

Quelles combinaisons variétés / conduites pour améliorer les performances économiques et environnementales de la culture de blé tendre ?

J.M. Meynard¹, B. Rolland², C. Loyce³, I. Félix⁴, P. Lonnet⁵

¹: INRA, département SAD, 78000 Thiverval Grignon

²: INRA, UMR APBV INRA / Agrocampus / Université Rennes1, BP 35327, 35653 Le Rheu

³: AgroParisTech, UMR 211 Agronomie, 78000 Thiverval Grignon

⁴: ARVALIS-Institut du végétal, Domaine du Chaumoy, 18570 Le Subdray

⁵: Florimond-Desprez, Capelle, BP 41, 59242 Templeuve

Résumé

Depuis le début des années 80, la production du blé en France s'est appuyée sur la mise en culture de variétés productives associées à un usage intensif d'intrants chimiques. Depuis, les efforts de la sélection ont conduit à l'inscription de variétés de blé multi-résistantes aux maladies. En parallèle, des travaux sur la réduction des intrants ont été menés, pour économiser des charges et améliorer les performances environnementales. Ces conduites de culture pourraient servir à élargir la gamme des conduites sur lesquelles évaluer les variétés. Le présent travail vise à réaliser une évaluation économique, énergétique et environnementale d'un ensemble de combinaisons de variétés et d'itinéraires techniques.

Nous avons mis en place deux réseaux expérimentaux multilocus de manière à tester ces combinaisons sur une large gamme de conditions pédo-climatiques. Les résultats montrent qu'il est possible de valoriser des variétés multi-résistantes aux maladies par des conduites économes en intrants et d'en retirer des bénéfices au plan environnemental et énergétique. Une telle combinaison rend la culture moins vulnérable aux fluctuations des prix de vente du blé et plus rentable quand le prix de vente du blé est faible, mais aussi dans le cas de prix de vente moyens associés à un prix de l'énergie élevé.

Mots-clés : résistance variétale; protection intégrée des cultures; interaction génotype-environnement; blé tendre d'hiver; maladies fongiques; verse; marge; environnement

Abstract: Combining varieties and agronomic practices to improve economic and environmental performance of winter wheat

Since the 80's, winter wheat management in France has focused on cropping high-yielding cultivars with an intensive use of external inputs. However, the breeding of effective resistances to fungal diseases has received higher priority for the past ten years. Meanwhile, low-input strategies have been developed to save on costs and to meet environmental targets. They could be used to extend cultivar evaluation to a broader range of crop management systems. The paper aims to evaluate cultivars resistant/sensitive to diseases under low-input/high-input crop management systems in order to assess their economical, energetic and environmental performances.

Two multi-environment networks were carried out to test the combinations of cultivar and crop management system over a wide range of growing conditions. We allowed variations of several factors to assess the vulnerability of these combinations to changes in the economical context and to integrate recent increases in grain and oil prices.

Results showed that it is environmentally and energetically sound to grow resistant cultivars under low-input crop management systems. Such combinations also lowered the profitability sensitivity to grain

price. Lastly, they were the more often profitable when grain prices were low, and in a context of average grain prices combined with high oil prices.

Keywords: cultivar resistance; integrated pest management; genotype by management interaction; winter wheat; fungal diseases; lodging; profitability; environment

Introduction

Depuis le début des années 80, la production du blé en France s'est appuyée sur la mise en culture de variétés semi-naines, très productives, associées à un usage intensif d'intrants externes (engrais minéraux et produits phytosanitaires notamment). Les variétés de blé étaient surtout évaluées expérimentalement dans un contexte de conduite de culture intensive et essentiellement sur des critères de production, de régularité de production et de qualité technologique (Hochereau, 2008), comme l'attestent les dispositifs des essais variétés en post inscription. Quant aux conduites de culture, elles étaient essentiellement jugées du point de vue de la production, et de la marge qu'elles permettaient d'obtenir - « *le rendement fait la marge* »- (Meynard et Girardin, 1991).

Depuis, on a assisté à une diversification des types variétaux disponibles ainsi que des itinéraires techniques. Les efforts de la sélection ont en effet conduit à l'inscription de variétés de blé multi-résistantes aux maladies (Lonnet, 1997) comme le piétin-verse par exemple (Doussinault et al., 1983). Ces variétés restant peu utilisées au moment où a débuté l'étude (1999), nous avons fait l'hypothèse que c'était parce qu'elles n'étaient pas cultivées avec des itinéraires techniques adaptés, du fait de la non prise en compte des interactions existant entre le choix variétal et la conduite de culture. Or, au niveau des itinéraires techniques, différents travaux sur la réduction des intrants avaient été menés, pour économiser des charges et améliorer les performances environnementales (Meynard, 1985; Vereijken, 1989; Loyde, 1998). Ces conduites de culture ont été utilisées pour élargir la gamme des conduites sur lesquelles évaluer les variétés.

De nombreux changements concernant le contexte de la culture du blé appellent à un renouvellement des critères d'évaluation des itinéraires techniques et des variétés. Les critères relatifs aux impacts sur l'environnement et à la dépendance vis-à-vis de l'utilisation d'énergie fossile sont devenus à présent incontournables. De nombreux articles font ainsi état d'une évaluation environnementale de conduites de culture intégrées vis-à-vis des pertes d'azote minéral (Borin et al., 1997; Dejoux et al., 2003; Meynard, 1985), de l'usage des produits phytosanitaires (Loyce et al., 2002; Tamis and van den Brink, 1999) et de leur impact sur la faune invertébrée (Alvarez et al., 2001). En revanche, si l'on excepte le cas de l'évaluation des risques environnementaux associés à la production de variétés OGM due à la dispersion des transgènes (Colbach et al., 2005, pour le colza, Angevin et al., 2008; Ricoch et al., 2009, pour le maïs) et aux effets induits sur la faune et la flore (Bohanec et al., 2008; Cortet et al., 2007), l'évaluation environnementale des variétés reste balbutiante.

Par ailleurs, les critères de l'évaluation économique doivent eux-mêmes être révisés : après une longue période de baisse régulière des prix du blé, ceux-ci ont fortement augmenté en 2007, puis chuté en 2008, revenant à des niveaux proches de ceux de 2006. De même, les prix du pétrole sont de plus en plus instables, atteignant des sommets inégalés en 2008 ; ces fluctuations se reportent sur les prix de certains intrants (fuel et engrais azoté principalement). L'évaluation économique des itinéraires techniques et des variétés doit prendre en compte cette forte instabilité des prix du blé et des intrants et la difficulté qu'éprouvent aujourd'hui les acteurs de la filière blé à prévoir ce que sera demain.

Le présent travail vise à analyser les interactions entre le choix variétal et l'itinéraire technique du point de vue de la pression des maladies et de la verse et à réaliser une évaluation économique, énergétique et environnementale d'un ensemble de combinaisons de variétés et d'itinéraires techniques. Pour ce faire, nous utilisons les résultats de deux réseaux expérimentaux multiloaux de manière à tester ces

combinaisons sur une large gamme de conditions pédo-climatiques. Ces recherches, qui ont été engagées depuis une dizaine d'années, dans des projets associant différents acteurs de la R&D agricole et plusieurs entreprises de sélection, rencontrent aujourd'hui les objectifs du plan gouvernemental Ecophyto 2018 qui a pour ambition de réduire l'usage de l'utilisation des produits phytosanitaires de 50% en 10 ans.

Combiner des variétés plus ou moins résistantes aux maladies et la verse avec des conduites à niveau d'intrants variés

À l'initiative de quelques pionniers, au premier rang desquels figure Gérard Doussinault, l'INRA lançait, dès la fin des années 60, un programme d'amélioration génétique du blé tendre visant à remplacer les traitements fongicides par l'utilisation de variétés résistantes aux maladies. Ces travaux d'amélioration variétale ont augmenté la diversité génétique du blé par introduction de résistances aux rouilles et au piétin-verse en utilisant une graminée sauvage, *Aegilops ventricosa* (Doussinault *et al.*, 2001). La première variété née de ce programme a été Roazon, inscrite au catalogue en 1976. Au début des années 80, l'INRA entreprit d'associer la filière céréalière à ces recherches, via les sélectionneurs privés. Anticipant la demande et aidée en cela par la politique volontariste du CTPS¹ qui dote d'un bonus les variétés tolérantes aux maladies pour favoriser leur inscription (Mistou, 2001), la sélection a abouti à l'inscription de Renan en 1989. Cette variété n'a pas eu un fort développement parce que son potentiel de rendement est insuffisant en conduite de culture intensive. On notera toutefois que Renan est aujourd'hui la première variété de blé tendre cultivée en Agriculture Biologique en France (Anonyme, 2009) et qu'elle est bien diffusée en Allemagne et en Autriche. C'est à partir de 1995 que sont apparues de nouvelles variétés associant, comme jamais auparavant, résistances aux maladies et à la verse et productivité élevée. Font partie de ce groupe, dans l'ordre chronologique d'inscription au catalogue français, les cultivars Balthazar (1996), Oratorio (1996), Folio, Virtuose (1998), Farandole (1999), Forban, Aubusson, Vercors, Caphorn (2001)... Quand débute notre étude, en 1999, ces variétés restent encore très peu cultivées ; ainsi elles représentaient, en 2000, à peine 5% de la sole française de blé (enquête ONIC, juin 2000).

La mise au point d'itinéraires techniques adaptés aux variétés multirésistantes aux maladies et à la verse s'est appuyée sur les travaux menés à l'INRA depuis les années 80 (Meynard, 1985) sur la réduction des intrants. Ceux-ci ont montré qu'un recours moindre aux traitements fongicides était d'autant moins risqué que l'on réduisait simultanément l'alimentation azotée précoce et la densité de plantes, facteurs favorisant le développement des maladies comme le piétin verse, la septoriose et l'oïdium (Saulas and Meynard, 1998; Leleu *et al.*, 2000). Ces réductions de la fertilisation azotée et de la densité de semis concourent également à renforcer la résistance à la verse des peuplements. Meynard (1985; 1991) a ainsi défini des réductions équilibrées des différents intrants en fonction de l'objectif de rendement en utilisant des modèles agronomiques simples. De même, Loyce (1998, 2002) a mis au point des itinéraires techniques adaptés aux exigences de la production d'éthanol de blé à partir d'un outil d'aide à la décision informatique : pour un prix du blé très bas (76 € par tonne) et des contraintes environnementales fortes, les itinéraires techniques sélectionnés associent variétés multirésistantes aux maladies et à la verse, doses d'engrais réduites, densité de semis faible et suppression des traitements fongicides et des régulateurs de croissance.

En se fondant sur ces acquis, 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 de Bretagne ont engagé une collaboration à partir de 1999 afin d'évaluer l'intérêt des variétés rustiques conduites avec des itinéraires techniques à niveaux d'intrants réduits. Un premier réseau expérimental multilocal et pluriannuel (28 sites entre 2000 et 2002 ; « Réseau 1 ») a été mis en place (Loyce *et al.*, 2001, Félix *et*

¹ Comité Technique Permanent de la Sélection des Plantes Cultivées

al., 2002, Rolland et al., 2003). Sur chaque essai, différentes variétés - dont certaines multirésistantes aux maladies et à la verse – sont cultivées selon quatre itinéraires techniques de niveau d'intrants contrasté, chacun raisonné de manière cohérente en fonction d'un objectif de rendement et de qualité.

Trois variétés sont communes à tous les lieux : Trémie et Isengrain, représentatives du type variétal dominant à la fin des années 1990 (des variétés productives et relativement sensibles aux maladies), et Oratorio (représentant les variétés multirésistantes aux maladies et à la verse). Les autres variétés - en général choisies dans le type "tolérant aux maladies"² – ont été choisies par les expérimentateurs. Toutefois, une coordination régionale a permis d'éviter que les variétés ne soient présentes qu'une seule fois dans le réseau.

Les quatre itinéraires techniques ont été raisonnés selon les mêmes principes sur tous les essais, tout en étant adaptées aux conditions régionales :

- L'itinéraire technique 2 (ITK2) correspond aux recommandations locales de l'ITCF (puis ARVALIS-Institut du végétal) et/ou des Chambres d'Agriculture. Il vise l'obtention d'un rendement généralement situé dans la médiane des potentialités et d'un taux de protéines supérieur ou égal à 11 %.
- L'itinéraire technique 1 (ITK1) vise à extérioriser les potentialités de rendement des variétés en situation d'intrants non limitants. La dose d'engrais azoté est majorée de 30 kg.ha⁻¹ par rapport à l'itinéraire technique 2. La protection fongicide correspond à une couverture complète (traitements systématiques pendant toute la période de risque épidémique) et la prévention de la verse est assurée par l'emploi systématique d'un à deux régulateurs de croissance.
- Dans l'itinéraire technique 3 (ITK3) on accepte un rendement inférieur de 5 à 10 quintaux par ha à l'itinéraire technique 2, mais on recherche toujours un taux de protéines des grains supérieur à 11 %. 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), un risque moindre de maladies comme l'oïdium (Tompkins et al., 1992) ou le piétin-verse (Colbach and Saur, 1998; Huet, 1986) et des besoins en azote plus réduits en début de cycle. 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, qui a le coefficient d'utilisation le plus bas (Limaux et al., 2001) et qui est le moins déterminant pour la teneur en protéines, 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 puis entre le gonflement et l'épiaison, avec une dose totale inférieure de 30 kg par hectare à la dose apportée pour l'itinéraire technique 2. Enfin, associée à une baisse de densité de semis, 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; Simon et al., 2003; Verjux, 1997), 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 dont la date et les formulations sont choisies en fonction des risques régionaux est donc généralement suffisante.
- L'itinéraire technique 4 (ITK4) explore une économie d'intrants plus extrême, du type de celle qui a été étudiée pour la production de blé éthanol : dose d'engrais azoté réduite de 60 kg.ha⁻¹ par rapport à l'itinéraire technique 2 et suppression du premier apport ; densité de semis réduite de 40

² à savoir les variétés Balthazar, Biscay, Cézanne, Ornicar et Virtuose ; la liste était plus logue : voir articles de l'époque

% comme dans l'ITK3; pas de traitement fongicide, ni de traitement régulateur de croissance. Le maintien d'un apport d'engrais azoté tardif vise à préserver une teneur en protéines satisfaisante malgré la réduction de la dose totale.

Les résultats encourageants de ce premier réseau 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 (« Réseau 2 ») associant les chambres d'agriculture de divers départements, ARVALIS-Institut du végétal et l'INRA a donc été mis en place dès 2003 (Bouchard et al., 2008). Pour réduire les coûts expérimentaux, seuls les itinéraires techniques 2 et 3 ont été évalués dans ce nouveau réseau, en incluant dans certaines situations l'usage d'informations issues d'une bande double densité (Limaux et al., 2001) pour déclencher le premier apport d'engrais azoté en ITK3.

Dans ce réseau 2, le choix des variétés communes à tous les essais a été modifié pour tenir compte des nouvelles variétés inscrites. 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 productive, mais plus sensible aux maladies et à la verse qu'Apache), de manière à avoir des choix variétaux plus contrastés. Ne sont présentés par la suite que les résultats sur les variétés Caphorn et Orvantis, représentées dans un nombre significatif de situations sur plusieurs années. Ces deux variétés ont été très largement cultivées en France entre 2003 et 2006 (ONIGC, 2003, 2004, 2005, 2006).

Quels rendements et quel comportement vis-à-vis de la verse et des maladies des combinaisons variété – conduite ?

Nous avons réalisé une évaluation agronomique des résultats obtenus sur le premier réseau (2000-2002) en vue d'analyser les effets conjoints du choix variétal et de l'itinéraire technique sur les maladies et la verse et les conséquences en termes de rendements obtenus. Cette évaluation a été menée sur les 18 sites où des maladies et/ou de la verse ont été observées (Loyce et al., 2008).

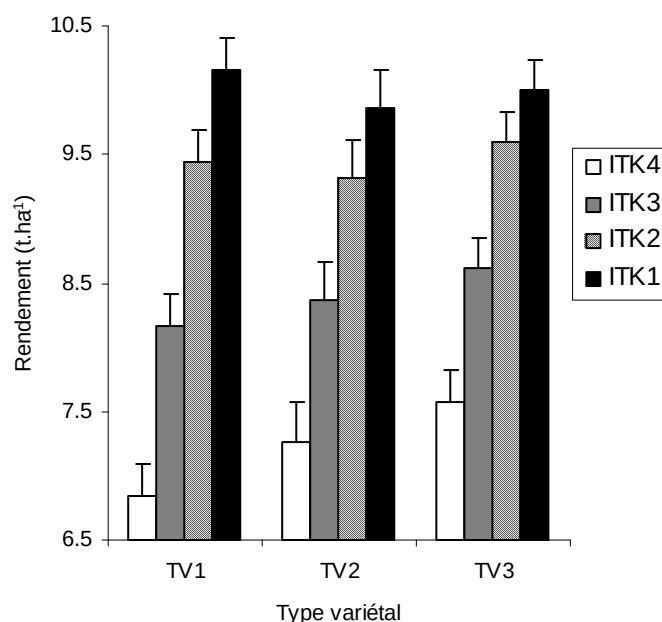
Evolution des rendements

Pour analyser l'effet du type variétal sur le rendement, nous avons constitué par classification ascendante hiérarchique trois groupes variétaux selon leurs notes de résistance aux maladies. On distingue ainsi (i) le type variétal 1 (TV1), sensible à la septoriose et à la rouille brune, qui comprend les variétés Isengrain, Soissons et Trémie, (ii) TV2 (Balance, Cézanne, Muritot, etc.) type sensible à la rouille jaune mais assez résistant à la rouille brune et à la septoriose (iii) TV3 (Apache, Charger, Oratorio, Forban, Virtuose, Caphorn, etc.), type résistant aux rouilles et assez résistant à la septoriose. Notons que le type variétal 1 comprend les variétés les plus cultivées dans les années 90 (Soissons, Trémie) et au début des années 2000 (Isengrain) en France. Elles sont été sélectionnées pour leur forte productivité en situation non limitante en intrants (pour Isengrain ou Trémie) ou leur adaptation à une très large zone de production du blé (dans le cas de Soissons).

Les rendements sont significativement affectés par l'itinéraire technique ($P < 0.0001$), le type variétal ($P < 0.0003$) et une interaction entre ces deux effets est observée ($P = 0.0023$). Dans le cas de la conduite à niveau d'intrants élevée (ITK1), TV1 obtient un rendement moyen de 10.15 t ha^{-1} , tandis que TV3 et TV2 obtiennent respectivement des rendements de 10 t ha^{-1} et de 9.85 t ha^{-1} (Figure 1). Ainsi, on n'observe pas de fortes pénalités de rendement quand les variétés multirésistantes aux maladies sont cultivées avec des conduites intensives. Ces résultats sont cohérents avec ceux obtenus par Wagoire et al. (1998), qui ne constatent aucune différence entre des variétés résistantes et sensibles à la rouille jaune pour de telles conduites. Saulas et Meynard (1998) ont aussi noté que les différences de rendement entre les variétés résistantes et sensibles aux maladies avaient beaucoup diminué depuis les années 80. Toutefois, Brown (2002) fait remarquer que les pénalités de rendement sont souvent

observées et peuvent s'expliquer par le coût direct du gène de résistance ou le coût indirect de l'échappement du couvert végétal vis-à-vis de la maladie due à la mise en place d'un couvert sous optimal pour le rendement. De plus, dans notre réseau, les variétés du type TV1 (le type variétal sensible aux maladies) sont un peu plus anciennes que celles des types TV2 et TV3 : l'année moyenne d'inscription au catalogue variétal est de 1992 pour TV1, 1998 pour TV2 et 1999 pour TV3. Compte tenu du gain de productivité de 63 kg.ha⁻¹ par an reporté par Brancourt-Hulmel et al. (2003), les variétés du type TV1 auraient eu un rendement plus élevé de 0.4 t ha⁻¹ si elles avaient été sélectionnées la même année que les variétés des types TV2 et TV3. Cela aurait conduit à une productivité des variétés du type TV1 supérieure à celle de TV2 et TV3 pour les ITK1 et 2.

Figure 1 : Effet conjoint du type variétal et de l'itinéraire technique sur le rendement (réseau 1)



Les barres d'erreurs représentent les écart-types.

TV1, TV2 et TV3 sont respectivement représentés sur 18, 11 et 18 sites (sur 18)

Comme prévu, on observe une diminution des rendements pour tous les types variétaux du fait de la réduction des intrants opérée de l'ITK1 à l'ITK4. Toutefois, les pertes moyennes de rendement entre l'ITK1 et l'ITK4 sont plus importantes pour TV1, le type variétal sensible aux maladies (3.3 t ha⁻¹) que pour TV2 (2.6 t ha⁻¹) et TV3 (2.4 t ha⁻¹). Enfin, les pertes de rendement sont fortes entre l'ITK3 et l'ITK4 (de 16.2% pour TV1, de 13% et de 12% pour TV2 et TV3), modérées entre l'ITK2 et l'ITK3 (de 13.5% pour TV1, de 10.3% et de 10.2% pour TV2 et TV3) et plus faibles entre l'ITK1 et l'ITK2 (de 7% pour TV1, de 5.5% et de 4.1% pour TV2 et TV3).

Sur le deuxième réseau expérimental, une comparaison entre les combinaisons Orvantis (type TV1) – ITK2 et Caphorn (type TV3) associé à l'ITK3 a été établie dans le cadre du projet Ecophyto R&D (MEEDDAT, 2009). La diminution de rendement entre ces deux combinaisons varie de 6 à 11% en moyenne selon les années sur le réseau. Sur l'ensemble de la période considérée (récoltes 2004 à 2007), la perte de rendement moyenne est de 9% (n= 100 essais). Cette valeur est très proche de celle que nous avons observée dans le réseau antérieur entre les récoltes 2000 et 2002 (8.8% d'écart de rendement entre TV1-ITK2 et TV3-ITK3).

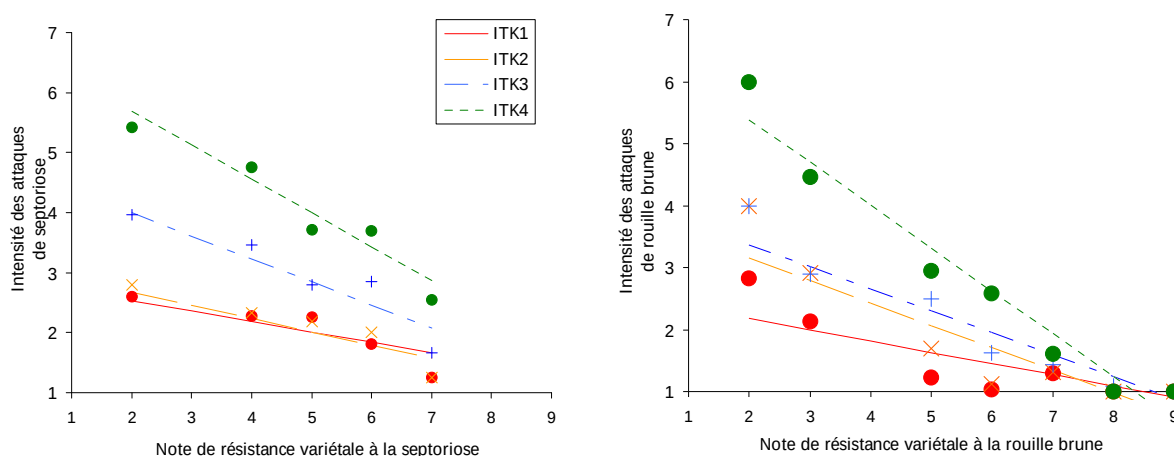
Comportement vis-à-vis des maladies et de la verse

Comme attendu, on observe dans le réseau 1 que les variétés comportant des niveaux de résistance élevés permettent de réduire l'intensité des attaques de maladies ($P < 0.0001$ et $P = 0.0027$ pour la rouille jaune). Pour la rouille jaune, la rouille brune et le piétin verse, de telles variétés aboutissent à une maîtrise complète des maladies, ce qui apparaît cohérent avec l'existence de résistances variétales plus efficaces pour ces maladies que pour la septoriose (Doussinault et al., 1983; Lonnet, 1997).

La pression de maladies augmente quand le niveau d'intrants diminue ($P < 0.0001$). La protection fongicide apparaît donc plus efficace que la réduction de la densité de semis et de la quantité d'engrais azoté apporté. Toutefois, on peut faire l'hypothèse, comme montré par Saulas et Meynard (1998), que la réduction de la densité de semis et de la dose d'azote aide à diminuer les pertes de rendement liées à l'absence d'application de traitement fongicide en itinéraire technique 4.

Il existe une interaction entre la note de résistance variétale et l'itinéraire technique sur le niveau des attaques de septoriose, de rouille brune et de rouille jaune ($P < 0.005$). Associer une variété résistante en itinéraire technique à bas niveau d'intrants permet une protection contre les maladies foliaires aussi efficace qu'avec une combinaison entre une variété sensible aux maladies et un itinéraire technique plus intensif (Figure 2). En conclusion, l'usage préventif des produits fongicides pour des variétés productives de blé dans le cadre des systèmes de culture intensifs a masqué le fait que d'autres moyens sont disponibles pour contrôler les maladies (Meynard, 1991). Les mélanges de variétés (Mundt et al., 1995, Pope de Vallavieille, 2006) peuvent aussi réduire de manière significative la pression des maladies, de manière analogue à des variétés multirésistantes.

Figure 2 : Effet conjoint de l'itinéraire technique et de la note de résistance variétale sur le niveau d'intensité de de septoriose et de rouille brune (réseau 1) ; ●, x, +, ● : ITK1, ITK2, ITK3 et ITK4



L'intensité de la verse décroît de manière significative quand le niveau des intrants diminue, à savoir de l'ITK1 à l'ITK4 ($P < 0.0001$) et quand la note de résistance variétale à la verse augmente ($P < 0.0001$), sans interaction entre ces deux effets. La différence moyenne d'intensité de verse entre les variétés avec les notes de résistance les plus élevées (8.5) et les plus faibles (4.5) est de 1.18. L'itinéraire technique a un effet plus important avec une différence de 1.81 d'intensité de verse entre l'ITK1 et l'ITK4. La verse complique les travaux de récolte, en particulier quand l'été est pluvieux et les agriculteurs sont très sensibles à ce problème. Une diminution conjointe de la densité de semis et des apports précoces d'engrais azoté permettent de contrôler la verse de manière plus efficace que l'utilisation d'un régulateur de croissance sur des peuplements denses recevant de forts niveaux d'application d'engrais azoté.

Quelle robustesse des combinaisons variété – conduite vis-à-vis des variations de prix du blé et de l'énergie ?

Sur le réseau expérimental 2000-2002, l'évaluation économique repose sur la marge semi-nette³ (M, en € par ha), qui a été calculée selon la formule suivante :

$M = p.R - (CO + CM)$, avec :

p : prix de vente du blé en € par tonne (auquel sont retranchées des réfections liées à la teneur en protéines des grains et au poids spécifique selon le barème de la FFCAT) ;

R : rendement (tonne par hectare) ;

CO : charges opérationnelles (€ par hectare) ;

CM : charges de mécanisation (€ par hectare).

Les charges opérationnelles sont calculées en prenant en compte l'ensemble des intrants apportés sur la culture (semences, engrais azoté, produits fongicides, herbicides et insecticides, régulateurs de croissance, fuel). Le calcul des charges de mécanisation et des consommations en fuel repose sur les informations issues du BCMA (coût prévisionnel indicatif des matériels agricoles).

Pour apprécier la robustesse des combinaisons variété – itinéraire technique vis-à-vis du contexte économique et prendre en compte les hausses récentes survenues en matière de prix de vente du blé et de prix du pétrole, nous avons combiné deux hypothèses de prix :

- (i) le prix de vente du blé varie de 80 €/t¹ (le prix minimum de vente observé depuis 1992) à 280 €/t¹ (le « pic » du prix de vente constaté chez les agriculteurs sur certains de leurs lots de blé en 2008), ce qui entraîne une évolution du prix de la semence de blé de 0.48 à 0.68 €/kg⁻¹ (L. Guindé, INRA, comm.pers.)
- (ii) le prix du pétrole est de 29 \$ le baril (comme en 2000) ou atteint 144 \$ le baril (à savoir le pic observé le 3 Juillet 2008), ce qui affecte le prix de l'engrais azoté et du fuel. Nous avons considéré que le prix de l'engrais N variait de 0.46 €/kg⁻¹ (son prix en 2000) à 1.26 €/kg⁻¹ (P. Eveillard, UNIFA, comm. pers). Le prix du fuel quant à lui varie de 0.44 €/l⁻¹ (son prix en 2000) à 0.96 €/l⁻¹, le pic de prix atteint pour le fuel le 4 Juillet 2008, le jour après le prix maximum atteint par le prix du pétrole (www.ufip.fr).

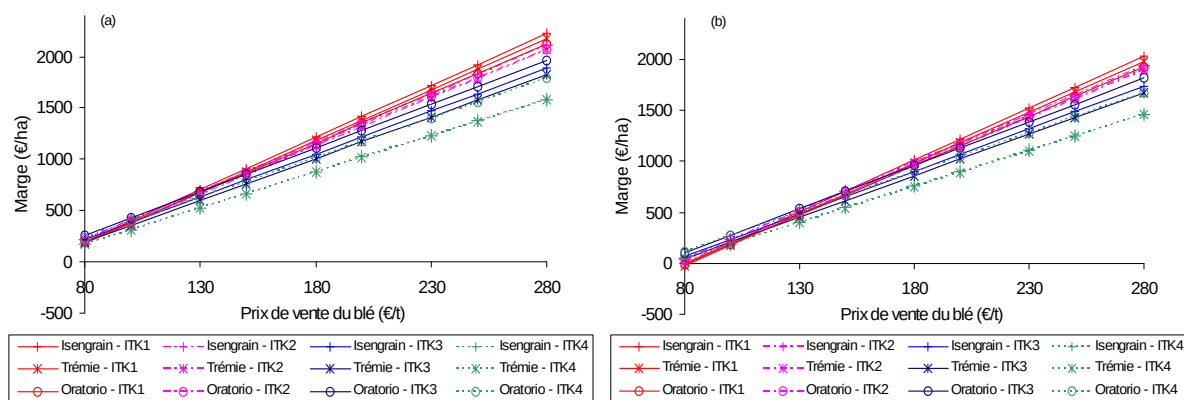
Les marges nettes moyennes obtenues sur l'ensemble des essais sont représentées sur la figure 3, en fonction du prix du blé (en abscisse) et du prix de l'énergie (Figure 3a, prix bas, comparée à Figure 3b, prix élevé), pour les 12 combinaisons variété - itinéraire technique. Lorsque le prix de l'énergie est faible, on observe que pour les prix du blé les plus bas (inférieurs à 115 €/t¹), Oratorio ITK3 offre les marges les plus élevées, alors que pour les prix du blé plus élevés, Isengrain en ITK1 constitue la meilleure combinaison (Figure 3a). Pour un prix de l'énergie élevé, lorsque le prix de vente est faible, Oratorio en ITK4, puis Oratorio en ITK3 sont les combinaisons les plus satisfaisantes en terme de marge et à partir de 150 €/t¹, Isengrain en ITK1 obtient la marge la plus élevée (Figure 3b).

Pour tenir compte de la variabilité des résultats obtenus sur les essais du réseau 1, nous avons également examiné la fréquence d'affectation F de quatre combinaisons « variété-itinéraire technique » (sur les 28 essais) au groupe de combinaisons obtenant la meilleure marge de l'essai (la « meilleure » marge sur un essai donné étant une marge non significativement différente de la marge maximale de l'essai) :

$$F_i = [\text{Nombre d'essais où la combinaison « variété-itinéraire technique » } i \text{ obtient la meilleure marge} / 28] \times 100$$

³ Cette marge est appelée semi-nette car elle inclut une partie des charges de structure, à savoir les charges de mécanisation.

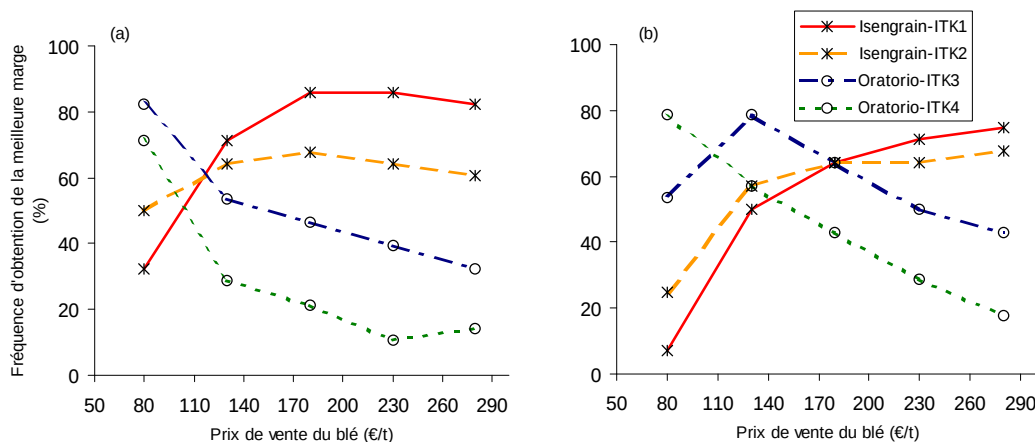
Figure 3 : Evolution de la marge semi-nette moyenne dans le réseau 1, en fonction du prix du blé pour les douze combinaisons variété - itinéraire technique et deux prix de l'énergie extrêmes (29 \$ le baril (a) et 144 \$ le baril (b))



Pour faciliter la lecture des résultats, les quatre combinaisons « variété-itinéraire technique » que nous avons retenues sur la figure 4 comprennent celles obtenant des marges élevées pour certaines hypothèses de niveaux de prix de vente et de prix de l'énergie (comme décrit en figure 3) ainsi qu'Isengrain en ITK2, la conduite de référence.

Quand le prix du pétrole est de 29 \$ le baril (Figure 4a), Isengrain en ITK1 obtient la fréquence d'affectation F la plus élevée dès lors que le prix de vente du blé dépasse 120 euros.t⁻¹ environ. Parmi les combinaisons les plus intéressantes économiquement, Isengrain-ITK2 est plus robuste face aux variations de prix du blé qu'Isengrain en ITK1. Quand le prix de vente du pétrole atteint 144 \$ le baril (Figure 4b), la fréquence F la plus élevée est obtenue en associant Oratorio à une conduite à bas niveau d'intrants (ITK4 et ITK3) jusqu'à un prix de vente du blé respectivement de 120 et de 180 euros.t⁻¹ environ. Par ailleurs, il apparaît qu'Oratorio-ITK3 est globalement moins vulnérable vis-à-vis des variations du prix du blé qu'Isengrain conduit en ITK1 et ITK2. Sur l'ensemble des gammes de variation des prix du blé et du pétrole, Oratorio ITK 3 présente la plus grande stabilité de performance.

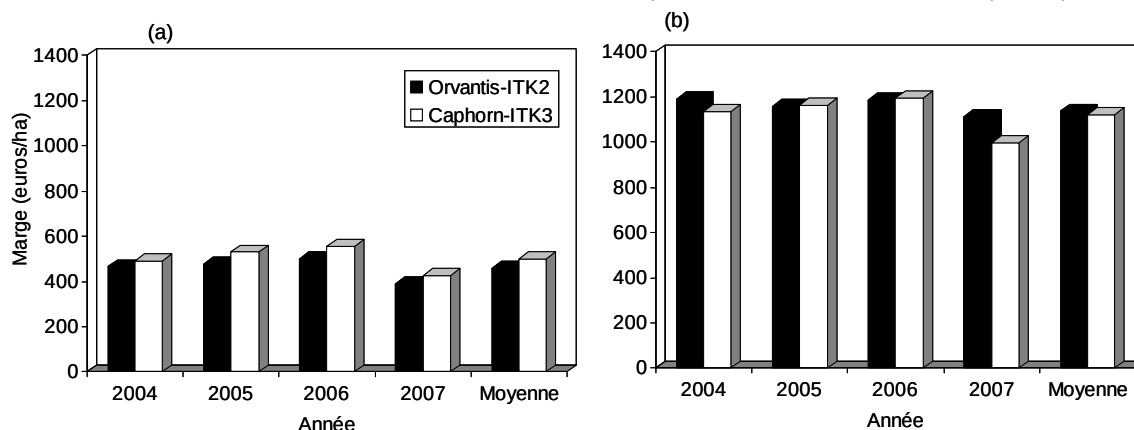
Figure 4 : Evolution de la fréquence d'obtention de la meilleure marge sur les 28 essais du réseau 1 (%) en fonction du prix de vente du blé. (a) prix du pétrole de 29 \$ le baril; (b) prix du pétrole de 144 \$ le baril



Les comparaisons menées dans le cadre du second réseau (2003 à 2007) montrent également que le passage de la combinaison Orvantis - ITK2 à la combinaison Caphorn - ITK3 s'accompagne d'une

augmentation de la marge brute dans un contexte de prix de vente de prix bas (100 €/t, prix moyen payé à l'agriculteur entre 2000 et 2006) (Figure 5a). Caphorn en ITK3 permet de dégager systématiquement une marge brute supérieure à Orvantis en ITK2. Cette différence est comprise entre 23 et 55 €/ha selon les années, pour une moyenne de 41 €/ha sur la période d'étude (MEEDDAT, 2009).

Figure 5 : Comparaison des marges des combinaisons Orvantis - ITK2 et Caphorn - ITK3 entre 2004 et 2007 (réseau 2) pour un prix de vente du blé de 100 € par tonne (a) et de 180 € par tonne (b). 12 essais en 2004, 30 essais en 2005, 25 essais en 2006 et 32 essais en 2007 ; moyenne sur la totalité des essais (n=100)



Lorsque le prix du blé augmente, les charges économisées ne permettent plus de compenser la baisse de rendement, et la marge brute de la combinaison Caphorn-ITK3 est relativement moins intéressante (Figure 5b). Ainsi au prix de 180 €/t, on observe une variation moyenne de la marge brute de -15 €/ha entre Caphorn-ITK3 et Orvantis-ITK2 (comprise entre -55 et +11 €/ha selon les années). Dans le même temps, par le seul effet "prix du produit", la marge du blé passe de 459 à 1137 €/ha avec Orvantis-ITK2 et de 500 à 1122 €/ha avec Caphorn en ITK3 (MEEDDAT, 2009).

Tableau 1 : Approche des risques économiques liés au choix de l'une ou l'autre des combinaisons Caphorn ITK3 / Orvantis ITK2 (réseau 2, calculs aux prix de campagne) Mêmes essais que figure 5. D'après Bouchard et al, 2008.

	2004	2005	2006
Que gagne-t-on en moyenne à choisir Caphorn-3 plutôt qu'Orvantis-2?	17 €	66 €	55 €
Que perd-on au pire à choisir Caphorn-3 plutôt qu'Orvantis-2?	52 €	52 €	69 €
Que perd-on au pire à choisir Orvantis-2 plutôt que Caphorn-3?	92 €	182 €	155 €
Ecart type du rendement Caphorn-3 / Orvantis-2	13.2 / 15.2	10.7 / 12.6	12.7 / 14.0

Le tableau 1 permet d'approcher les risques économiques attachés au choix de l'une ou l'autre des combinaisons Caphorn ITK3 ou Orvantis ITK2 du réseau 2 : sur les années 2004 à 2006, la conduite intégrée associée à Caphorn a permis, aux prix de campagne, non seulement un gain moyen, mais aussi des pertes moindres dans les situations où il aurait fallu choisir l'autre combinaison. Contrairement à une idée répandue, la stratégie d'assurance n'est pas la plus intensive !

Quels impacts environnementaux des combinaisons variété – conduite ?

Evaluation environnementale

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

Pour caractériser les conduites du point de vue de l'emploi des produits phytosanitaires, nous avons retenu 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 de croissance) effectués sur la parcelle :

$IFT = \text{Somme des « IFT produit » avec :}$

$IFT \text{ Produit} = \text{dose appliquée par ha} / \text{dose homologuée par ha}$

Cet indicateur a été calculé sur l'ensemble des essais pour les applications de produits phytosanitaires, 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.

Concernant les risques de pertes azotées, et bien qu'il soit plutôt réservé par le CORPEN à l'évaluation des risques de pertes à l'échelle de l'exploitation, nous avons utilisé le solde du bilan azoté (Bilan N en kg par ha), calculé selon la formule suivante :

$Bilan\ N = N_{abs} - D_n$ avec :

N_{abs} : Quantité d'azote absorbée par le peuplement (kg/ha)

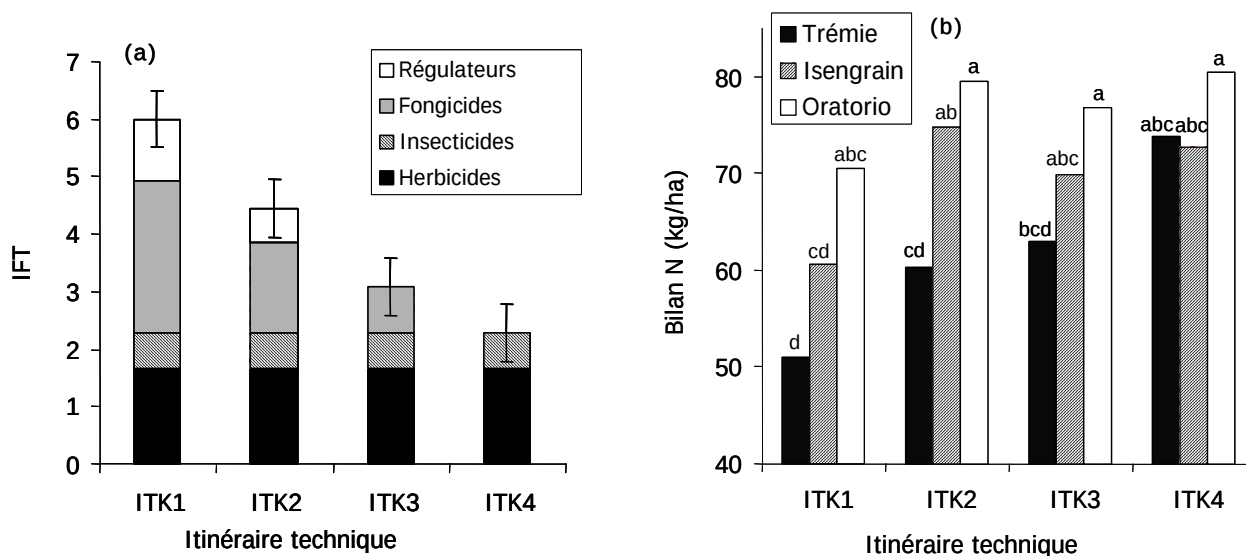
D_n : Dose d'engrais azoté apporté (kg/ha)

Plus la valeur prise par ce solde du bilan est élevée, plus les risques de pertes d'azote dans l'environnement sont faibles.

Nous ne présentons ici que les résultats du réseau 1. Comme attendu, du fait d'une utilisation moindre de produits fongicides, une réduction significative de l'IFT est observée entre l'ITK1 et l'ITK4 ($p < 0.0001$) (Figure 6a). La diminution est de 31% entre l'ITK2 et l'ITK3 et de 49% entre l'ITK2 et l'ITK4. Notons que la valeur prise par l'ITK2 est comparable à celle des pratiques agricoles pour le blé en France en 2001 (à savoir un IFT de 4.3, d'après Champeaux, 2006).

Sur le réseau expérimental 2003-2007, la diminution de l'IFT entre l'ITK2 et l'ITK3 varie de 1.2 à 1.6 en fonction des années (MEEDDAT, 2009). Globalement sur la période 2004-2007, la diminution moyenne de l'IFT sur le réseau est de 1.4, soit 38%.

Figure 5 : Valeurs d'IFT (a) et de bilan azoté (b) selon les conduites et le choix variétal (réseau 1)



Le bilan azoté est significativement plus faible pour l'ITK1 par rapport aux autres itinéraires techniques ($p=0.0001$), ce qui se traduit par un risque de pertes azotées dans l'environnement plus important (Figure 6b). De plus, Oratorio obtient de plus fortes valeurs qu'Isengrain, lui-même ayant des valeurs de bilan plus fortes que Trémie ($p<0.0001$). Ainsi, comme aucune interaction n'est observée entre le choix variétal et l'itinéraire technique ($p=0.26$), Oratorio en ITK4, ITK3 et ITK2 obtiennent les valeurs de bilan les plus fortes (risque faible) et Trémie en ITK1 les plus faibles (risque fort). Bouchard et al (2008) constataient un écart de 16 kg N ha⁻¹ entre ITK2 et ITK3 dans le réseau 2 (sur la période 2003-2006), soit un écart en faveur de l'ITK3 plus marqué que celui constaté ici.

Evaluation énergétique

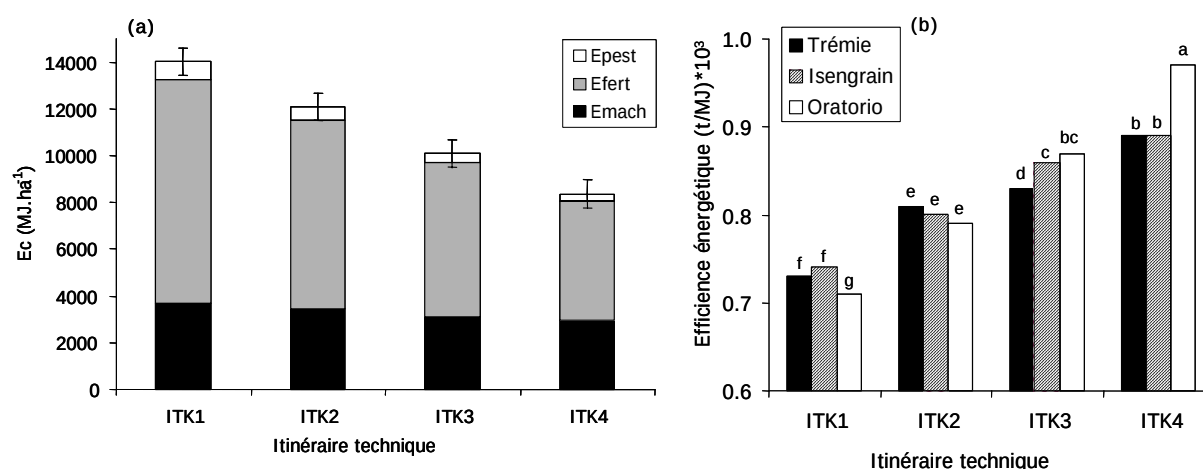
Nous avons estimé les dépenses énergétiques (E_c), exprimée en MJ/ha, à partir du calcul des consommations d'énergie, directes (carburant) et indirectes (dues à la production des engrais et des pesticides) (Pervanchon, 2002). E_c résulte ainsi de la somme de trois postes de consommation :

- le carburant : E_{mach} est la somme des consommations de tous les matériels agricoles utilisés sur la parcelle (Bockstaller, 2004). Pour le calcul de E_{mach} , 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%) : E_{fert} est 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 : E_{pest} .

Nous avons également calculé une efficacité énergétique E_e (exprimé en tonne par MJ) en divisant le rendement en grain de chaque combinaison « variété x ITK » par E_c .

Comme précédemment, seuls les résultats du réseau 1 sont présentés ici. Les dépenses énergétiques E_c diminuent de l'ITK1 à l'ITK4 (Figure 7a). La forte contribution de l'énergie indirecte utilisée pour produire l'engrais azoté (68.3 % des dépenses en ITK1, 66.8 % en ITK2, 65.4% en ITK3 et 61.2 % en ITK4) explique les différences constatées entre itinéraires techniques. Cette hiérarchie entre les différents postes de consommations est proche de celle signalée par Pervanchon et al. (2002) et Bouchard et al. (2008).

Figure 7 : Valeurs de dépenses énergétiques (a) et d'efficacité énergétique (b) selon la conduite et le choix variétal (réseau 1)



L'efficacité énergétique augmente entre l'ITK1 et l'ITK4 ($p<0.0001$). Un effet de la variété est constaté ($p=0.0002$) ainsi qu'une interaction entre la conduite et la variété ($p<0.0001$). En conséquence, la meilleure efficacité énergétique est obtenue par Oratorio en ITK4 la moins bonne par Oratorio en ITK1

(Figure 7b). La même hiérarchie entre conduites (ITK2 et ITK3) a été obtenue sur le réseau 2 (Bouchard et al, 2008).

Discussion et conclusion

Une forte interaction variété-itinéraire technique

Les réseaux expérimentaux dont nous venons de présenter les résultats permettent de faire converger deux types d'innovations : les variétés rustiques, multirésistantes à la verse et aux maladies et les itinéraires techniques à niveaux d'intrants réduits, construits autour de choix techniques visant dès le semis à prévenir verse et maladies. Les travaux antérieurs avaient mis en évidence les règles de base de l'adaptation des itinéraires techniques à l'objectif de rendement (Meynard, 1985, 1991 ; Loyce 1997, Loyce et al 2002 ; Faloya et al, 2002) et l'importance de gérer de manière cohérente date et densité de semis, fertilisation azotée, et applications de régulateurs de croissance et de fongicides. Les résultats présentés dans cet article donnent les bases d'une intégration du choix variétal dans la cohérence des itinéraires techniques. La mise en évidence d'une interaction forte entre variété et itinéraire technique, tant sur le rendement, que sur les marges économiques (et ce quel que soit le niveau de prix du blé ou de l'énergie) est le premier résultat majeur de ces réseaux. Cette interaction a plusieurs conséquences :

- Il apparaît d'abord que, pour une très large gamme de prix du blé et de l'énergie, l'itinéraire technique le plus performant au plan économique n'est pas le même pour les variétés productives, qui dominent encore le marché⁴, et pour les variétés rustiques. Ceci renvoie à la fois au conseil technique (quel itinéraire technique recommander pour quelle variété ? quelle variété préconiser pour quel itinéraire technique ?) et à l'évaluation variétale (quel itinéraire technique mettre en œuvre dans les expérimentations de comparaison de variétés ?). De ce dernier point de vue, il apparaît clairement que, contrairement à ce qui est parfois avancé, le classement des variétés en conduite intensive ne permet pas de prédire aisément leur classement en conduite à bas niveau d'intrants. Une réflexion sur les modalités d'expérimentation favorables à l'expression des géotypes rustiques, tant en phase de sélection que d'inscription, est sans aucun doute indispensable (Meynard et Jeuffroy, 2006). Le CTPS vient de l'entreprendre.
- La mise en évidence d'une synergie entre les deux innovations, variétés rustiques et itinéraires intrants réduits est un résultat important : chacune des innovations accroît la crédibilité de l'autre, et ses chances d'adoption. D'une manière générale, les solutions techniques alternatives aux pesticides sont individuellement moins efficaces que les traitements phytosanitaires et ne prennent leur pleine valeur qu'associées (Meynard et al, 2003). Ici, c'est bien la conjonction de différentes mesures préventives à effet partiel, telles que les résistances variétales, la réduction de la densité de plantes ou celle de la fertilisation azotée précoce qui permettent de maîtriser les maladies avec peu (voire pas) de traitement fongicide, aussi bien qu'avec une protection « complète » dans un itinéraire technique intensif. On notera que, du fait de ces techniques préventives, la désintensification n'est pas ici associée à un accroissement des risques : la combinaison Oratorio-ITK3 n'obtient pas, quels que soient les prix du blé ou du pétrole, une marge brute plus variable qu'Isengrain ITK2 ; on a vu qu'un comportement analogue était observé pour Caphorn ITK3, comparé à Orvantis ITK2. Ces résultats sont convergents avec ceux obtenus sur d'autres réseaux par Meynard (1985), Limaux et Meynard (1992) ou Saulas et Meynard (1998), qui montraient déjà que la réduction des intrants, dans des itinéraires techniques conçus en conséquence n'entraîne pas un accroissement de la variabilité du rendement.

L'ampleur de cette interaction variété – conduite de culture nous interpelle : l'Agriculture Biologique (AB) pouvant être considérée comme un pôle extrême dans la réduction des intrants, peut-on faire l'hypothèse que les variétés disponibles sont adaptées à ses conditions spécifiques ? De fait, la

⁴ Même si la surface emblavée en variétés rustiques s'est considérablement accrue depuis le début de cette étude.

sélection variétale s'est faite depuis 30 ans dans le cadre d'itinéraires techniques intensifs, pour lesquels la nutrition azotée est rarement limitante, et où on lutte contre les adventices avec des herbicides. On observe que les blés tendres modernes sont très courts, donc peu compétitifs vis-à-vis des mauvaises herbes, et qu'ils sont fortement affectés par des faibles disponibilités en azote, ce qui constitue des handicaps en AB. Le groupe « Céréales à paille » du département « Génétique et Amélioration des Plantes » de l'INRA étudie depuis quelques années l'adaptation des variétés rustiques et des lignées avancées de blé tendre d'hiver à l'Agriculture Biologique. Pour valoriser le progrès génétique effectivement réalisé par le passé sur le rendement (Brancourt et al., 2003), le matériel végétal évalué est constitué de lignées pures issues de travaux contemporains de sélection végétale et non pas de populations de pays et de variétés anciennes. Ces travaux expérimentaux sont motivés à la fois (i) par la préoccupation de repérer les variétés intéressantes en AB et (ii) par l'identification des critères spécifiques liées aux contraintes particulières à ce mode de production. Depuis 2002-2003, entre 25 et 30 variétés sont comparées chaque année dans trois régions (Bretagne, Poitou et Ile de France) à la fois en Agriculture Biologique (sur des parcelles certifiées AB), et en conduite à bas niveau d'intrants (identique à l'ITK4 du réseau faisant l'objet de cet article) sur les stations expérimentales INRA. L'évaluation porte sur les critères classiques (sensibilité aux maladies, rendement et teneur en protéines) mais également sur des caractères plus spécifiques comme le pouvoir couvrant et l'aptitude à la panification avec de basses teneurs en protéines (Rolland et Oury, 2008). Après huit campagnes d'expérimentation, la réflexion collective porte sur le choix de l'environnement de sélection le plus approprié pour la prise en compte des contraintes de l'AB (Przystalski et al., 2008). Plutôt que vers une sélection spécifique dédiée complètement à l'AB, l'équipe de recherche s'oriente vers une sélection pour des conduites à bas niveau d'intrants, intégrant les critères spécifiques à l'AB, avec la mise en place d'expérimentations en AB à partir de la F7.

Le coût des derniers quintaux

Dans un contexte de ressources finies, avec la fin du pétrole bon marché et la montée en puissance d'un rejet de l'usage massif de produits phytosanitaires, l'enjeu est de produire mieux, avec moins d'intrants polluants et moins d'utilisation d'énergie fossile. L'évaluation des performances des variétés et des itinéraires techniques associés devient nécessairement multicritère: (i) rendement (q/ha) ; (ii) qualité des grains ; (iii) résultat économique (marge/ha, efficacité des intrants, etc.) ; (iv) indicateurs de risques de pollutions (IFT, bilan d'azote, etc.) ; (v) bilan énergétique ; (vi) bilan sanitaire (mycotoxines, résidus de pesticides dans les produits récoltés)... La question du poids à accorder à chacun des critères reste cependant ouverte : la priorité est différente selon les acteurs et aucune solution de compromis ne s'impose d'évidence. Certains affirment que l'on doit donner une priorité absolue au rendement, en référence aux besoins cumulés de la production de biocarburants et de la production d'aliments pour une population mondiale en forte croissance. D'autres considèrent qu'il est prioritaire de donner un coup d'arrêt aux dégradations de l'environnement liées à l'agriculture intensive, quitte à réduire la production et les exportations françaises et européennes. Les résultats obtenus sur nos réseaux permettent d'alimenter ce débat, en apportant des éléments de quantification sur le coût, environnemental et économique, des derniers quintaux.

Entre Isengrain-ITK2 et Oratorio-ITK3 (les deux combinaisons qui obtiennent des résultats économiques satisfaisants, sous des hypothèses de prix très contrastées), le différentiel de rendement est de 0.7 t/ha. Pour un prix du blé inférieur à 135 €/t, (155 €/t sous l'hypothèse d'une énergie chère), cet écart est compensé par la baisse des charges. En dessous de ces prix, donc, les derniers quintaux coûtent à l'agriculteur une partie de son revenu. Quel que soit le prix du blé, ils coûtent également 1.4 traitements supplémentaires, et 2000 MJ d'énergie fossile par hectare. La question est bien de savoir si, pour la société, ce gain de 7 q.ha⁻¹ vaut les risques environnementaux engendrés par ces traitements supplémentaires et cette consommation d'énergie. De même, on peut se demander si les presque 15 q/ha supplémentaires qu'on obtient avec Isengrain-ITK1 (la combinaison la plus productive), par rapport

à Oratorio-ITK3 valent 3 points d'IFT, 20 kg/ha d'azote susceptible de polluer l'eau et l'air, et 4000 MJ/ha d'énergie fossile. Si l'on peut travailler à relever le défi d'une « intensification écologique » qui permettrait de concilier productivité maximale et maîtrise des nuisances environnementales, si nous avons un devoir d'améliorer variétés et systèmes de culture pour aller dans ce sens, il faut se rendre à l'évidence : en l'état actuel des connaissances, la réduction des risques environnementaux, au-delà de ce que permettent les conseils standards d'ajustement des intrants à la diversité du milieu (agriculture raisonnée), implique l'acceptation d'une légère baisse de productivité. Notons cependant que cette baisse pourrait n'être que temporaire, et être sans doute compensée en quelques années par la sélection variétale : les résultats les plus récents, acquis sur les variétés dernièrement inscrites, permettent d'envisager une nouvelle progression du potentiel de rendement atteignable en conduites à coûts réduits.

La diffusion des combinaisons innovantes « variété-conduite de culture »

Dans le cadre du développement de systèmes de production intégrée en grande culture, les combinaisons « variété multirésistante aux maladies x itinéraire technique 3 » sont actuellement diffusées et adoptées par un nombre croissant d'agriculteurs. Mischler et al. (2009) montrent en Picardie que, parmi les techniques contribuant à la production intégrée, les itinéraires techniques du blé ont plusieurs vertus :

- leurs modalités de mise en œuvre sont bien connues (Faloya, 2002) : les références pour le choix des variétés, l'ajustement des doses de semis, le calcul des doses d'engrais, les dates d'apport d'azote, le déclenchement des traitements fongicides (en fonction d'un seuil de présence), sont parfaitement établies à la suite des nombreux travaux qui ont suivi ceux de Meynard (1985). Le déclenchement de la fertilisation azotée précoce lors du jaunissement des « bandes double densité », tel que préconisé par la « méthode Limaux » (Limaux et al., 2001) a permis de retarder de 10 jours en moyenne la date du premier apport d'azote, réduisant ainsi les pertes gazeuses d'azote, et accroissant l'intérêt environnemental des itinéraires techniques.
- Leur effet est rapidement évaluable par les agriculteurs, et le risque perçu plus faible. A l'opposé, l'appropriation des techniques de gestion intégrée des adventices (avec réduction de l'usage des herbicides) est plus lente, sans doute du fait du manque d'outils d'aide à la décision, mais aussi en raison de la crainte des agriculteurs qu'une maîtrise insuffisante des adventices une année donnée ne les contraigne à devoir gérer des parcelles très infestées pendant plusieurs années.
- Leur mise en œuvre est perçue comme génératrice de temps disponible par les agriculteurs, car moins de passages de pulvérisateur ou d'épandeur sont nécessaires.

Dans les études d'exploitations en transition vers la production intégrée conduites par Mischler et al. (op. cit.), trois campagnes culturales ont suffi à assurer l'appropriation et la généralisation des combinaisons « variétés rustiques –itinéraires bas intrants ». Ces combinaisons variété-ITK peuvent donc être vues comme une première étape de l'apprentissage de la production intégrée. Mischler et al. (op cit) relèvent que l'impasse sur l'application du régulateur de croissance est un indicateur très significatif de la construction d'une confiance dans les démarches préventives.

Lamine et al. (2009) soulignent l'importance, dans cette transition vers la production intégrée, d'un apprentissage collectif au sein de groupes d'agriculteurs : « *La participation à un groupe (en l'occurrence, dans les cas étudiés en système céréalier, un collectif d'agriculteurs accompagné par un conseiller) permet aux producteurs (...) de se situer les uns par rapport aux autres, de profiter de l'expérience des autres, de parler de leurs impasses techniques et de rechercher des solutions. Elle leur permet également de se construire une reconnaissance professionnelle collective contre l'adversité - ou une réassurance entre pairs - puisque leur entourage professionnel, que ce soit dans le voisinage ou dans les réseaux syndicaux et professionnels, reste majoritairement sceptique.* ». Ces auteurs

soulignent aussi que les dynamiques collectives rendent la transition vers la production intégrée plus robuste et moins réversible, en particulier dans un contexte de hausse des prix des céréales.

Ainsi, malgré un contexte socio-technique *a priori* peu propice (peu de semences de variétés multirésistantes disponibles au début des années 2000, un conseil technique dominé par les entreprises commercialisant les intrants, un message de la filière privilégiant l'accroissement de la productivité ; voir Vanlockeren et Baret 2007), les combinaisons « variété rustique - ITK bas intrants » suscitent depuis plusieurs années un intérêt croissant. Les sélectionneurs ont largement intégré dans leurs programmes la nécessité de fournir des variétés multi-résistantes aux maladies, riches en protéines, et régulières dans des milieux divers, y compris des milieux où l'alimentation azotée est parfois limitante. Le développement des surfaces en variétés « rustiques », depuis le milieu des années 2000, est indéniable ; la voie est ouverte à une réduction volontariste des intrants, permettant de valoriser pleinement leurs qualités intrinsèques et limiter les nuisances environnementales : Le Grenelle de l'environnement et les lois qui l'ont suivi nous y invitent. Il est clair cependant que la diffusion à grande échelle de ces systèmes supposera une coordination au niveau des territoires sur les choix variétaux, pour sauvegarder, plus qu'on n'a réussi à le faire jusqu'ici, l'efficacité des résistances variétales sur le long terme.

Remerciements

Les auteurs remercient les très nombreux contributeurs de ce projet, et tout particulièrement les animateurs et expérimentateurs et des différents réseaux évoqués dans l'article. Nous remercions en particulier les participants du GIE Club 5 (P. Benoist, P. Senellart, O. Leblanc, J.-P. Hardouin, J.-P. Monnier, M. Méausonne, T. Demarquet, B. Duperrier, P. Niquet et H. Haslé), des unités expérimentales et de recherches des Départements Génétique et Amélioration des Plantes, Environnement et Agronomie et SAE2 de l'INRA (P. Bataillon, J.-M. Berceron, C. Bouchard, X. Charrier, B. Debote, O. Gardet, L. Guindé, S. Gilles, E. Heumez, M. Leleu, P. Mangin, J.-Y. Morlais, F.-X. Oury, P. Walczak), des Chambres d'Agriculture de Bretagne (J.-P. Arzul, R. Blondel, P. Cotinet, L. Leroux, J. de Rouvre, J.-P. Turlin) de Pays de Loire (D. Du Clary, S. Hanquez, I. Pambou, B. Piveteau, T. Restif, P. Rigaud, G. Turpeau) de Poitou-Charentes (O. Guérin, P. Boucheny, F. Dupont, M. Laurent, N. Métayer, F. Patrier, A. Triniol, J. Tutard, J. Vincent) de Normandie (B. Omon, N. Leven, M. Gérard ; Ile de France : E. Bizot, D. Bousseau, D. Eymard, S. Piaud) du Centre (B. Chevalier, L. Lejars, L. Simon), de Champagne (D. Justeau, J.-C. Guichaoua) de Bourgogne (J. Brunet) et des stations Arvalis-institut du végétal (M.H. Bernicot, M. Bonnefoy, B. Delsuc, Y. Chabanel).

Références bibliographiques

- Alvarez T., Frampton G.K., Goulson D., 2001. Epigeic collembola in winter wheat under organic, integrated and conventional farm management regimes. *Agriculture, ecosystems and environment* 83, 95-110.
- Angevin F., Klein E.K., Choimet C., Gauffreteau A., Lavigne C., Messéan A., Meynard J.M., 2008. Modelling impacts of cropping systems and climate on maize cross-pollination in agricultural landscapes: the MAPOD model. *European Journal of Agronomy* 28, 471-484.
- Anonyme, 2009. Répartition variétale des céréales biologiques. FranceAgriMer, 4 p.
- 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.

- Bohanec M., Messéan A., Scatasta S., Angevin F., Griffiths B., Henning Krogh P., Znidarsic M., Dzeroski S., 2008. A qualitative multi-attribute model for economic and ecological assessment of genetically modified crop. *Ecological Modelling* 215, 247-261.
- Borin M., Giupponi C., Morari F., 1997. Effects of four cultivation systems for maize on nitrogen leaching. I. Field experiment. *European Journal of Agronomy* 6, 101-112.
- Bouchard C., Bernicot M.H., Félix I., Guérin O., Loyce C., Omon B., Rolland B., 2008. Associer des itinéraires techniques de niveau d'intrants variés à des variétés rustiques de blé tendre: évaluation économique, environnementale et énergétique. *Le courrier de l'environnement de l'INRA* 55, 53-77.
- Brancourt-Hulmel M., Doussinault G., Lecomte C., Bérard P., Le Buanec B., Trottet M., 2003. Genetic improvement of agronomic traits of winter wheat cultivars released in France from 1946 to 1992. *Crop Science* 43, 37-45.
- Brown J.K.M., 2002. Yield penalties of disease resistance in crops. *Current Opinion in Plant Biology* 5, 6 p.
- Champeaux C., 2006. Recours à l'utilisation de pesticides en grandes cultures. Evolution de l'Indicateur de Fréquence de Traitements au travers des enquêtes "pratiques culturales" du SCEES entre 1994 et 2001. INRA, Ministère de l'Agriculture et de la Pêche.
- Colbach N., Fargue A., Sausse C., Angevin F., 2005. Evaluation and use of a spatial-temporel model of cropping system effects on gene escape from transgenic oilseed rape varieties. Example of the GeneSys model applied to three co-existing herbicide tolerance transgenes. *European Journal of Agronomy* 22, 417 - 440.
- 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.
- Cortet J., Griffiths B.S., Bohanec M., Demsar D., Andersen M.N., Caul S., Birch A.N.E., Pernin C., Tabone E., de Vaufléury A., Ke X., Henning Krogh P., 2007. Evaluation of effects of transgenic Bt maize on microarthropods in an European multi-site experiment. *Pedobiologia* 51, 207-218.
- 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.
- Dejoux J.F., Meynard J.M., Reau R., Roche R., Saulas, P., 2003. Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agronomie* 23, 725-736.
- Doussinault G., Sanchez-Monge R., Delibes A., Garcia-Olmedo F., 1983. Transfer of a dominant gene for resistance to eyespot disease from wild grass to hexaploid wheat. *Nature* 303, 698-700.
- Doussinault G., Jaudeau B., Jahier J., 2001. Évolution de la variabilité génétique chez le blé. In : S. Le Perchec, P. Guy, A. Fraval (Eds.), *Agriculture et biodiversité des plantes. Dossiers de l'environnement de l'INRA*, 21, 91-104.
- 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.
- Hochereau F., 2008. Du productivisme à l'agriculture durable. In : C. Bonneuil, G. Denis, J.L. Mayaud, (Eds.), *Sciences, chercheurs et agriculture. Pour une histoire de la recherche agronomique*. L'Harmattan.
- Huet P., 1986. Influence du système de culture sur le piétin-verse du blé. In : *Les rotations céréalières intensives : dix années d'études concertées*, INRA, Paris, pp. 95-111.
- Leitch M. H., Jenkins P. D., 1995. Influence of nitrogen on the development of Septoria epidemics in winter wheat. *Journal of Agricultural Science, Cambridge* 124, 361-368.
- Leleu M., Lenne N., Maurice A., Le Gouis J., Heumez E., Brancourt-Hulmel M., Pluchard P., 2000. Des intrants en moins pour des marges en plus. *Cultivar* 484, 10-13.

- Lamine C., Meynard J.M., Perrot N., Bellon S., 2009. Analyse des formes de transition vers des agricultures plus écologiques : les cas de l'Agriculture Biologique et de la Protection intégrée. *Innovations agronomiques* 4, 483-493. http://www.inra.fr/ciag/revue_innovations_agronomiques/volume_4_janvier_2009.
- Limaux F., Meynard J.M., 1992. Céréaliculture : La désintensification d'ores et déjà rentable. *Aménagement et Nature* 105, 16-19
- 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.
- Lonnet P., 1997. Les résistances variétales chez le blé. *Compte-rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 83, 37-50.
- 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., 1998. Mise au point d'itinéraires techniques pour un cahier des charges multicritère: le cas de la production de blé éthanol en Champagne crayeuse. Thèse de Docteur de l'INA P-G, 198 p.
- 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., Meynard J. M., Bouchard C., Rolland B., Lonnet P., Bataillon P., Bernicot M. H., Bonnefoy M., Charrier X., Debote B., Demarquet T., Duperrier B., Félix I., Heddadj D., Leblanc O., Leleu M., Mangin P., Méausoone M., Doussinault G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27, 1131-1142.
- Loyce C., Rellier J.P., Meynard J.M., 2002. Management planning for winter wheat with multiple objectives (2): ethanol-wheat production. *Agricultural Systems* 72, 33-57.
- MEEDDAT, 2009. Ecophyto R&D. Vers des systèmes de culture économes en produits phytosanitaires. Volet 1. Tome II: Analyse comparative de différents systèmes en grandes cultures, 218 p.
- Meynard, J.M., 1985. Construction d'itinéraires techniques pour la culture du blé d'hiver," Thèse INA P-G, Paris, 258 p.
- Meynard J.M., Girardin P., 1991. Produire autrement. *Courrier de la cellule Environnement de L'INRA*, 15,1-19.
- Meynard J.M., 1991. Pesticides et itinéraires techniques. In : P. Bye, C. Descoins A. Deshayes (Eds.), *Phytosanitaire, Protection des plantes, Biopesticides*, INRA, Paris. pp. 85-100.
- Meynard J.M., Doré T., Lucas P., 2003. Agronomic approach: cropping systems and plant diseases. *Compte Rendu Académie des Sciences. Biologies*. 326, 37-46.
- Meynard J.M., Jeuffroy M.H., 2006. Quel progrès génétique pour une agriculture durable ? In : P. Gasselin et O. Clément (Eds.), *Quelles variétés et semences pour des agricultures paysannes durables ? Dossier de l'environnement* 30, 15-25.
- Mistou M.N., 2001. Appréciation de la résistance aux maladies des variétés de blé tendre d'hiver. Les essais du CTPS. *Perspectives Agricoles* 268, 46-49.
- Mischler P., Lheureux S., Dumoulin F., Menu P., Sene O., Hopquin J.P., Cariolle M., Reau R., Munier-Jolain N., Faloya V., Boizard H., Meynard J.M., 2009 En Picardie, 8 fermes de grande culture engagées en Production Intégrée réduisent fortement les pesticides sans baisse de marge. *Le Courrier de l'Environnement de l'INRA* (sous presse).
- Mundt C.C., Brophy L.S., Schmitt M.S., 1995. Choosing crop cultivars and cultivar mixtures under low versus high disease pressure: a case study with wheat. *Crop Protection* 14, 509-515.
- 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.
- 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.
- Pope de Vallavieille C., Belhad Fraj M., Mille B., Meynard J.M., 2006. Les associations de variétés : accroître la biodiversité pour mieux maîtriser les maladies. *Dossiers de l'Environnement de l'INRA*, 30, 101-109
- Przystalski M., Thiemt E., Rolland B., Ericson L., Osman A., Østergård H., Levy L., Wolfe M., Büchse A., Piepho H.-P., Krajewski P., 2008. Comparing the performance of cereal varieties in organic and non-organic cropping systems in different European countries. *Euphytica* 163, 417-434.
- Ricroch A., Bergé J. B., Messéan A., 2009. Revue bibliographique sur la dispersion des transgènes à partir du maïs génétiquement modifié. *C.R Biologies* (in press).
- 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, 47-62.
- Rolland B., Oury F.X., 2008. Sélection de variétés (lignées pures) rustiques de blé tendre adaptées à l'agriculture biologique : contribution du programme INRA d'innovation variétale. Colloque ITAB, Techniques de sélection végétale, compatibilité avec l'AB et perspectives. 51-55.
- 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* 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*. *J. Phytopathology* 151, 283-289.
- Tamis W.L.M., van den Brink W.J., 1999. Conventional, integrated and organic winter wheat production in the Netherlands in the period 1993-1997. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 76, 47-59.
- 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. 2007. Why are ecological, low input, multiresistant wheat cultivar slow develop commercialy? A Belgian agricultural 'lock in' case study. *Ecol. Economics*, 66, 436-446.
- Vereijken P., 1989. Experimental systems of integrated and organic wheat production. *Agricultural systems* 30, 187-197.
- Verjux N., 1997. Maladies foliaires du blé. L'incidence des techniques culturales? *Perspectives Agricoles* 220, 86-91.
- Wagoire W.W., Stolen O., Hill J., Ortiz R., 1998. Is there a 'cost' for wheat cultivars with genes for resistance to yellow rust caused by *Puccinia striiformis*? *Crop Protection* 17, 337-340.