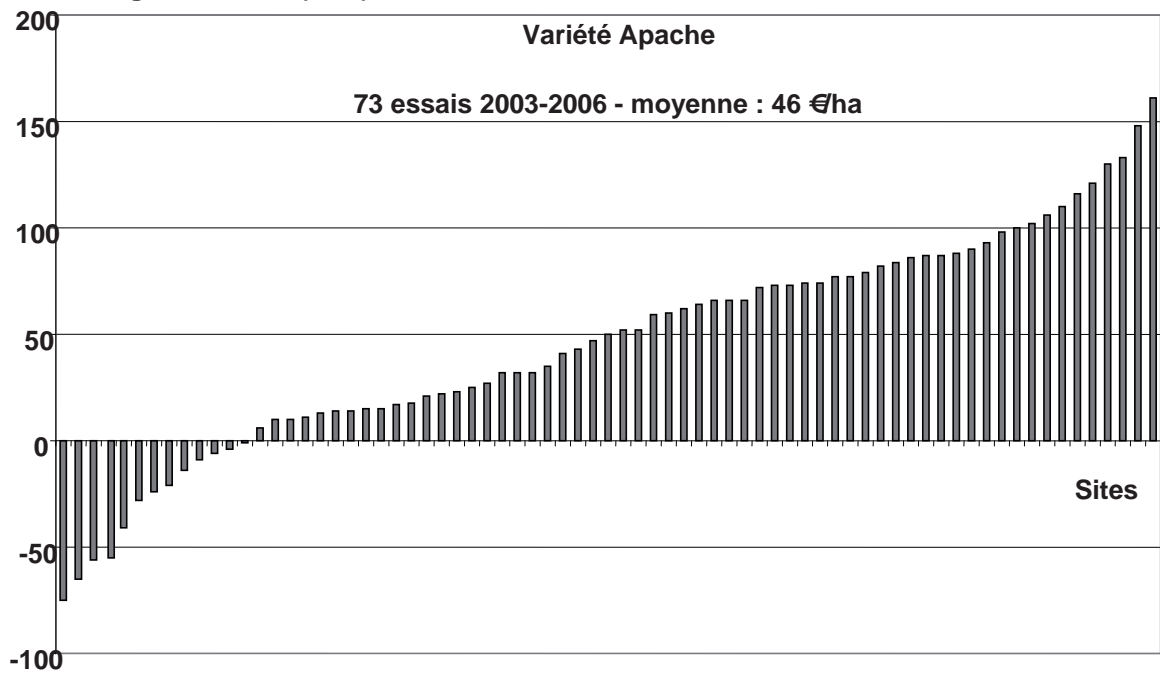
La conduite de référence étant, par construction, (voir tableau 1) adaptée à une variété productive et sensible aux maladies de type Orvantis, il semble particulièrement intéressant d'examiner les écarts de marge entre Orvantis en conduite de référence et Caphorn ou Apache en conduite à coûts réduits. Pour le prix de base de 100 € la tonne, les écarts de marge en faveur du couple Apache-ITK3 par rapport au couple Orvantis-ITK2 sont de 3 € par hectare en 2004, 20 € par hectare en 2005 et 20 € par hectare en 2006. Si l'on choisit comme variété rustique de référence Caphorn, dont la génétique est plus contemporaine de celle d'Orvantis (inscriptions respectivement en 2001 et en 2000), les écarts en faveur du couple Caphorn-ITK3 par rapport à Orvantis-ITK2 sont de 74 € par hectare en 2004, 53 € par hectare en 2005 et 55 € par hectare en 2006. La perte de rendement avec le couple Caphorn-ITK3 par rapport au couple Orvantis-ITK2 est de 10 q par hectare en 2004, 6 q par hectare en 2005 et 5 q par hectare en 2006. Grâce aux caractéristiques de Caphorn, il n'y a pas baisse mais au contraire hausse des teneurs en protéines (respectivement + 0,2 ; + 0,1 et + 0,2 point en 2004, 2005 et 2006).

L'encadré 2 présente une première synthèse des résultats de la récolte 2007, année particulière à la fois du point de vue du niveau élevé du prix de vente et du contexte climatique (occasionnant en particulier des attaques de maladies beaucoup plus fortes que les années précédentes).



La Beauce. Dessin de Claire Brenot.

écart de marge ITK3-ITK2 (€/ha)



écart de marge ITK3-ITK2 (€/ha)

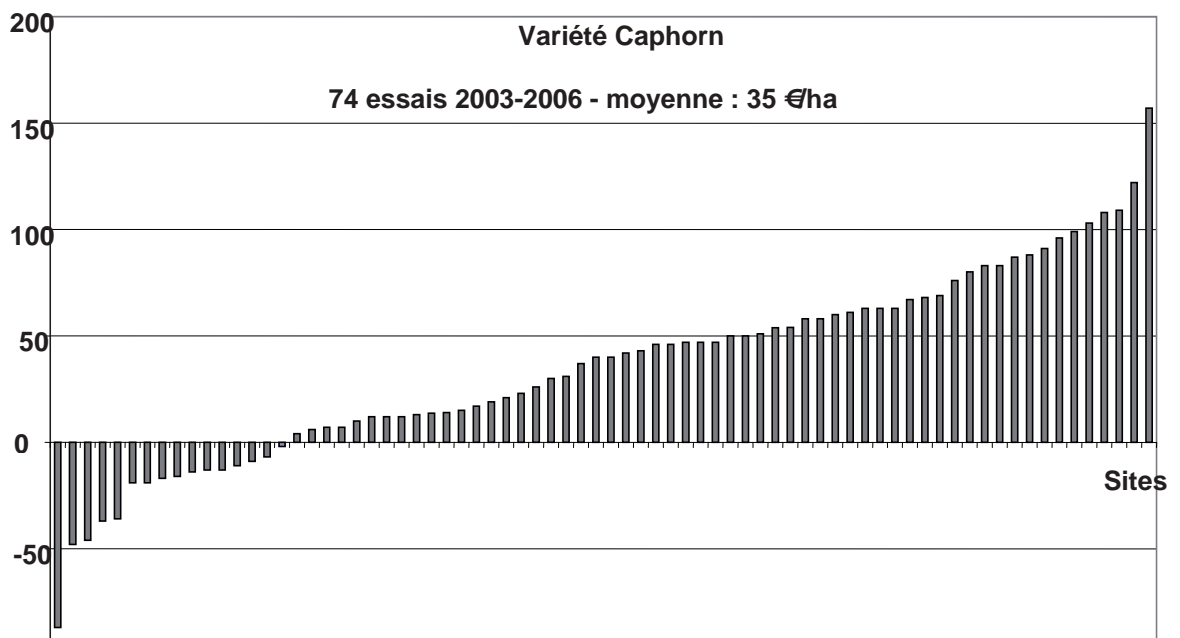


Figure 2. Variabilité des écarts individuels de marge entre la conduite à coûts réduits (ITK3) et la conduite de référence (ITK2) pour un prix du blé de 100 €/la tonne. Chaque essai (combinaison « lieu x année ») est représenté par une barre.

écart de marge ITK3-ITK2 (€/ha)

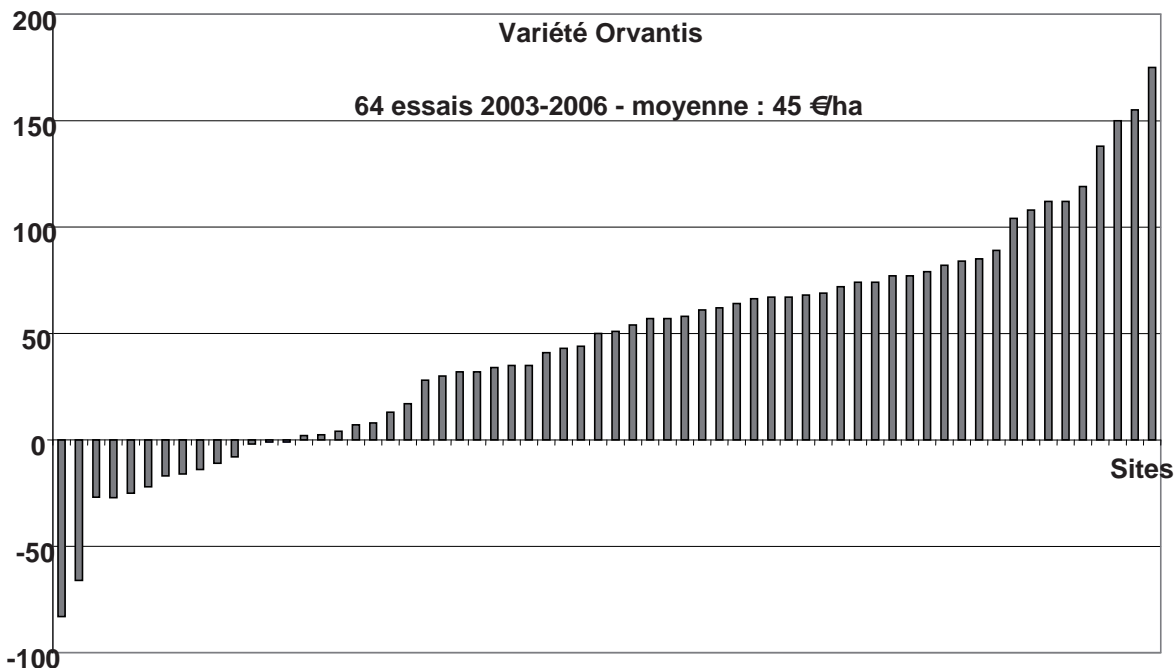


Figure 2 (suite). Variabilité des écarts individuels de marge entre la conduite à coûts réduits (ITK3) et la conduite de référence (ITK2) pour un prix du blé de 100 €/la tonne. Chaque essai (combinaison « lieu x année ») est représenté par une barre.

Encadré 2.

Les premiers résultats de la récolte 2007

Ces résultats 2007 portent sur le dépouillement de 27 essais où sont testées à la fois les variétés Caphorn et Orvantis. Apache, présente dans un trop petit nombre de situations en 2007, n'a pas été retenue pour cette analyse. La localisation des essais est un peu différente de celles des années antérieures : en plus du grand centre ouest de la France, toujours très présent, le réseau s'est étendu dans le sud-ouest d'une part, dans le nord et l'est de la France, d'autre part. Malgré la sécheresse d'avril et la très forte pression de rouille brune, les résultats techniques de l'année 2007 ne remettent pas en cause les résultats moyens des dernières années. Les rendements se situent autour de 78,7 q par hectare pour Caphorn et 77,9 pour Orvantis en ITK2. La moyenne des écarts de rendement entre les conduites (7 quintaux par hectare pour Caphorn, 9 par hectare pour Orvantis) est seulement un peu supérieure à celle des années 2003 à 2006, avec toutefois une dispersion plus grande des résultats. L'année 2007 englobe à la fois des situations avec de faibles écarts de rendement entre conduites – là où les pressions de maladies ont été modestes ou maîtrisées et où les apports d'azote autour du stade épi 1 cm ont pu être efficaces – et des situations où les écarts sont très marqués (jusqu'à 20 quintaux), quand on cumule un fort déficit d'épis et un mauvais remplissage du grain. La qualité des grains reste correcte avec des teneurs en protéines se situant autour de 12 pour les différents couples. C'est le contexte économique qui fait de 2007 une année particulière. Si les prix étaient restés ceux des dernières années (100 €/par tonne), on obtiendrait les meilleures marges avec l'ITK3 (425 €/par hectare avec la variété Caphorn et 404 avec Orvantis). On perdrait 26 €/par hectare en choisissant Caphorn en ITK2 et seulement 14 €/par hectare en choisissant Orvantis ; dans 68 % des cas pour Caphorn et 66 % pour Orvantis il serait resté intéressant de travailler avec la conduite à coûts réduits. Avec du blé à 180 €/la tonne, cette fréquence n'est plus que de 25 % pour Caphorn et 31 % pour Orvantis. On perdrait en moyenne 33 €/par hectare en cultivant Caphorn en ITK3 plutôt qu'en ITK2, et cette perte pourrait atteindre 56 €/par hectare pour la variété Orvantis. En 2007, le prix du blé pour une marge équivalente entre ITK2 et ITK3 est, en moyenne, de 115 €/la tonne pour Orvantis et de 135 €/la tonne pour Caphorn, sensiblement en dessous du prix de marché de l'année.

Évaluation de l'efficacité des intrants

L'indicateur CPop varie de 29 à 45 € par tonne avec peu de variabilité entre années pour un ITK donné. En effet, il se situe entre 29 et 35 € par tonne pour l'ITK3 et 39 et 45 € par tonne pour l'ITK2 (tabl. 4). Le CPop est significativement plus faible pour une conduite à bas niveau d'intrants, témoignant ainsi d'une meilleure efficacité économique des intrants d'environ 10 € par tonne. Cet écart de 10 € par tonne se confirme en 2007 avec une moins bonne efficacité que les années précédentes (encadré 2). Le contexte climatique de l'année n'a pas permis de valoriser de manière optimale les intrants.

Concernant l'efficacité de l'utilisation de la fertilisation azotée, la moyenne du coefficient apparent d'utilisation de l'azote est identique ($p=0,74$) entre les deux conduites de culture (0,67 en ITK3 et 0,65 en ITK2), avec cependant des variations à la hausse ou à la baisse selon les essais (fig. 3). Les écarts de CAU peuvent être expliqués par les différences de dates d'apport de l'engrais azoté. Le plus souvent, le coefficient apparent d'utilisation de l'azote est légèrement supérieur en ITK3, probablement en raison de la suppression de l'apport au tallage, fréquemment le plus mal valorisé. Il existe toutefois un petit nombre de situations où la tendance s'inverse, en faveur de l'ITK2. Ces situations correspondent à des sites et des années pour lesquels les coefficients apparents d'utilisation sont plutôt faibles et au cours desquels l'apport épi 1 cm, le plus conséquent en ITK3, a été particulièrement mal valorisé.

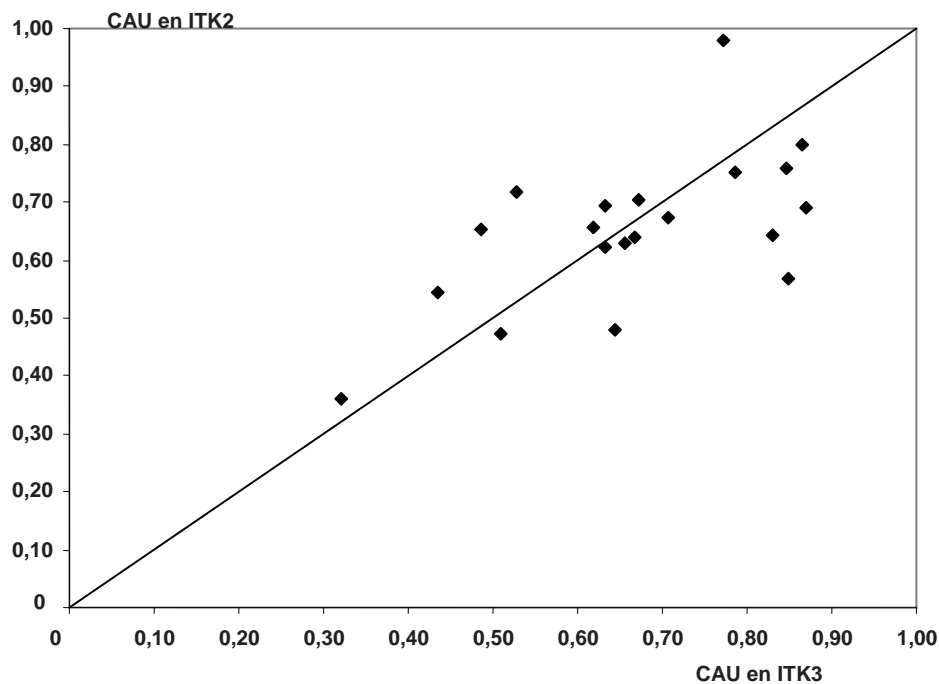


Figure 3. Comparaison des coefficients apparents d'utilisation de l'azote entre les deux conduites.

Évaluation relative à l'emploi des pesticides et à l'impact de la fertilisation azotée

L'indice de fréquence de traitement (IFT) moyen de l'ITK2 sur l'ensemble des essais et tous produits phytosanitaires confondus (fongicide, insecticide, herbicide et régulateur de croissance) s'élève à 3,54 (fig. 4) avec une forte variabilité observée entre essais et entre années (écart type de 1,01). Cette valeur est assez comparable aux IFT calculés à partir des pratiques culturales des agriculteurs, qui atteignent en moyenne 3,26 en 1994 et 4,3 en 2001 avec respectivement des écarts-type de 1,76 et 1,37 (Champeaux, 2006).

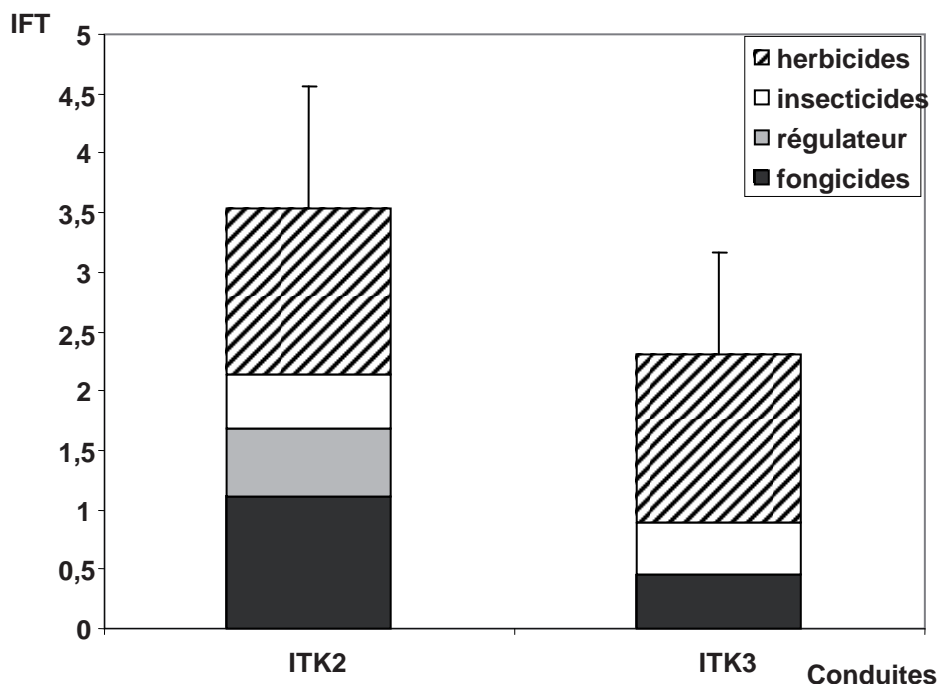


Figure 4. Comparaison des indices de fréquence de traitement (IFT) entre les itinéraires techniques 2 et 3 (ITK2 et ITK3).

La valeur moyenne de l'IFT sur l'ensemble des essais est supérieure de 35 % pour l'ITK2 à celle de l'itinéraire technique plus économe en intrants (ITK3), avec un écart-type de l'IFT pour l'ITK3 un peu plus faible (0,86). Hors herbicides, la valeur de l'IFT passe de 2,13 à 0,9, ce qui correspond à une baisse de 58 % entre l'ITK2 et l'ITK3.

Les stratégies concernant les insecticides et le désherbage étant identiques pour les 2 ITK comme signalé plus haut, intéressons-nous à présent à l'IFT relatif à l'emploi des fongicides (IFTf). L'IFTf passe de 1,11 pour l'itinéraire technique de référence (ITK2) à 0,51 pour la conduite à bas niveau d'intrants (ITK3), soit une baisse de 54%. La figure 5 illustre la variabilité régionale (mise à part la région Franche-Comté, non retenue dans le graphe car représentée par un seul site) de l'IFTf : on observe ainsi que certaines régions, comme la Bretagne, la Normandie ou les Pays de Loire, où la pression de maladies est plus forte, affichent des valeurs d'IFTf supérieures à 1,2 pour l'ITK2. Cependant, ces valeurs restent inférieures à celles des pratiques régionales observées en 2001 (Champeaux, 2006 : valeurs représentées par les barres étroites sur l'histogramme, comprises entre 1,4 et 1,8 selon les régions) ou relevées en 2004 dans l'enquête de l'Office national interprofessionnel des grandes cultures pour les départements concernés par notre réseau (respectivement 1,4 et 1,7 en moyenne pour les départements d'Eure-et-Loir et de Seine-et-Marne à comparer à la moyenne Île-de-France). Cela suggère trois pistes d'explication : soit les pratiques agricoles restent au-delà des préconisations régionales de référence telles qu'appliquées en ITK2 ; soit les années considérées ne sont pas comparables, la pression de maladies, notamment en 2001, ayant été supérieure à celle des années 2004 à 2006 ; soit, influencée par les performances des

IFT fongicides

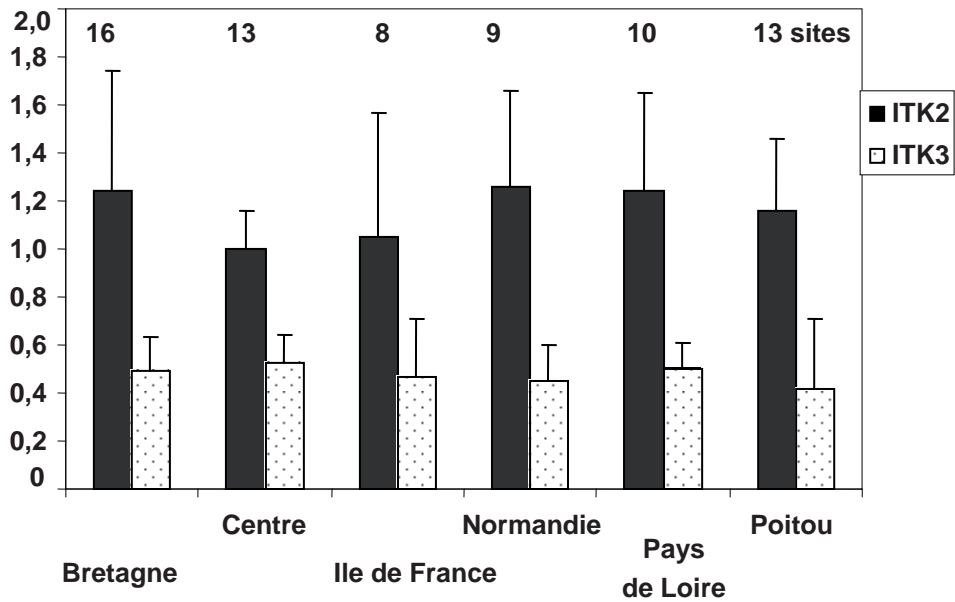


Figure 5. Valeurs d'IFT par région pour les itinéraires techniques 2 et 3.

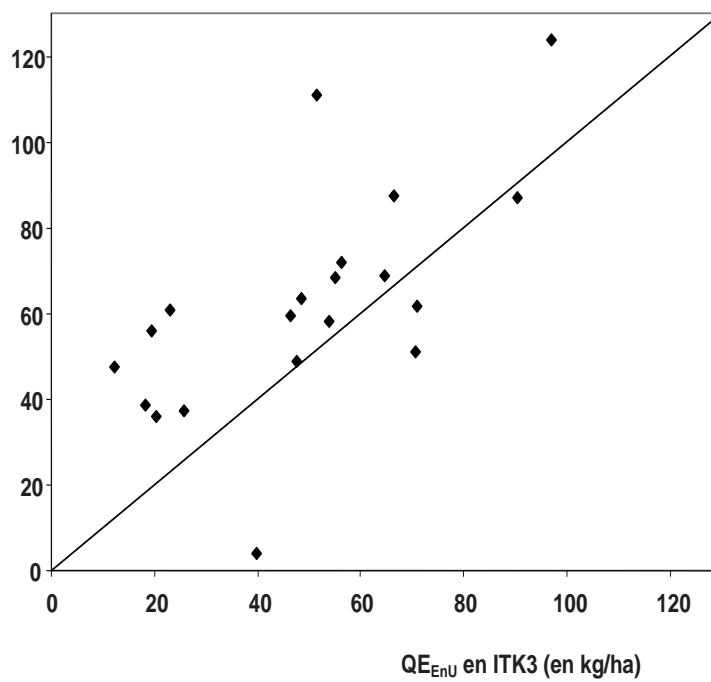
QE_{EnU} en ITK2 (en kg/ha)

Figure 6. Comparaison des quantités d'azote de l'engrais non utilisée (QNEU) entre l'ITK2 et l'ITK3 (20 essais).

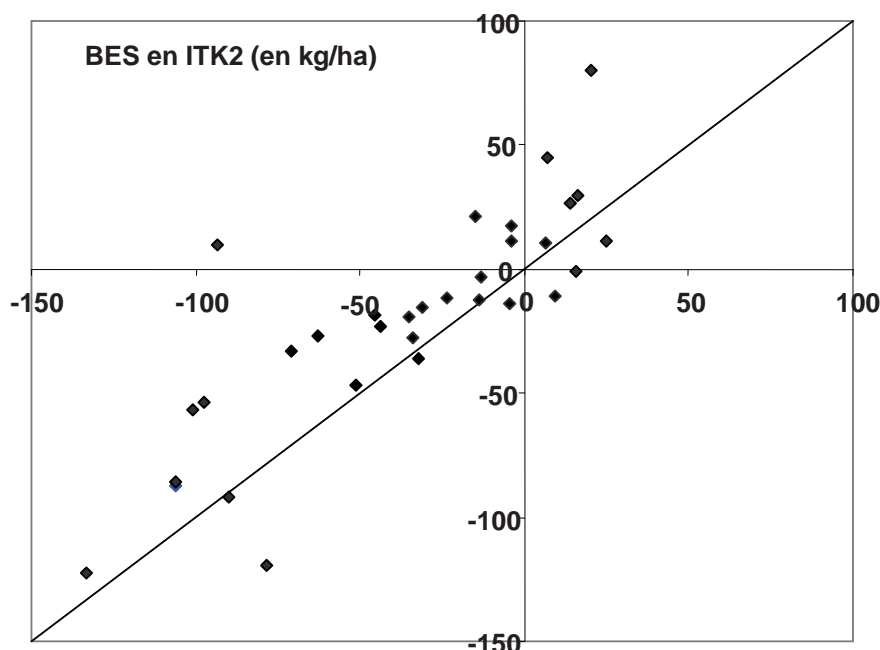


Figure 7. Comparaison des valeurs du bilan entrée - sortie (BES) entre l'ITK2 et l'ITK3 (31 essais).

conduites à coûts réduits, la préconisation de référence des expérimentateurs du réseau a glissé au fil des ans vers une pratique plus économe en fongicides, ce qui met en cause, à terme, le statut de référence de l'ITK2.

Dans le cas de l'ITK3, la variabilité inter-régionale est plus faible : les valeurs sont comprises entre 0,42 pour le Poitou et 0,52 pour le Centre. Ceci est sans doute lié au fait que la règle de décision encadre fortement la gamme des possibilités de traitement fongicides en ITK3.

La quantité d'azote (QN) de l'engrais azoté non utilisée par la culture (QNEU) se déduit du coefficient apparent d'utilisation de l'azote et des doses d'azote apportées par l'engrais. A même coefficient apparent d'utilisation de l'azote (voir plus haut), la quantité d'azote de l'engrais non utilisé par la culture est donc logiquement supérieure pour la conduite la plus utilisatrice d'azote. Elle s'élève à 62 kg par hectare en ITK2 et à 49 kg par hectare en ITK3. Cette tendance est observée sur la plupart des essais, soit 16 sur 20 (fig. 6). On peut faire l'hypothèse que la différence positive entre les deux soldes (62-49 = 13 kg par hectare) se retrouve pour partie organisée dans la biomasse microbienne du sol et pour partie susceptible d'être perdue sous forme gazeuse.

L'analyse établie à partir de l'indicateur bilan entrée – sortie (BES) confirme cette tendance favorable à l'ITK3, observée sur 24 essais sur un total de 31 (fig. 7). Les valeurs de BES sont en moyenne plus faibles de 16 kg par hectare pour l'ITK3 par rapport à l'ITK2. Pour des raisons similaires à celles évoquées plus haut au sujet du CAU, on observe aussi une grande variabilité inter-sites des valeurs de BES.

Évaluation énergétique

La consommation d'énergie, avec les mêmes modalités de désherbage et pour des parcs matériels et des itinéraires d'implantation standard, atteint en moyenne 11 621 MJ par hectare en ITK2 et diminue de 18 % entre l'ITK2 et l'ITK3 (fig. 8).

La répartition des consommations d'énergie entre les postes machinisme, azote et pesticides révèle la part dominante due aux engrais azotés (qui représentent 67% des consommations en ITK2). Cette hié-

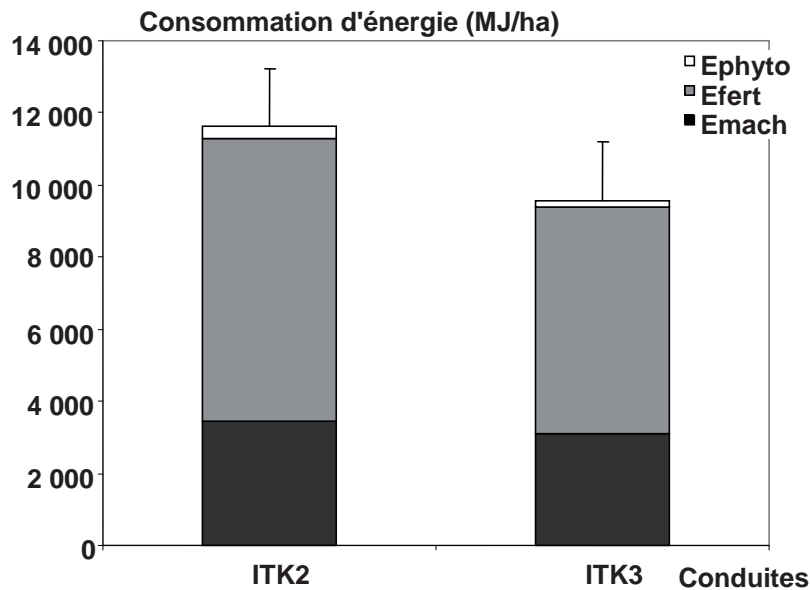


Figure 8. Consommation d'énergie calculée sur les ITK2 et ITK3 (71 essais).

rarchie entre les différents postes de consommations est proche de celle signalée par ITCF (1999) et par Pervanchon *et al.* (2002).

Si l'on s'intéresse à la contribution des surfaces agricoles à la production de biomasse à vocation énergétique, on constate que les écarts de consommation totale d'énergie entre les deux conduites sont plus que compensés par les écarts de rendement et donc d'énergie produite en sortie de parcelle. La production nette d'énergie à l'hectare est supérieure de près de 7000 MJ par hectare en conduite de référence par rapport à la conduite à coûts réduits (fig. 9).

Energie nette produite (MJ/ha)

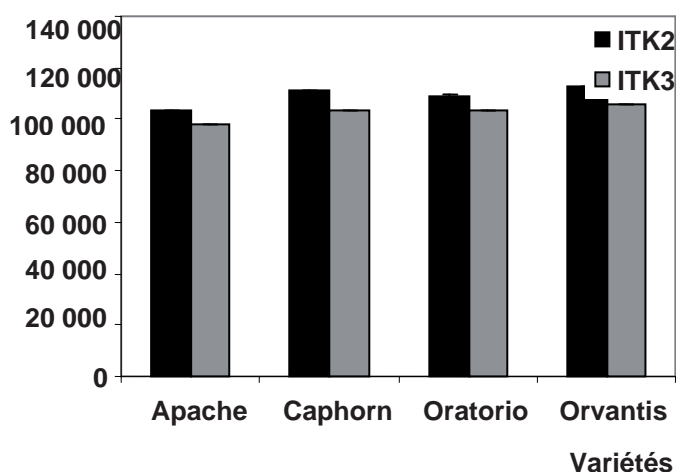


Figure 9. Energie nette produite (énergie produite – énergie totale consommée en MJ par hectare).

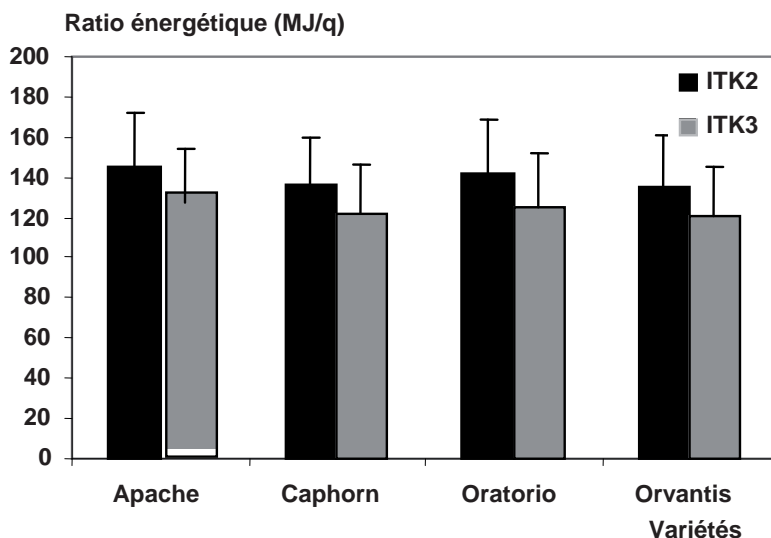


Figure 10. Ratio énergétique (énergie consommée par quintal de blé) par variété pour les ITK2 et ITK3 (en MJ par quintal).

En revanche, la conduite à bas niveau d'intrants (ITK3) réduit le ratio énergétique (énergie consommée/quintal) de 11% par rapport à une conduite de référence (ITK2), ce qui dénote une meilleure efficacité énergétique de l'ITK3. Ce résultat est observé pour les 4 variétés (fig. 10) du réseau expérimental. On retrouve la même hiérarchie entre conduites pour le ratio (énergie produite – énergie totale consommée)/énergie totale consommée qui s'établit à 9,3 MJ.MJ-1 pour l'ITK2 et 10,6 MJ.MJ-1 pour l'ITK3.

Ce que nous apprennent les résultats de ces essais

Variabilité inter sites

Nos résultats ont été acquis sur un grand nombre d'essais offrant une gamme assez large de potentiels de rendement (de 60 à 110 q/ha). De très nombreuses têtes d'assolement sont présentes, à l'exception du blé pour lequel nous n'avons pas de référence.

Dans ce dispositif, nous avons exploré le comportement de variétés que nous pensions contrastées du point de vue de leur niveau de résistance aux maladies et de leurs caractéristiques physiologiques, conduites selon deux itinéraires techniques de niveaux d'intrants différents. Toutefois, les printemps secs des quatre campagnes d'étude (2003-2006), ont été peu favorables au développement des maladies et ont conduit à des teneurs en protéines élevées. De ce fait, la « rusticité » des variétés vis-à-vis de la tolérance aux maladies et du maintien d'un bon niveau de protéines en condition d'azote limitant n'a pu s'exprimer pleinement. Il en résulte des effets des itinéraires techniques peu différents d'une variété à l'autre sur le rendement, la marge ou les risques de pertes azotées dans l'environnement, contrairement à ce qui avait été observé sur le réseau expérimental antérieur (Rolland *et al.*, 2003), qui couvrait une période (2000-2002) où les maladies et la verse étaient beaucoup plus présentes. En particulier, Orvantis, introduite dans le réseau pour servir de témoin d'inadaptation à une baisse d'intrants s'est révélée la plus rustique des variétés testées ! Les résultats de la récolte 2007, année à forte pression de rouille brune, corrigent ce constat dans les régions où cette maladie a été la plus nuisible (sols profonds d'Île-de-France en particulier).

La sensibilité des résultats économiques au prix de vente du blé

Le tableau 3 permet de situer, de 2003 à 2006, le prix du blé pour lequel, pour une variété donnée, on observe une marge équivalente entre les deux conduites. Ce prix varie, selon les variétés et les années,

entre 140 et 250 € la tonne (110 à 135 € la tonne dans les essais 2007). Plus le prix du blé augmente et plus l'intérêt économique des couples variétés rustiques x conduite à coûts réduits par rapport aux couples variétés classiques x conduite de référence se réduit.

Les motivations économiques pour choisir des conduites à intrants réduits, motivations fortes ces dernières années dans un contexte de prix bas, sont donc fortement tempérées par la hausse des cours. Si un intérêt public se manifeste pour ces conduites en raison de leur profil environnemental, il devra considérer leur effet sur les revenus agricoles et sur le chiffre d'affaire des bassins de collecte concernés.

Retour sur l'évaluation environnementale et énergétique

Les résultats indiquent que l'ITK3 présente un « profil » environnemental plus favorable que l'ITK2. Toutefois, les indicateurs retenus quantifient le plus souvent l'emploi des intrants et non leur impact effectif sur l'environnement, qui peut ne pas être totalement fonction des quantités d'intrants apportées mais aussi de leur nature, et qui va dépendre de leur interaction avec le milieu et de la sensibilité de ce milieu aux risques de pollution.

Ainsi, l'IFT fournit une première approche de l'intensité de recours aux pesticides, intégrant dans son calcul la dose d'utilisation. En revanche, le comportement des molécules dans l'environnement et leur écotoxicité ne sont pas considérés. Cette information pourrait être fournie par le calcul d'un indicateur comme I-Phy (Bockstaller, 2004), via l'utilisation des informations sur les profils écotoxicologiques issues de l'index phytosanitaire ACTA, ou enfin grâce à une approche plus complexe de la mobilité des pesticides selon les types de sols et les voies de circulation de l'eau dans le sol (CORPEN, 2001 ; Réal *et al.*, 2004). Cependant, l'IFT est aujourd'hui utilisé dans le cadre de mesures agri-environnementales (MAE) et l'évaluation des conduites sur ce critère mérite d'être conduite car elle renseigne sur leur capacité à accéder à ce type de mesure (encadré 3).

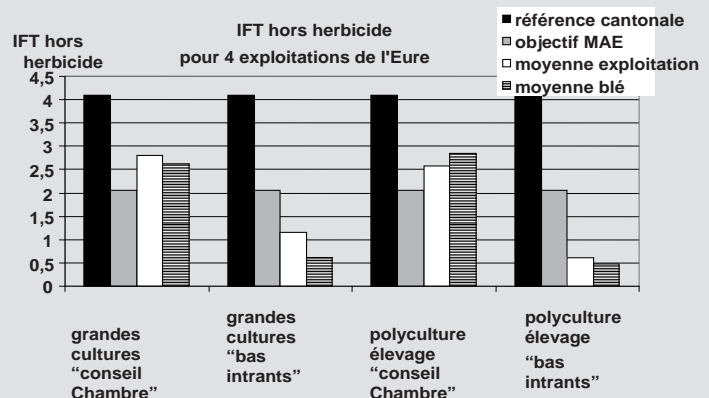
Encadré 3. Les mesures agri-environnementales (MAE). Le cas de l'Eure

Dans le nouveau plan de développement rural hexagonal (PDRH), les MAE concernent directement l'utilisation des produits phytosanitaires et sont proposées dans des territoires identifiés comme prioritaires pour la ressource en eau. Ces mesures sont construites sur une utilisation réduite en référence à une pratique régionale (enquête SCESS de 2001) et à un assolement cantonal. Deux niveaux sont proposés : réduction des IFT des herbicides de 40% (mesure 04) et des IFT phytosanitaires hors herbicides de 50% (mesure 05). Des tests d'accès à ces MAE ont été menés en 2006 dans quatre exploitations de l'Eure : deux d'entre elles appliquent les conseils habituels de la chambre d'agriculture ; les deux autres conduisent la totalité de la sole de blé en itinéraire « intégré-blé rustique » et ont adopté des itinéraires à bas niveaux d'intrants pour les autres cultures.

On observe que :

- les exploitations dont la pratique est calée sur le conseil habituel de la chambre d'agriculture ont un IFT sensiblement inférieur à la référence territoriale mais encore supérieur à la cible de la MAE ;
- les exploitations « bas intrants » sont très en deçà des références cantonales et atteignent l'IFT objectif de -50% ;
- ce résultat est acquis notamment grâce à une forte réduction de l'IFT sur blé, culture présentant 40 à 50 % des parcelles dans les assolements.

Ce travail a aussi permis de constater que la part des herbicides est prédominante dans l'ITK3. La réduction de l'IFT herbicide passe par la mise au point de systèmes de culture à l'échelle de la succession de cultures.



De même, les conséquences d'une utilisation incomplète de l'azote apporté par l'engrais azoté doivent elles aussi être considérées dans le cadre d'une succession de culture. L'utilisation du sol dans l'interculture (comme par exemple la mise en bande de cultures intermédiaires pièges à nitrate) qui suit le blé peut amener à réduire les risques liés à une utilisation médiocre de l'engrais apporté.

Plus économe en énergie et plus efficiente dans l'utilisation de l'énergie consommée, la conduite à coûts réduits est toutefois moins productrice nette de biomasse à vocation énergétique que la conduite de référence. La question du choix de l'indicateur à privilégier renvoie à la question de la hiérarchie supposée des contraintes : rareté des ressources d'énergie fossiles dont on maximisera l'efficacité ? Ou rareté des terres susceptibles de fournir une énergie agricole alternative ? Ces calculs sont susceptibles d'évoluer, les référentiels de calculs étant en cours de réévaluation (Collectif, 2007, à paraître)

Les enseignements tirés du réseau expérimental

À propos de la définition de la variété rustique

On pourrait donc légitimement s'interroger sur l'existence d'interactions entre variétés et conduites et sur la pertinence à tester plusieurs variétés à chaque niveau de conduite. Parce que le réseau antérieur cité ci-dessus mettait en évidence ces interactions entre variétés et conduites et parce que ces interactions sont confirmées dans les essais où sont testées un plus grand nombre de variétés (information du réseau non publiée), nous ne retenons pas cette hypothèse. En revanche, il nous semble important de nous arrêter sur le cas particulier d'Orvantis. Sensible à très sensible aux maladies, sensible à la verse, à faible teneur en protéines, cette variété ne semblait présenter aucun atout pour valoriser les conduites à coûts réduits. C'est sa capacité à ajuster l'élaboration de son rendement à des situations de stress et notamment à compenser les carences précoces en azote et un fort déficit d'épis qui fait d'elle une variété rustique acceptable dans les régions à pression de maladies modérées (sud Bassin parisien en particulier). Cette observation nous conduit à reformuler notre définition d'une variété rustique (encadré 4). La « rusticité » d'une variété est quelque chose de plus complexe que la seule tolérance aux maladies : elle intègre notamment les capacités de compensation d'un faible nombre de tiges dû à la baisse de densité et à l'impasse sur le premier apport d'azote. Dans l'état actuel de nos connaissances, ces potentialités variétales ne peuvent guère être repérées autrement qu'en mettant les variétés à l'épreuve de conduites à coûts réduits.

Encadré 4.

« Variétés rustiques » : de la difficulté de sélectionner et faire durer des variétés « complètes »

Nous définissons une variété comme « rustique » sur son efficacité à atteindre un haut niveau de performance pour 3 critères : résistance aux maladies du feuillage et à la verse, capacité à maintenir un rendement élevé en situation de stress et stabilité du rendement, et de la teneur en protéines. D'autres caractéristiques de « rusticité » pourront être prises en compte en fonction des facteurs agro-climatiques de la région et de l'amélioration de la connaissance variétale : valorisation de fertilisations azotées sub-optimales, tolérance à des stress hydriques, tolérance au piétin verse, adaptation à une large gamme de contextes pédoclimatiques. Une variété « rustique » ne doit pas connaître de défaut marqué sur les autres caractères d'importance économique pour être efficace. Il serait nécessaire de qualifier plus précisément le niveau de « rusticité » : il n'est pas requis la même exigence de résistance aux maladies dans les régions à influence maritime que dans le centre de la France ou pour une conduite à un traitement fongicide unique par rapport à une conduite faisant appel à une impasse complète de fongicide. Les variétés rustiques ne sont pas des variétés anciennes. Elles intègrent au contraire les derniers progrès de la sélection vis-à-vis de la tolérance aux maladies et aux stress azotés. Les cas de contournement de la résistance à la rouille jaune (2001 puis 2007) de certaines variétés, répondant très bien au concept de rusticité présenté plus haut, illustrent la difficulté de conserver la stabilité de LA variété complète. En règle générale, le niveau de résistance des variétés largement cultivées diminue dans le temps. Le renouvellement variétal est donc le support indispensable à la diffusion de conduites de culture valorisant la rusticité des variétés.

À propos de la définition des conduites de culture

Le protocole choisi met en comparaison deux conduites de culture décrites par les règles de décision précisées dans l'encadré 1. Ces règles de décision permettent une adaptation des conduites à l'année, à la région et à la parcelle. En revanche, elles n'ouvrent pas la possibilité d'une adaptation à la variété de chacune des conduites. Ainsi, si la conduite de référence est réputée adaptée à la variété Orvantis qui sert de guide pour la protection fongicide, elle ne peut être considérée comme traduisant « l'état de l'art » pour une variété comme Caphorn dont la sensibilité aux maladies est moindre. Ainsi, plutôt qu'une comparaison conduite à conduite pour une variété considérée, on préférera comparer des couples (variété sensible x conduite de référence) avec des couples (variétés rustiques x conduite à coût réduit). C'est pour aller en ce sens qu'une lecture du tableau 4 comparant les marges entre Orvantis-ITK2 et Apache ou Caphorn-ITK3 a été proposée.

On peut poser l'hypothèse qu'il puisse, pour chaque variété, exister une conduite optimale autre que les deux conduites testées. Des conduites adaptées individuellement à chaque variété ont été testées par Arvalis en 2004 dans une conduite supplémentaire (appelée ITK5). La lourdeur du dispositif expérimental et le poids des moyens humains à mobiliser pour la mise en œuvre de ces conduites ont toutefois conduit à ne pas renouveler ce test (Arvalis, non publié).

Les outils d'aide à la décision utilisés dans l'écriture des règles de décision pour la conduite de référence sont nombreux : pour la fertilisation azotée, calcul de dose d'azote par la méthode du bilan azoté et, le cas échéant, pour les milieux dans lesquels cet outil est pertinent et largement diffusé, pilotage des premiers apports en utilisant l'indicateur « bande double densité » ; pour le pilotage des fongicides, grilles de décision piétin-verse ou fusariose ou outils comparables, déclenchement des interventions sur maladies du feuillage selon les avertissements de la Protection des végétaux. En revanche, le pilotage de la dose du dernier apport d'azote n'a pas été retenu. L'utilisation de cet outil reposerait la question du choix de la variété pilote pour la conduite de référence et de la pertinence de l'élargissement, à d'autres variétés, des décisions proposées.

La plupart des outils d'aide à la décision mentionnés ci-dessus sont aussi utilisés pour les conduites à coûts réduits : la dose d'azote se déduit de celle calculée par la méthode du bilan ; un travail particulier d'adaptation de la règle de décision sur la fertilisation pour intégrer les informations issues de l'indicateur « bande double densité » a été conduit en cours d'étude par les membres du réseau ; les avertissements de la Protection des végétaux servent de repère, sinon de déclenchement, pour le traitement fongicide. Toutefois, il a été formulé par les expérimentateurs le souhait d'avoir accès à des outils de pilotage adaptés à des peuplements moins denses et sous-fertilisés en début de cycle et à des variétés rustiques. Ainsi, une adaptation de l'outil Présept à des variétés rustiques et des peuplements moins denses et moins riches en azote est-elle envisageable ; de même, la validation des seuils des outils d'aide à l'ajustement des derniers apports d'azote pour des peuplements dont le statut azoté en début de cycle est infra-optimal pourrait être mise à l'ordre du jour et permettrait d'améliorer la performance des conduites à coûts réduits.

À propos de la conduite de référence (ITK2)

Une remarque s'impose quant à l'évaluation agronomique et aux performances économiques de l'ITK2 dans le contexte des années 2003-2006.

Il n'est pas mené systématiquement de diagnostic de nutrition azotée sur tous les essais du réseau. Ainsi, il n'est pas possible de vérifier dans tous les cas si la conduite de référence a systématiquement permis d'atteindre un parcours de nutrition azoté non limitant ou si, le cas échéant, la dose d'azote apportée a priori a été excessive. A la réserve près apportée sur l'utilisation d'outils de pilotage de la dose du dernier apport d'azote (voir ci-dessus), cette réalité rejoint celle de la pratique agricole dans laquelle on définit des optima de conduite a priori, optima qui peuvent être contredits, soit par le climat, soit par une imparfaite appréhension du réel par les modèles disponibles.

Par contre, les observations, fréquentes mais non systématiques, sur les maladies et la verse permettent le plus souvent de vérifier que le pilotage de la protection contre les maladies et la verse a permis, de

2003 à 2006, d'atteindre les objectifs assignés à l'ITK2 à savoir une bonne protection des variétés sensibles. En 2007 en revanche, la verse, la rouille ou la fusariose ont pu affecter l'ITK2.

Les performances économiques des conduites à coûts réduits, dans le contexte des années 2003 à 2006 mettent en question la « conduite de référence », réputée raisonnée et optimisée pour atteindre la meilleure performance technico-économique. Elles obligent à interroger les conditions dans lesquelles a été bâtie cette référence.

Plusieurs constats peuvent être faits :

- ces travaux ont été initiés dans un contexte de rapport entre le prix des intrants et le prix du blé qui conduisait à rechercher sinon le rendement maximum, au moins un rendement proche de ce maximum, stratégie économiquement pertinente à l'échelle de l'exploitation. L'optimum de chaque facteur de production a donc été établi pour atteindre ces objectifs ;
- cet optimum était historiquement d'autant plus haut que la maîtrise des techniques était médiocre : par exemple, la qualité des semis, particulièrement en essais, dans les années 70 ou 80 pouvait être de moindre qualité que celle d'aujourd'hui, conduisant à des préconisations largement sécuritaires ;
- l'essentiel des travaux d'actualisation qui ont suivi sur les facteurs de production ont été des travaux analytiques, avec pour objectif la recherche d'une valeur optimale pour le facteur concerné, « toutes choses égales par ailleurs », c'est-à-dire sans remise en cause des autres termes de la conduite de culture. Par exemple, on a défini les risques de verse et ajusté les programmes fongicides pour des peuplements denses et riches en azote. Cette posture a assez largement contribué à figer le conseil. Ce propos peut être étendu aux seuils et critères définis pour les outils d'aide à la décision mis en œuvre dans la conduite de référence ;
- il n'est pas impossible que les opportunités ouvertes par les modes d'élaboration du rendement des nouvelles variétés de blé n'aient pas été totalement exploitées pour redéfinir des optima, tant en matière de densité de semis que de fractionnement de l'azote ;
- enfin, de la même façon que la valorisation de la qualité des céréales n'a été introduite dans les calculs technico-économiques que dans la deuxième moitié des années 90, la prise en compte du coût des passages dans l'évaluation économique des itinéraires techniques est relativement récente et reste encore à généraliser.

Ainsi, on doit constater, au moins dans certaines régions, que la conduite de référence, même quand elle fait appel à des outils d'aide à la décision pour son ajustement, n'était pas la conduite optimale dans le contexte de prix des années 2003 à 2006.

Diffusion des résultats auprès des agriculteurs dans une perspective de changement des pratiques culturelles du blé

Ici, comme dans d'autres domaines, se pose la question de l'acceptabilité de l'innovation. Une innovation se développe en agriculture si : (1) elle permet aux agriculteurs sinon d'améliorer, tout au moins de maintenir leur revenu et de diminuer les risques ; (2) elle leur permet de se simplifier la vie (moins de travail, moins de décisions complexes) ; (3) elle est ressentie comme gratifiante : les agriculteurs sont fiers de leurs champs et de leurs récoltes ; (4) elle est portée par l'ensemble des acteurs de la filière, prioritairement les organisations économiques dont le poids est décisif en termes de conseil. (R. Blondel, comm. pers.)

Au vu des résultats ici présentés, il apparaît que le point 1 était acquis pour la conduite de variétés rustiques à intrants réduits dans le contexte de prix des dix dernières années. Pour l'avenir, la question de savoir si le prix du blé est conjoncturellement ou durablement en hausse peut sensiblement infléchir la motivation des agriculteurs. Concernant le point 2, les conduites à bas niveaux d'intrants réduisent sensiblement (de deux à quatre) le nombre de passages sur parcelle et simplifient, de ce fait, l'organisation du travail. Sur le point 3, la notion de « fierté » peut se transférer de l'état visuel de la parcelle vers le sentiment de contribuer au respect de l'environnement. Pour le point 4, on constate que l'effort de

vulgarisation n'a démarré que tardivement (Oratorio a été inscrit en 1996) et que, même dans le contexte de prix des dernières années, les réticences de nombreux prescripteurs étaient marquées, pour des raisons très diverses (Aubertot *et al.*, 2005). On peut toutefois constater que les variétés les plus cultivées en France sont des variétés ayant un certain niveau de résistance aux maladies et une bonne teneur en protéines, répondant aux besoins des utilisateurs finaux, ce qui montre que les choix de variétés intègrent des préoccupations multiples (productivité et stabilité de la productivité, tolérance aux maladies, à la verse, précocité, critères de qualité, *etc.*).

En complément du réseau d'essais présenté ici, nous disposons de la synthèse d'une enquête menée en Charente Maritime auprès de 22 agriculteurs ayant testé les conduites à bas niveau d'intrants en 2003 et 2004 sur l'une de leurs parcelles (encadré 5). Cette enquête a permis de préciser les atouts et les limites de ces conduites tels que perçus par les agriculteurs les ayant mis en œuvre.

Encadré 5. Quelle acceptabilité des conduites à intrants réduits par les agriculteurs ?

22 agriculteurs ont testé pour les récoltes 2003 et 2004 les conduites à bas niveau d'intrants sur le blé tendre dans l'une de leurs parcelles, en comparaison avec une conduite classique dans la même parcelle. Une enquête qualitative a été menée avant la récolte des céréales en 2004 pour mesurer les freins et les motivations de ces agriculteurs vis-à-vis des conduites à bas niveau d'intrants. Ces agriculteurs font partie de groupes animés par la chambre d'agriculture de Charente-Maritime. La principale motivation des agriculteurs dans l'adoption des conduites à bas niveau d'intrants est l'amélioration du revenu (réponse citée à 16 reprises), puis vient la protection de l'environnement (13 réponses) et enfin l'appartenance à un groupe de travail et la réduction du temps de travail pour les loisirs ou la vie de famille. Avant la campagne 2004, la principale crainte des agriculteurs vis-à-vis d'une conduite à bas niveau d'intrants concernait une perte de revenu. Ils n'arrivaient pas à mesurer *ex nihilo* l'impact d'une réduction de 70 €/ha des charges opérationnelles sur le rendement du blé. Mais suite aux campagnes 2002/2003 et 2003/2004 qui se sont avérées favorables techniquement et économiquement aux conduites à bas niveau d'intrants sur 74% des parcelles de test (faibles réductions de rendement (4 q/ha), prix du blé peu élevé : 10 €/q à l'époque), ces craintes étaient atténuées chez la moitié des agriculteurs en 2004. En 2003, 17 agriculteurs sur 22 doutaient que les conduites à bas niveau d'intrants puissent être aussi rentables que les conduites classiques alors qu'en 2004, ils ne sont plus que 8 sur 22 à être sceptiques. Toutefois, beaucoup d'entre eux attendaient en 2004 plus de recul et de références sur ces conduites qu'ils jugeaient encore à risque (7 réponses). De plus en plus d'agriculteurs n'éprouvent aucune crainte sur les réductions d'intrants, car ils font confiance à la logique globale de l'itinéraire technique (7 réponses). Tous les agriculteurs sont satisfaits de mener l'étude de comparaison d'itinéraire technique sur une de leur parcelle de blé. Ils ont le sentiment que ces essais leur apportent des références concrètes qui leur permettront de se décider à passer ou non aux conduites à niveau réduit d'intrants sur l'ensemble de leur sole de blé d'ici quelques années. De plus, les conduites en protection intégrée redonnent à certains de l'intérêt pour le métier d'agriculteur. Enfin, la conduite à bas niveau d'intrants peut être envisagée dans leur exploitation à condition que la PAC encourage financièrement ce type d'agriculture (7 réponses) et que son intérêt économique soit démontré sur plusieurs années. Source : synthèse d'une enquête menée auprès de 22 agriculteurs ayant testé les conduites à bas niveau d'intrants en 2003 et 2004 en Charente Maritime (Bouty, 2004).

Comme en Picardie (Faloya *et al.*, 2002), une dynamique de groupe s'est créée autour des conduites à intrants réduits, dynamique qui rassure chaque agriculteur vis-à-vis du risque pris lors d'une impasse de traitement, et l'encourage à avancer de manière cohérente dans les réductions d'intrants.

Une étude belge identifie, pour la culture du blé tendre, 12 obstacles techniques et socio-économiques à la diffusion du couple « variété multirésistante aux maladies x itinéraire à intrants réduits » à chaque niveau de la filière céréales à paille (Vanloqueren et Baret, 2007). Nous retrouvons plusieurs des freins mentionnés ci-dessus : prestige du rendement maximum, chiffre d'affaires de la distribution élevé sur les produits phytosanitaires, existence de sources de conseil technique liées à la vente d'intrants, moyens de la recherche concentrés sur un système dominant, politique agricole peu favorable à la production intégrée. Des similitudes existent aussi en France avec la protection intégrée des cultures fruitières dont le développement rencontre beaucoup d'obstacles (Bellon *et al.*, 2006).

Conclusion : perspectives de travail

Initiée dans une période où la baisse de la production céréalière faisait explicitement partie des objectifs des politiques publiques (baisse du prix des céréales, retrait des terres, arrêt du retournement des prairies, *etc.*), cette étude aboutit au moment où le contexte mondial est fortement modifié, avec des tensions fortes sur les marchés des produits liées à l'augmentation conjointe de la demande alimentaire et de l'émergence du débouché énergétique. Dans cette perspective, la baisse de rendement, même modeste, procurée par la mise en place de conduites à coûts réduits avec les variétés rustiques actuellement disponibles peut poser question. La recherche de variétés toujours plus efficaces, donc productives quoique plus rustiques, est d'actualité.

Les perspectives d'évolution des systèmes de production en grandes cultures plaident en effet pour l'émergence d'une agriculture productive à la valeur ajoutée biologique maximale, d'une révolution agronomique « doublement verte » (Griffon, 2006) à forte efficacité des intrants, dans laquelle l'agronomie, la génétique, l'économie et la sociologie devront prendre leur place dans une démarche « d'agronomie intégrale » (Chevassus-au-Louis, 2006).

À partir des acquis du programme blés rustiques « bas intrants », ce nouveau défi fera appel à une approche globale de la rusticité (encadré 4) pour la création de géotypes multirésistants aux maladies, valorisant des ressources contingentées en azote (pour le rendement et la qualité technologique), tolérants aux stress climatiques, concurrentiels vis-à-vis des adventices et de meilleure valeur nutritionnelle (Rolland *et al.*, 2006).

Du point de vue du développement, les travaux sur l'itinéraire technique blé intrants réduits-intégrés s'inscrivent dans une reprise actuelle de l'approche système de culture, dans le cadre d'un actif partenariat recherche-développement. Le réseau s'agrandit en s'ouvrant à de nouvelles questions comme celles des interactions azote x maladies, biomasse x stress hydrique, associations de variétés, compétitivité vis-à-vis des adventices. Il s'est organisé pour repérer les variétés rustiques parmi l'offre variétale disponible en France.

Plusieurs pistes sont identifiées côté recherche avec une approche qui vise à la création d'idéotypes variétaux originaux (« rustiques complets »), l'étude des interactions géotype x environnement et l'adaptation des systèmes de cultures, ou l'analyse des effets économiques et des déterminants politiques de l'utilisation d'itinéraires techniques à niveaux réduits d'intrants associés à des variétés rustiques de blé tendre.

Enfin, les travaux sur le blé tendre montrent la voie sur d'autres espèces de céréales à paille (des essais sont en cours sur l'orge d'hiver) ou sur colza. Ils contribuent aussi à ouvrir la réflexion méthodologique sur l'approche du continuum entre agriculture raisonnée, production intégrée et agriculture biologique ■

Remerciements

Les auteurs remercient les très nombreux contributeurs de ce projet, et tout particulièrement les expérimentateurs des chambres d'agriculture. Pour la Bretagne (22, 29, 35, 56) : J.-P. Arzul, R. Blondel, P. Cotinet, L. Leroux, J. de Rouvre, J.-P. Turlin. Pour les Pays de Loire (44, 49, 53, 85) : D. du Clary, S. Hanquez, I. Pambou, B. Piveteau, T. Restif, P. Rigaud, G. Turpeau. Pour la région Poitou-Charentes (16, 17, 79, 86) : P. Boucheny, F. Dupont, M. Laurent, N. Métayer, F. Patrier, A. Triniol, J. Tutard, J. Vincent. En Normandie (14, 27, 76) : N. Leven, M. Gérard. En Île-de-France (77, 78, 92) : E. Bizot, D. Bousseau, D. Eymard, S. Piaud, A. Thiroux. En région Centre (37, 45) : B. Chevalier, L. Lejars, L. Simon. En Champagne (10) : D. Justeau, J.-C. Guichaoua. En Bourgogne (58) : J. Brunet.

Nous remercions également les expérimentateurs des stations Arvalis M. Bonnefoy et B. Delsuc, ainsi que ceux de l'INRA : M. Al Rifaï, J.-Y. Morlais et P. Walczak.

Enfin, nous remercions chaleureusement R. Blondel, L. Saur, N. Verjux, F. Laurent et J. Massé pour la relecture de cet article.

Références bibliographiques

- AUBERTOT J.N., CARPENTIER A., GRIL J.J., GUICHARD L., LUCAS P., SAVARY S., SAVINI I., VOLTZ M., 2005. *Pesticides, agriculture et environnement : réduire l'utilisation des pesticides et limiter leur impacts environnementaux, Rapport d'Expertise scientifique collective INRA-Cemagref*. INRA, 64 p.
- BELLON S., DE SAINTE MARIE C., LAURI P.E., NAVARETTE M., NESME T., PLÉNÉT D., PLUVINAGE J., HABIB R., 2006. La production fruitière intégrée en France : le vert est-il dans le fruit ? *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 53, 5-18.
- BERRY P.M., GRIFFIN J.M., SYLVESTER-BRADLEY R., SCOTT R.K., SPINK J.H., BAKER, C.J., CLARE, R. W., 2000. Controlling plant form through husbandry to minimise lodging in wheat. *Field Crops Research*, 67, 59-81.
- BOCKSTALLER C., 2004. *Manuel de l'utilisation du logiciel Indigo : grandes cultures-prairies*. Version 1.6 du logiciel.
- BOUTY L., 2004. *Conduites intégrées du blé en Charente-Maritime : test et évaluation pour une appropriation par des agriculteurs*. Rapport pour l'obtention du diplôme d'Ingénieur des techniques agricoles, 33 p.
- CHAMPEAUX C., 2006. *Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures- Evolution de traitements à travers des enquêtes « Pratiques culturales » du SCEES entre 1994 et 2001*. INRA-Ministère de l'agriculture et de la pêche, 101 p.
- CHEVASSUS-AU-LOUIS B., 2006. *Refonder la recherche agronomique : leçons du passé, enjeux du siècle*. Leçon inaugurale du groupe ESA Angers, 27 septembre 2006.
- COLBACH N., SAUR L., 1998. Influence of crop management on eyespot development and infection cycles of winter wheat. *European Journal of Plant Pathology*, 104, 37-48.
- COLLECTIF, 2007. *Référentiel pour l'évaluation des émissions de gaz à effet de serre*. Programme de recherche inter-instituts CASDAR Gaz à effet de serre et stockage du carbone en exploitations agricoles (à paraître).
- CORPEN, 2001. *Diagnostic de la pollution des eaux par les produits phytosanitaires - Bases pour l'établissement des cahiers des charges des diagnostics de bassins versants et d'exploitation*. Ministère de l'agriculture et de la pêche et Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, Paris, 32 p.
- DANIAL D. L., PARLEVLIET J. E., 1995. Effects of nitrogen fertilization on disease severity and infection type of yellow rust on wheat genotypes varying in quantitative resistance. *Journal of phytopathology*, 143, 679-681.
- FALOYA V., DUMOULIN F., HOT J.P., MENU P., BOIZARD H., MEYNARD J.M., 2002. Protection intégrée du blé tendre d'hiver, itinéraire technique en Picardie. *Perspectives Agricoles*, 283, 64-70.
- FÉLIX I., LOYCE C., BOUCHARD C., MEYNARD J. M., BERNICOT M. H., ROLLAND B., HASLÉ H., 2002. Associer des variétés rustiques à des niveaux d'intrants réduits: intérêts économiques et perspectives agronomiques. *Perspectives Agricoles*, 279, 30-35.
- GRIFFON M., 2006. *Nourrir la planète*. Odile Jacob, Paris, 456 p.
- HUET P., 1986. Influence du système de culture sur le piétin verse du blé. In : *Les rotations céréalières intensives : 10 années d'études concertées INRA-ONIC-ITCF 1973-1983*. INRA, Paris, 95-111.
- ITCF, 1999. *Optimisation du bilan énergétique de différents systèmes de cultures adaptés à des objectifs différenciés*. Synthèse finale 1995-1996-1997, octobre 1999.
- LEITCH M. H., JENKINS P. D., 1995. Influence of nitrogen on the development of Septoria epidemics in winter wheat. *Journal of Agricultural Science*, 124, 361-368.
- LIMAUX F., MEYNARD J.M., RECOUS S., 2001. Déclencher la fertilisation azotée du blé : bases théoriques et principes généraux : le témoin « double densité ». *Perspectives Agricoles*, 273, 62-70.
- LOVELL D.J., PARKER S.R., HUNTER T., ROYLE D.J., COKER R.R., 1997. Influence of crop growth and structure on the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. *Plant pathology*, 46, 126-138.
- LOYCE C., BOUCHARD C., MEYNARD J.M., ROLLAND B., DOUSSINAULT G., BERNICOT M.H., HASLÉ H., 2001. Les variétés tolérantes aux maladies : une innovation majeure à valoriser par des itinéraires techniques économes. *Perspectives Agricoles*, 268, 50-56.
- LOYCE C., RELIER J.P., MEYNARD J.M., 2002a. Management planning for winter wheat with multiple objectives (1): The BETHA system. *Agricultural Systems*, 72, 9-31.
- LOYCE C., RELIER J.P., MEYNARD J.M., 2002b. Management planning for winter wheat with multiple objectives (2): ethanol-wheat production. *Agricultural Systems*, 72, 33-57.
- LOYCE C., MEYNARD J.M., BOUCHARD C., ROLLAND B., LONNET P., BATAILLON P., BERNICOT M.H., BONNEFOY M., CHARRIER X., DEMARQUET T., DUPERRIER B., FÉLIX I., HEDDADJ D., LEBLANC O., LELEU M., MANGIN P., MÉAUSOONE M., DOUSSINAULT G. (accepté). Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, yield and profitability. *Crop Protection*.
- MEYNARD J.M., 1985. *Construction d'itinéraires techniques pour la culture du blé d'hiver*. Thèse INA-PG, Paris.
- MEYNARD J.M., 1991. Pesticides et itinéraires techniques. In P. Bye, C. Descoins & A. Deshayes (éds.) : *Phytosanitaire, Protection des plantes, Biopesticides*. INRA, Paris, 85-100.
- NEUMANN S., PAVELEY N.D., BEED F.D., SYLVESTER-BRADLEY R., 2004. Nitrogen per unit leaf area affects the upper asymptote of *Puccinia*

- striiformis f.sp tritici* epidemics in winter wheat. *Plant pathology*, 53, 725-732.
- OLESEN J.E., JORGENSEN L.N., PETERSEN J., MORTENSEN J.V., 2003. Effects of rate and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 1. Grain yield and foliar disease control. *Journal of agricultural science*, 140, 1-13.
- ONIGC, 2003, 2004, 2005, 2006. *Enquêtes ONIC ARVALIS-Institut du végétal sur la répartition variétale des blés*.
- PERVANCHON F., BOCKSTALLER C., GIRARDIN P., 2002. Assessment of energy use in arable farming systems by means of an agro-ecological indicator: the energy indicator. *Agricultural systems*, 72, 149-172.
- RÉAL B., DUTERTRE A., ESCHENBRENNER G., BONNIFET J.P., MULLER J.M., 2004. *Transfert de produits phytosanitaires par drainage, ruissellement ou percolation. Résultats de 10 campagnes d'expérimentation*. XIX^e conférence du COLUMA, Dijon, 8-10 décembre 2004, p 70.
- ROLLAND B., BOUCHARD C., LOYCE C., MEYNARD J. M., GUYOMARD H., LONNET P., DOUSSINAULT G., 2003. Des itinéraires techniques à bas niveaux d'intrants pour des variétés rustiques de blé tendre : une alternative pour concilier économie et environnement. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA*, 49, 47-63.
- ROLLAND B., FELIX I., LONNET P., BLONDEL R., LOYCE C., 2005. Un exemple d'agriculture profitable avec des intrants réduits : la culture des blés multirésistants aux maladies. Académie d'agriculture de France, séance du 1^{er} juin 2005 : « Amélioration des plantes et agriculture durable ». En ligne à l'adresse www.academie-agriculture.fr/files/seances/2005/numero5/20050601resume3.pdf
- ROLLAND B., OURY F.-X., BOUCHARD C., LOYCE C., 2006. Vers une évolution de la création variétale pour répondre aux besoins de l'agriculture durable ? L'exemple du blé tendre. *Les dossiers de l'environnement de l'INRA n°30*, « Quelles variétés et semences pour des agricultures paysannes durables ? » 30, 79-90.
- SAULAS P., MEYNARD J. M., 1998. Production intégrée et extensification sont-elles compatibles? Cas des céréales à paille. *Les dossiers de l'environnement de l'INRA n°30*, « Quelles variétés et semences pour des agricultures paysannes durables ? », 16, 9-15.
- SIMON M. R., CORDO C. A., PERELLO A. E., STRUIK P. C., 2003. Influence of nitrogen supply on the susceptibility of wheat to *Septoria tritici*. *Journal of Phytopathology*, 151, 283-289.
- TOMPKINS D. K., WRIGHT A.T., FOWLER D.B., 1992. Foliar disease development in no-till winter wheat: influence of agronomic practices on powdery mildew development. *Canadian Journal of Plant Science*, 72, 965-972.
- VANLOQUEREN G., BARET P.V. (accepté 2007). Why are 'ecological' disease-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural 'lock-in' case study. *Ecological Economics*.
- VERJUX N., 1997. Maladies foliaires du blé – L'incidence des techniques culturales ? *Perspectives Agricoles*, 220, 86-9.
- ZADOCKS J.C., CHANG T.T., KONZAK C.F., 1974. A decimal code for growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415-421.
- ZHANG X. Y., 2005. *Modélisation de la réponse des variétés de blé au niveau d'intensification. Influence de la pression de maladies foliaires*. Thèse de l'INA P-G, 98 pages.