



The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.

Simulation des seuils de rentabilité économique de techniques d'application localisée des pesticides

Economic profitability of site-specific pesticide management

Odile Bourgain et Jean-Marc Llorens



Édition électronique

URL : <http://journals.openedition.org/economierurale/3793>

DOI : 10.4000/economierurale.3793

ISSN : 2105-2581

Éditeur

Société Française d'Économie Rurale (SFER)

Édition imprimée

Date de publication : 15 février 2013

Pagination : 51-67

ISSN : 0013-0559

Référence électronique

Odile Bourgain et Jean-Marc Llorens, « Simulation des seuils de rentabilité économique de techniques d'application localisée des pesticides », *Économie rurale* [En ligne], 333 | janvier-février 2013, mis en ligne le 15 février 2015, consulté le 19 avril 2019. URL : <http://journals.openedition.org/economierurale/3793> ; DOI : 10.4000/economierurale.3793

Ce document a été généré automatiquement le 19 avril 2019.

© Tous droits réservés

Simulation des seuils de rentabilité économique de techniques d'application localisée des pesticides

Economic profitability of site-specific pesticide management

Odile Bourgain et Jean-Marc Llorens

Ce travail a été réalisé au sein de l'Institut for Material Research de l'Université de Rouen dans le cadre de la collaboration avec l'association Agrinovatech pour le projet Futuramax soutenu par la Région Haute-Normandie. Il n'aurait pu se réaliser sans les essais expérimentaux aux champs réalisés par le GRCETA de l'Evreucin et Défisol27. Nous remercions tout d'abord les conseillers du GRCETA Vincent Debandt et David Mahieu pour leurs remarques et leur avis d'expert du conseil en agronomie. Ensuite, nous remercions Maxime Bécu et Charles Duval de Défisol27 pour les données techniques de description des sols et des systèmes de culture nécessaires à la pertinence de cette recherche.

- ¹ L'agriculture moderne nécessite des critères de décision à différentes échelles de territoire pour relever les deux grands défis actuels de nos systèmes de production agricole que sont le maintien de la productivité et le respect de l'environnement. La modulation des intrants à l'échelle intraparcellaire peut concilier ces deux défis, notamment pour les engrais (Llorens *et al.*, 2010). Elle peut être utilisée pour de nombreuses actions techniques appliquées aux cultures : gestion des doses de semences, de l'irrigation ou des pesticides. Cependant dans la plupart des cas l'intérêt agro-environnemental se heurte à la rentabilité économique (Atherton *et al.*, 1999) ou à des freins socio-économiques (Robert, 2002).

Un contexte politique volontariste

- 2 Le contexte politique est favorable pour la réduction des pesticides (Grenelle de l'environnement, 2007a, 2007b, 2007c). La Directive cadre sur l'eau (journal officiel des communautés européennes, 2000), quant à elle, vise un bon état écologique pour 2/3 des masses d'eau de surface pour 2015 (article 4, JOCE, 2000) et les produits biocides et phytopharmaceutiques sont cités dans la liste indicative des principaux polluants (annexe VIII, JOCE, 2000). Il en découle, des mesures volontaristes qui préconisent de réduire de façon drastique toutes les pollutions diffuses et en particulier celles liées aux produits phytosanitaires. Pour certains produits, une interdiction pure et simple est envisagée et pour d'autres une réduction de 50 % de leur utilisation à moyen terme. Il a été proposé de développer une politique ambitieuse de substitution et d'innovation (Grenelle de l'environnement, 2007b). C'est dans cette optique que ce travail a été réalisé sur les applications potentielles de l'agriculture de précision pour réduire les fongicides sur céréales. Il s'inscrit dans l'axe 3.4 du plan Ecophyto 2018, visant à développer la recherche sur le matériel agricole et les techniques d'application permettant une réduction de l'usage des pesticides. Dans ce contexte volontariste de diminution des doses de pesticides, il est important de pouvoir évaluer la rentabilité économique de ces technologies nouvelles.

Le potentiel d'impact d'une technique innovante telle que l'agriculture de précision

- 3 La méthode d'application localisée des intrants est plus qu'une simple technologie. Elle permet d'augmenter la pertinence des critères de décisions pour le conseil en agronomie (Swinton et Lowenberg-DeBoer, 1998) ou sur des considérations environnementales (Melakeberhan et Avendano, 2008). L'agriculture de précision permet, en théorie, d'apporter la dose de pesticide nécessaire en fonction du potentiel du sol. Le critère agronomique de décision de traitement est la densité de plantes qui conditionne le risque de développement des maladies. La réduction des doses appliquées par unité de surface par un meilleur ciblage de l'application est une des solutions préconisées par l'INRA pour réduire l'impact des produits phytosanitaires (Aubertot *et al.*, 2005). Cependant, la plupart du temps, ces résultats techniques sont évalués partiellement du point de vue économique. Ils se limitent au gain que représentait la diminution des quantités d'intrant ou aux marges brutes. De plus, ces expérimentations ont porté sur des cultures spécifiques, blé le plus souvent, (Duval *et al.*, 2007), ou maïs (Koch *et al.*, 2004) et/ou un type d'intrant tel que l'azote en général (Dailey *et al.*, 2006 ; De Vuyst et Halvorson, *op. cit.* ; Koch *et al.*, *op. cit.* ; Link *et al.*, 2006 ; Lobell, 2007). Ainsi, compte tenu de la complexité de la tâche, peu de travaux se sont attachés à décrire les systèmes d'exploitation dans leur globalité (Sartori *et al.*, 2005) et à évaluer la rentabilité globale des techniques de modulation des engrais (Haefele et Wopereis, 2005).
- 4 Ainsi, il nous a paru important, dans ce travail, d'avoir cette vision globale pour évaluer au mieux l'efficacité économique de telles techniques. En effet, compte tenu du coût d'acquisition de l'information et du surcoût du matériel utilisé il nous paraît plus pertinent d'évaluer la rentabilité de cette technologie à l'échelle du système de culture.

Approche économique choisie pour évaluer la rentabilité

- 5 Pour répondre à la demande des acteurs de terrain moteurs dans le domaine de l'agriculture de précision en Haute-Normandie (Défisol27), nous avons choisi de modéliser l'exploitation agricole comme une unité microéconomique (Laurent *et al.*, 2003). Notre objectif est de trouver la combinaison optimale des facteurs de production afin de maximiser la rentabilité de la modulation des fongicides sur l'ensemble des surfaces en céréales. L'intérêt est de modéliser et de simuler à l'aide d'un logiciel délié « Olympe »¹ (Attonaty *et al.*, 2005 ; Penot et Deheuvels, 2007 ; Novak, 2008) des données connues standards (BCMA, 2008 ; CER France, 2009) ou émanant d'essais de longues durées sur des exploitation réelles (Défisol27, communication personnelle) ou de référentiels régionaux fondés sur le suivi de fermes de références (ROSACE, 2003). Le but final étant de donner un caractère économique opérationnel aux conditions de mise en place de l'agriculture de précision en Haute-Normandie (Novak, *op. cit.* ; Laurent *et al.*, *op. cit.*). Cette approche économique est complémentaire de travaux de modélisation de portée plus générale (Novak, *op. cit.*) quantifiant les fluctuations du rendement en fonction de la variabilité spatiale et/ou climatique (Bullock et Lowenburg-DeBoer, *op. cit.*) ou évaluant la prise de risque et/ou les critères de choix par rapport à l'innovation que constitue l'application des techniques de modulation des intrants (Bullock et Lowenburg-Deboer, *op. cit.* ; Mara *et al.*, 2003 ; Abadi Ghadim *et al.*, 2005).
- 6 Pour cette étude, nous avons appliqué une méthodologie similaire à celle développée tout d'abord pour évaluer la rentabilité de mesures agri-environnementales (Bourgain et Michaud, 2006) puis celle de la rentabilité de la modulation des engrais en grandes cultures (Llorens *et al.*, *op. cit.*). Cette dernière ayant montré que des diminutions de doses étaient compatibles avec le maintien des niveaux de rendements en Haute-Normandie.
- 7 Peu d'agriculteurs utilisent en routine leurs pulvérisateurs pour moduler les doses. Peu de constructeurs proposent dans leurs catalogues des solutions opérationnelles. Il est donc important d'avoir une vision prospective réaliste économiquement pour répondre aux demandes des agriculteurs sur le plan technique et à celles de décideurs politiques et de la société en général sur le plan de la politique environnementale à mener en la matière.
- 8 Ainsi, les deux principaux objectifs de ce travail ont été :
 1. de confirmer la pertinence de la méthodologie et des indicateurs technico-économiques utilisés précédemment pour approcher la rentabilité de l'agriculture de précision appliquée aux apports de fongicides.
 2. de comparer les seuils de rentabilité économique obtenus sur des cas-types d'exploitations agricoles céréalières utilisant ou pas des traitements fongicides de précision. Les simulations étant fondées sur des données qualifiées en adéquation avec les informations économiques régionales de références.

Matériel et méthode

La zone d'étude

- 9 Nous avons choisi la Haute-Normandie comme zone d'étude car nous avons les données technico-économiques nécessaires pour paramétrer notre logiciel de simulation. Nous disposons tout d'abord de cas-types donnant une vision exhaustive des systèmes de production Haut-Normands. Ils sont fondés sur la synthèse de résultats technico-économiques d'un réseau de ferme de référence (ROSACE, *op. cit.*). Ensuite, nous travaillons en relation avec un groupement d'agriculteurs (Défisol27) précurseurs en agriculture de précision. Leurs conseillers agricoles nous ont fourni les données d'essais agronomiques régionaux nous permettant de qualifier les données techniques à entrer dans le simulateur. Enfin, les sols de limons de Haute-Normandie sont caractérisés par des potentiels de rendements moyens élevés. Cependant, cette moyenne cache des variations importantes au sein d'une même parcelle qui justifient l'emploi des techniques d'applications localisées des intrants (Llorens *et al.*, *op. cit.*).

Echelle d'investigation

- 10 Notre échelle d'investigation finale est l'exploitation agricole : les données qualifiées étant paramétrées à l'échelle de la parcelle et agrégées à celle de l'exploitation pour les calculs de rentabilité économique. En effet, le logiciel de simulation économique « Olympe » (Bourgain et Michaud, *op. cit.*) nous permet de travailler à différentes échelles d'information (parcelle, système de cultures et exploitation). Les agriculteurs du GRCEA de l'Evreucin (Groupement régional des centres d'études techniques agricoles) impliqués dans une démarche de développement de l'agriculture de précision dans l'Eure depuis 2003 nous ont fourni des informations technico-économiques d'exploitations réelles pour nous permettre de qualifier les données nous servant aux simulations (Duval *et al.*, *op. cit.* ; Bécu *et al.*, 2010). Nous avons donc collecté des informations concernant les itinéraires techniques de chaque culture et les prix actualisés des intrants nécessaires (Fertil info, 2009). Nous avons utilisé soit, des informations économiques standards représentatives des exploitations de la région (CER France, *op. cit.* ; BCMA, *op. cit.*), soit celles d'exploitations réelles. Les indicateurs économiques choisis sont principalement les coûts de production spécifiques et la marge directe.

Les systèmes céréaliers de Haute-Normandie

- 11 Les trois systèmes de culture décrits dans le *tableau 1* représentent 87 % des exploitations de Haute-Normandie (ROSACE, *op. cit.*) que nous avons retenus pour les simulations, les rotations correspondant aux systèmes céréaliers (40 % des exploitations de la région). En effet, ce sont les seuls pour lesquels nous disposions des données d'hétérogénéité des sols (*tableau 2*). Ils sont définis comme étant sans production de lait avec une surface toujours en herbe limitée (inférieure à 15 % de la surface agricole utile) et un chiffre d'affaires animal inférieur à 15-20 % du total. Dans ces systèmes, les prairies ne sont pas considérées comme faisant partie de la rotation. De même, elles ne sont pas concernées par la modulation des pesticides. Ainsi, les charges qui leur sont appliquées sont les mêmes que l'application soit modulée ou pas. Dans ce travail, parmi cette typologie, nous

avons choisi de simuler les seuils de rentabilité du système céréalier (systèmes de cultures C1a, C2 et C3, *tableau 1*).

Tableau 1. Cas types représentant 87 % des systèmes de cultures en Haute-Normandie

Système	caractéristique dominante	Nb d'UTH	moyenne (ha)	Cas type
Céréalier	Plus de 80 % des terres labourables en céréales- oléoprotéagineux + jachère	1	95 (70-120)	C1a
		2	145 (120-180)	C2
		2	240 (180-350)	C3
betteravier - liniculteur	20 à 2 % des terres labourables en betteraves et lin	1	110 (80-140)	BL1bis
		2	200 (140-350)	BL2bis
Patatier conso	Plus de 10 ha de pommes de terre de consommation (Moyenne 25 ha)	2	150 (plus de 90)	PT

Source : ROSACE, 2003

Méthode de discrimination de la variabilité intraparcellaire des sols

- 12 Les sols de Normandie sont parmi les plus riches en termes de potentiel de rendements en France. En particulier, les sols de limons qui peuvent atteindre des profondeurs importantes, (Duval *et al.*, *op. cit.*). Ainsi, la combinaison des cultures et des rotations permet d'observer des systèmes de cultures très variés (*tableaux 1 et 2*). Nous nous sommes limités, dans cette étude, à des sols limoneux sur sous-sol calcaire, très fréquents dans la région (plus de 50 % de la surface). En effet, l'agriculture de précision doit se concevoir dans un contexte pédoclimatique défini. Dans notre cas, c'est la disponibilité en eau qui est le facteur prépondérant de l'hétérogénéité intraparcellaire du potentiel de rendement des cultures (Duval *et al.*, *op. cit.*). Pour le blé, par exemple, ils peuvent varier de 70 à 110 quintaux (Llorens *et al.*, *op. cit.*). La disponibilité en eau est reliée à la profondeur des sols. Dans la même parcelle, des zones superficielles profondes de 50 cm avec une charge en cailloux qui peut monter jusqu'à 50 %, côtoient des zones où la profondeur excède deux mètres de limons francs sans aucun cailloux (Duval *et al.*, *op. cit.* ; Bécu *et al.*, *op. cit.*). La cartographie de la profondeur du sol est réalisée par des mesures de conductivité électrique apparente des sols (Corwin *et al.*, 2005 ; Duval *et al.*, *op. cit.* ; Llorens *et al.*, *op. cit.*). On peut ainsi approcher les variations de quantités d'eau disponibles pour les plantes et la traduire en carte de potentiels de rendements nécessaires à l'établissement des doses de fongicides à appliquer.
- 13 Nous avons choisi trois classes d'hétérogénéités (potentiel de production de biomasse fort, moyen et faible), fondées sur les résultats les plus fréquemment rencontrés, dans notre région, sur une durée de 6 années d'expérimentation (70 agriculteurs et 9 000 ha analysés) par le GRCETA (Bécu, données non publiées). Plus la zone est caractérisée par une biomasse forte, plus le risque de développement des maladies est élevé. Il faudra donc appliquer, dans ces zones, la dose maximale nécessaire (100 %) pour protéger la culture. A contrario, dans les zones où les biomasses sont les plus faibles, il est possible de réduire au maximum les doses (60 % ou 80 % suivant la stratégie retenue). Dans les zones moyennes on appliquera une réduction des doses de 10 ou 20 %. Cette diminution des

doses se raisonne par rapport au risque qu'est prêt à prendre l'agriculteur, notamment dans le cas des fongicides. Vérifier en effet est forte, la surface est importante et que

Tableau 2. Hypothèses concernant trois niveaux d'hétérogénéité des sols en Haute-Normandie

Sols de		Pourcentage de la surface concerné		
Haute-Normandie		Faible potentiel	Potentiel moyen	Fort potentiel
Hétérogénéité	forte	17%	58%	25%
	moyenne	12%	68%	20%
	faible	8%	74%	18%

Source : les auteurs

Données techniques servant de bases aux simulations

- 14 Nous avons retenu des rotations comprenant cinq cultures différentes (tableau 3). Nous avons donc collecté des informations concernant les itinéraires techniques de chaque culture, les prix actualisés des intrants nécessaires (CER France, *op. cit.*) et le coût des opérations culturales (BCMA, *op. cit.*).

Tableau 3. Assolements des systèmes de cultures céréalières en Haute-Normandie supports de la simulation (en % et en ha)

Répartition moyenne des cultures en 2001 (%)						
Systèmes de culture	Blé	Pa	colza	pois	orge	J
céréalières	52	6	18	10	14	
Répartition des cultures en 2001 (ha)						
	Blé	Pa	colza	pois	orge	J
C1a (95 ha)	49	6	17	10	13	
C2 (145 ha)	75	9	26	15	20	
C3 (240 ha)	125	14	43	24	34	

J = jachère, Pa = prairie.

Source : ROSACE, 2003

- 15 Les différences de biomasse dans les trois zones à traiter (définies précédemment) conditionnent l'application de deux stratégies de réduction des doses de fongicides.
1. Zones à forte biomasse : conditions les plus propices au développement des maladies. Application de la dose maximale (DM) de traitement (100 %). La dose appliquée dans cette zone sera celle aussi appliquée pour les techniques sans modulation (application uniforme).
 2. Zones à biomasse moyenne : réduction de la dose maximale de 10 % ou de 20 % suivant la stratégie.
 3. Zones à faible biomasse : réduction de la dose maximale de 20 % ou de 40 % suivant la stratégie.
- 16 Les deux stratégies de traitement testées ici sont donc :
- Stratégie 1 : 100 % (DM), 90 % (DM - 10 %) et 80 % (DM - 20 %),
 - Stratégie 2 : 100 % (DM), 80 % (DM - 20 %) et 60 % (DM - 40 %).

- 17 Les traitements fongicides concernés (tableau 4) sont ceux appliqués sur Blé (T1, T2, T3) et sur orge (T1, T2). Les références techniques des produits utilisés (prix et doses) sont issues des documents utilisés dans le Conseil agricole en Seine-Maritime (Fertil info, *op. cit.*).

Tableau 4. Itinéraires techniques des fongicides en systèmes céréaliers en Haute-Normandie

	Colza	Pois protéagineux	Blé tendre	Orge
Produit/ha				
rendement moyen (ent/ha)	3,5	5	8,5	7
Charges proportionnelles	quantité	quantité	quantité	quantité
action	produit (Kg/ha)	produit (Kg/ha)	produit (Kg/ha)	produit (Kg/ha)
fongicides	menara (T1) 0,4	Chlorotalonil (T1) 1	Menara (T1) 0,4	Fandango (T1) 0,8
	Bravo 500 (T1) 1	Chlorotalonil (T2) 1	Bravo 500 (T1) 1	Bell (T2) 0,7
	Opus (T2) 0,5	Chlorotalonil (T3) 1	Opus (T2) 0,5	Comet (T2) 0,2
	Piros (T2) 0,7		Piros (T2) 0,7	
	Joao (T3) 0,3		Joao (T3) 0,3	

Les produits en gras soulignés sont ceux sur lesquels il est possible d'appliquer l'agriculture de précision.

Source : fertil info, 2009

Données économiques servant de bases aux simulations

- 18 Les indicateurs économiques choisis sont principalement les coûts des intrants, des frais de mécanisation spécifiques à l'application des fongicides et la marge directe (marge brute - les charges de structures spécifiques à la production).
- 19 Dans notre cas, cette dernière est calculée de la manière suivante :
- 20 Produit des cultures (PC) = rendement * prix de vente + primes directes aux cultures.
- 21 Charges opérationnelles et de structures spécifiques phytosanitaires (COSSP) = intrants (engrais, semences, phytosanitaires) + pulvérisateur (charges fixes et de fonctionnement) + de positionnement (GPS, logiciel, boîtier) + maintenance + débitmètre + capteur de pression + montage du matériel de modulation.
- 22 Marge directe (MD) = PC - COSSP
- 23 Le matériel de pulvérisation pouvant varier selon les pratiques (uniforme ou modulation) nous avons choisi de retenir cette charge spécifique. Les résultats sont issus du référentiel « Coûts d'utilisation prévisionnels des matériels agricoles » (BCMA, *op. cit.*)
- 24 Les coûts des matériels embarqués spécifiques à la modulation proviennent de Défisol27 (communication personnelle), les amortissements ont été calculés sur 5 ans.
- 25 Les charges liées aux intrants ont été établies par hectare de cultures, celles liées aux matériels spécifiques pour la pulvérisation et la modulation des fongicides ont été affectées à l'ensemble des surfaces (excepté les coûts d'entretien du pulvérisateur ramenés à l'hectare de culture). Ainsi, ces dernières seront donc moins importantes quand les surfaces augmenteront.
- 26 Ce choix d'affectation des charges spécifiques à l'ensemble des surfaces a été motivé par deux critères principaux : d'une part, une volonté d'avoir une approche globale de la rentabilité au système d'exploitation, d'autre part, dans une perspective d'appliquer à d'autres cultures cette modulation des fongicides.

Modèle économique et simulations

- 27 Nous avons utilisé un logiciel de simulation économique « Olympe » qui permet de travailler à différentes échelles d'information (parcelle, système de cultures et exploitation). Il permet de construire des variantes et de les comparer (Attonaty *et al.*, *op. cit.* ; Penot et Deheuvels, *op. cit.* Novak, *op. cit.*).
- 28 Dans notre cas, nous avons quatre variantes.
- Trois doses de fongicides appliquées en fonction de l'hétérogénéité des sols (faible moyenne et forte).
 - Deux stratégies de réduction maximale des doses de fongicides appliquées (-20 % et -40 %).
 - Cinq niveaux de prix de fongicides (prix 2009, +10 %, +30 %, +50 %, +100 %).
 - Trois dimensions de systèmes de production (95 ha, 145 ha et 240 ha).
- 29 Les deux premiers points ont été définis dans le référentiel technique. Nous avons constaté une augmentation du prix des fongicides de 9,3 % depuis 2005 (AGRESTE, 2010). Nous avons voulu simuler une évolution croissante des prix jusqu'à leur doublement. En effet, selon Gilles Couleaud d'Arvalis, si l'on veut voir l'application des produits phytosanitaires diminuer de 40 %, il serait nécessaire d'en doubler le prix (Couleaud, 2009). Il était donc indispensable de faire varier le prix des fongicides afin de définir des seuils de rentabilité à partir des hypothèses retenues si l'on voulait tendre vers les objectifs définis lors du Grenelle de l'environnement. Pour la dernière variante, les trois surfaces agricoles utiles testées sont imposées par les données des fermes de références de ROSACE (tableau 1).
- 30 Pour simuler la rentabilité économique de matériel permettant de moduler les pesticides dans les systèmes de grandes cultures les plus courants en Haute-Normandie, nous avons du prendre des hypothèses de calcul.
- Les seuls intrants qui sont pris en compte en termes de variables dans les simulations sont les quantités de fongicides sur blé et orge.
 - Le coût du pulvérisateur retenu est identique en agriculture uniforme et en agriculture de précision. Les agriculteurs et conseillers rencontrés dans le cadre de notre collaboration avec Défisol27 ont indiqué qu'il n'y avait pas actuellement de différence de matériel utilisé.
 - Le surcoût observé proviendrait donc du matériel électronique embarqué spécifique à la modulation et du montage de celui-ci.
- Nous avons fait varier les pourcentages de surface en termes de potentiel agronomique à l'intérieur des parcelles en se fondant sur les mesures de conductivité expérimentales obtenues dans nos conditions pédoclimatiques (Duval *et al.*, 2007).

Résultats

- 31 Le raisonnement par classe de biomasse est la base du calcul des quantités de fongicides à apporter. Afin d'illustrer cette méthodologie nous avons détaillé la démarche pour le calcul des quantités de Bravo500 apportées sur blé (stratégie 2 : 100-80-60) pour une exploitation de 95 hectares dans le tableau 5.

- 32 Nous avons obtenu les quantités et le coût total de l'apport de ce fongicide pour le blé en fonction des surfaces concernées par l'hétérogénéité des parcelles : Hétérogénéité moyenne à forte (40 litres épandus pour un coût de 280 €) et hétérogénéité faible (40,2 litres épandus pour un coût de 281,4 €). Les valeurs obtenues sont sensiblement les mêmes. Elles sont même égales pour les hétérogénéités moyenne et forte. Ce qui diffère c'est la répartition des quantités qui sont ajustées aux besoins de la plante : il y a moins de Bravo500 épandu dans les zones où il sera le moins valorisé et des doses maximales dans celles où il protégera mieux le blé.
- 33 Donc, dans cet exemple, pour les apports de fongicides sur blé dans le cas d'une exploitation de 95 hectares on a :
- Du point de vue environnemental une limitation de la pollution diffuse en produit phytosanitaire dans les zones où cela ne s'impose pas.
 - Du point de vue agronomique une protection plus adaptée de la culture.
- 34 Du point de vue économique, nous allons dans le sens d'une meilleure rentabilité due à un coût moins important lié aux moindres quantités épandues par rapport à l'application uniforme (40 litres au lieu de 49 dans notre exemple).

Tableau . Exemple de calcul des quantités de Bravo500 à apporter sur blé pour une exploitation de 95 hectares en fonction de la variation des taux d'hétérogénéité des sols et des potentiels de rendements

Culture	Fongicide	Hétérogénéité des sols	Potentiel de rendement	Répartition des surfaces (ha)	Quantité de produit (en l)	prix (€/l)	coûts (€)
Blé (surface = 49 ha)	Bravo	25%	Fort	12	12	7	84
	500	58%	Moyen	29	23,2	7	162,4
	Stratégie 2	17%	Faible	8	4,8	7	33,6
SAU (95 ha)		20%	Fort	10	10	7	70
		68%	Moyen	33	26,4	7	184,8
		12%	Faible	6	3,6	7	25,2
		18%	Fort	9	9	7	63
		74%	Moyen	36	28,8	7	201,6
		8%	Faible	4	2,4	7	16,8

Source : les auteurs

Des quantités de fongicides diminuent quand on module les apports sur céréales

- 35 Contrairement à l'étude précédente (Llorens *et al.*, *op. cit.*), la modulation des apports de fongicides ne génère pas de variations de rendement. Ces dernières sont conditionnées essentiellement par la réserve en eau et la nutrition minérale : elle détermine des zones intraparcellaires à potentiel variable. Par souci de simplification, nous avons voulu nous concentrer sur la problématique « fongicides », indépendamment des apports localisés des engrais qui, eux, génèrent des différences de rendement donc des variations de produits en fonction de l'hétérogénéité des parcelles.
- 36 Quand on compare les quantités de fongicides appliquées en agriculture uniforme et celles appliquées de manière localisée, elles diminuent d'environ 10 % pour la stratégie de réduction des doses N° 1 (100-90-80) et d'environ 20 % pour la stratégie de réduction des doses N° 2 (100-80-60).

- 37 Ceci s'explique par le fait que les niveaux d'hétérogénéité moyens sur lesquels on applique la dose 90 pour la stratégie 1 et la dose 80 pour la stratégie 2 sont importants en pourcentage de surface : entre 58 et 74 % (tableau 3). Du fait des faibles quantités de produits en jeu, les différences entre niveau d'hétérogénéité (faible, moyenne ou forte) sont quasiment inexistantes contrairement à ce que l'on observait pour la modulation des engrais (Llorens *et al.*, *op. cit.*).
- 38 Il est à noter que, techniquement, seule la stratégie 1 est réalisable à l'heure actuelle avec le matériel disponible sur le marché. La stratégie 2 nécessiterait que la technique évolue en termes de possibilité de réduire le débit au niveau des buses. Nous avons souhaité simuler cette hypothèse car elle est agronomiquement concevable, même si elle implique une prise de risque de la part de l'agriculteur en fonction du climat de l'année, de la variété utilisée ou de l'intensité du développement des maladies fongiques. Ce risque a été évalué à 10 à 15 % de rendement en moins (Poletti, communication personnelle).

Tableau . Variations des marges brutes (en €/ha) de SAU entre agriculture uniforme et application localisées des fongicides

Marges Brutes/ha SAU			Prix 2009	+ 10 %	+ 30 %	+ 50 %	100%	
Stratégie 1: 100-90-80	Application Uniforme	marges brutes €/ha SAU	95ha	468	463	452	441	414
			145ha	468	463	452	441	414
			240ha	469	464	453	442	414
	Hétérogénéité Faible		95ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			145ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			240ha	+ 5	+ 5	+ 7	+ 8	+ 10
	Agriculture de précision : Variation de marges brutes €/ha SAU	Hétérogénéité Moyenne	95ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			145ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			240ha	+ 5	+ 5	+ 7	+ 8	+ 10
	Hétérogénéité Forte		95ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			145ha	+ 5	+ 5	+ 6	+ 8	+ 9
			240ha	+ 5	+ 5	+ 7	+ 8	+ 10
Stratégie 2: 100-80-60	Application Uniforme	marges brutes €/ha SAU	95ha	468	463	452	441	414
			145ha	468	463	452	441	414
			240ha	469	464	453	442	414
	Hétérogénéité Faible		95ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			145ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			240ha	+ 10	+ 11	+ 13	+ 15	+ 20
	Agriculture de précision : Variation de marges brutes €/ha SAU	Hétérogénéité Moyenne	95ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			145ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			240ha	+ 10	+ 11	+ 13	+ 15	+ 20
	Hétérogénéité Forte		95ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			145ha	+ 10	+ 10	+ 13	+ 15	+ 19
			240ha	+ 10	+ 11	+ 13	+ 15	+ 20

Source : les auteurs

Des marges brutes améliorées mais des marges directes détériorées

- 39 Pour les prix de 2009, l'application localisée des fongicides améliore la marge brute globale par hectare de l'exploitation grâce à l'amélioration de la marge des céréales de 5 €/ha pour la stratégie 1 et de 10 €/ha pour la stratégie 2. Dans la logique de ce que nous avons observé avec l'évolution des quantités épandues, les différents niveaux d'hétérogénéité n'ont pas d'influence sur la variation de la marge brute.
- 40 En raisonnant à l'échelle de l'exploitation le gain de marge brute minimal (stratégie 1) est de 453 € pour 95 ha et le gain maximal (stratégie 2) est 2379 € pour 240 ha. Ces sommes sont très marginales elles représentent 1 à 2 % de la marge brute totale.
- 41 L'hypothèse du doublement des prix induit un doublement du gain de marge puisqu'il s'agit d'une variation des prix des fongicides impliqués dans la modulation.
- 42 Pour les prix de 2009, les techniques d'application localisée des fongicides améliore la marge brute, cependant la prise en comptes du coût des matériels spécifiques entraîne

une variation de marge nette négative. Par rapport à l'application uniforme, les charges de structure spécifiques augmentent de 3290 €. Le gain faible de marge brute est insuffisant pour couvrir le surcoût du matériel. Le différentiel de marge directe est d'autant plus faible que la surface est importante, le surcoût lié à l'utilisation de ce matériel étant supporté par une plus grande surface (de -30 € à -3 € suivant les stratégies et les systèmes de production).

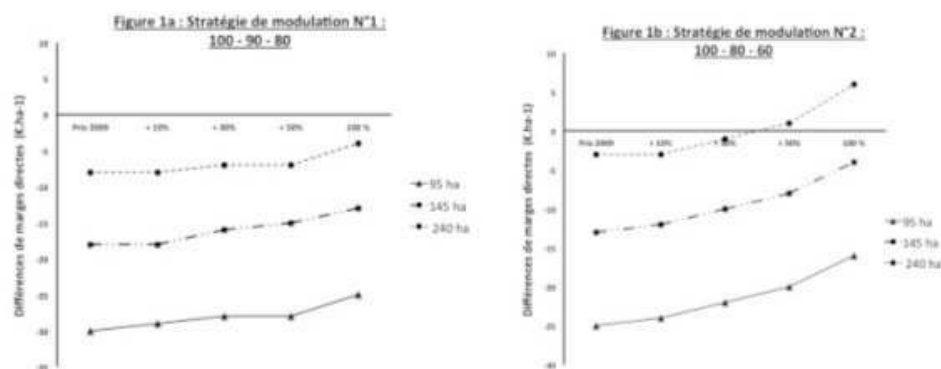
Tableau . Variations des marges directes (en €/ha) de SAU entre agriculture uniforme et application localisées des fongicides

Marges Directes/ha SAU			Prix 2009	+ 10 %	+ 30 %	+ 50 %	100%	
Stratégie 1 : 100-90-80	Application Uniforme	marges directes €/ha SAU	95ha	-420	-415	-404	-394	-366
			145ha	-437	-432	-421	-410	-383
			240ha	-450	-445	-434	-424	-396
	Hétérogénéité Faible		95ha	-30	-29	-28	-28	-25
			145ha	-18	-18	-16	-15	-13
			240ha	-8	-8	-7	-7	-4
	Hétérogénéité Moyenne		95ha	-30	-29	-28	-28	-25
			145ha	-18	-18	-16	-15	-13
			240ha	-8	-8	-7	-7	-4
	Hétérogénéité Forte		95ha	-30	-29	-28	-28	-25
			145ha	-18	-18	-16	-15	-13
			240ha	-8	-8	-7	-7	-4
Stratégie 2 : 100-80-60	Application Uniforme	marges directes €/ha SAU	95ha	-420	-415	-404	-394	-366
			145ha	-437	-432	-421	-410	-383
			240ha	-450	-445	-434	-424	-396
	Hétérogénéité Faible		95ha	-25	-24	-22	-20	-16
			145ha	-13	-12	-10	-8	-4
			240ha	-3	-3	-1	1	+ 5
	Hétérogénéité Moyenne		95ha	-25	-24	-22	-20	-15
			145ha	-13	-12	-10	-8	-4
			240ha	-3	-3	-1	1	+ 6
	Hétérogénéité Forte		95ha	-25	-24	-22	-20	-15
			145ha	-13	-12	-10	-8	-4
			240ha	-3	-3	-1	1	+ 6

Source : les auteurs

- 43 Dans les conditions de nos hypothèses de travail où nous ne nous intéressons qu'à la modulation des fongicides sur céréales, l'agriculture de précision n'est pas rentable en 2009. Dans le cadre de la stratégie 2 et pour les surfaces les plus élevées (240 ha), une évolution des prix des fongicides, permet d'atteindre l'équilibre pour des augmentations de 30 à 50 % (tableau 4) et d'obtenir un gain de marge directe de l'ordre de 6 €/ha de SAU quand on double leur prix (figure 1).

Figure . Évolution de la différence de marges directes entre application localisée et uniforme pour trois systèmes de cultures céréalières



Source : les auteurs

- 44 Cependant, envisagée sous l'angle environnemental, l'amélioration est sensible. En effet, quelle que soit la surface (95, 145 ou 240ha) ou le niveau d'hétérogénéité, la moyenne des

pourcentages de réduction des quantités de fongicides est respectivement de 9 % pour la stratégie 1 et de 19 % pour la stratégie 2.

- 45 Les traitements ne seront réalisés que dans les zones où cela est nécessaire, on évitera ainsi des perturbations sur la biodiversité du sol dans ces zones (Brussaard *et al.*, 2007). Ces techniques s'inscrivent donc dans les objectifs du Grenelle de l'environnement et des réductions des doses de pesticides. Elles permettent de contribuer à la diminution des doses mais ne permettent pas d'atteindre les objectifs de 50 % du plan Ecophyto 2018. Elles doivent compléter un dispositif plus large destiné à réduire les apports de pesticides.

Discussion générale

- 46 Dans nos simulations, l'exploitation est considérée selon une entrée bioéconomique, nous considérons la rentabilité économique du système de production dans le cas où l'on applique les fongicides de manière localisée ou uniforme. Nous considérons l'agriculteur comme « décideur rationnel » (Novak, 2008) et s'efforçant à maximiser son profit sous les contraintes liées au matériel de modulation, à l'hétérogénéité du sol et à l'augmentation du prix de fongicides. Le logiciel *Olympe* est un simulateur qui permet de calculer les résultats technico-économiques de l'exploitation sous différents scénarios (Novak, *op. cit.*), ici le prix des fongicides en fonction de deux stratégies de traitement.
- 47 Nous nous sommes limités dans cette étude à évaluer la rentabilité des fongicides sur céréales pour plusieurs raisons. En effet, nous voulions :
- Donner des réponses économiques à des techniques utilisables par les agriculteurs avec les matériels existant actuellement chez les concessionnaires.
 - Utiliser des raisonnements techniques appliqués dans notre région et issus d'essais de longues durées.
 - Nous limiter aux fongicides sur céréales (blé et orge) car il n'était pas pertinent agronomiquement de les appliquer sur colza ou pois.
 - Nous placer dans l'hypothèse d'une exploitation agricole voulant investir dans ce type de matériel.
- 48 Nos simulations sont fondées sur une bonne connaissance technique des conditions de sol qui nous permet d'estimer au plus juste l'hétérogénéité spatiale des variations du rendement à l'intérieur des parcelles. Nous ne sommes donc pas obligés d'intégrer une estimation statistique dans notre modèle comme sont tenues de le faire d'autres méthodes (Bullock et Lowenburg-DeBoer, *op. cit.*) pour calculer la rentabilité. De même, les variations climatiques qui peuvent avoir des effets importants sur la rentabilité (*ibid.*) sont intégrées indirectement par le biais de la prise en compte du rendement objectif probable par zone issu d'essais agronomiques régionaux réalisé depuis 2003. Ces hypothèses de travail (variabilité spatiale et climat) sont conformes au raisonnement économique des agriculteurs en début de campagne pour prévoir leurs itinéraires techniques.
- 49 Ce travail est une première approche qui se veut plus opérationnelle que modélisatrice. L'incertitude vis à vis des résultats de l'innovation et l'apprentissage de nouvelles techniques sont des facteurs importants à lever pour rassurer l'agriculteur par rapport aux risques qu'il prend (Marra *et al.*, *op. cit.*). Dans notre étude, le risque pris par les agriculteurs dans le choix des technologies de modulation des fongicides concerne des changements techniques mineurs (matériel de géopositionnement des traitements). Les

aspects techniques de l'incertitude en agriculture de précision sont de moins en moins prégnants avec l'évolution technologique de ces dernières années. Les nouveaux matériels ont fait leur preuve et se démocratisent : barres de guidage, positionnement GPS. Ces démonstrations par l'exemple facilitent le choix de l'innovation (*ibid.*).

- 50 Dans ces conditions, c'est l'incertitude liée aux aspects économiques qui devient la clef. Les simulations de marges directes que nous avons réalisées montrent que l'application localisée des fongicides n'est pas rentable en tant que telle (*cf. tableau 7 et figure 1*), principalement à cause de l'investissement lié au matériel dont le coût est trop important par rapport aux surfaces traitées et aux économies de produit de traitement réalisées. Ainsi, l'application localisée des fongicides sur céréales ne devient rentable économiquement qu'avec une prise de risque non négligeable en termes de stratégie de traitement et pour des exploitations céréalières de dimension importante (*cf. figure 1*). Ces résultats sont aussi à nuancer vis-à-vis du surcoût du matériel capable de diminuer les doses à 60 % (buses) qui n'a pas été pris en compte par souci de simplification des simulations dans le cadre de cette première approche de l'étude de la rentabilité.
- 51 Comme le frein n'est pas l'incertitude sur la technique il nous reste à explorer des pistes de travail permettant de diminuer les coûts de mécanisation spécifiques.
- 52 *Première piste de travail* : la rentabilité de la modulation des fongicides doit être raisonnée dans le cadre d'une application localisée de l'ensemble des intrants à l'échelle de l'exploitation, ce qui permet de répartir les coûts sur une plus grande surface traitée. Différents travaux ont montré que la modulation des engrais améliorerait la marge directe (Tozer, 2009, Llorens *et al.*, *op. cit.*). Les gains en termes de marge directes peuvent atteindre entre 35 et 45 €/ha suivant la variabilité spatiale de l'hétérogénéité des sols (Llorens *et al.*, *op. cit.*).
- 53 *Deuxième piste de travail* : la diminution des coûts de mécanisation spécifiques peut se faire par la mutualisation du matériel entre plusieurs exploitations. Là encore, l'augmentation des surfaces doit générer des diminutions de charges de structure, mais peut entraîner des problèmes d'accessibilité au matériel dans les périodes de pointes d'utilisation.
- 54 Si les problèmes économiques sont levés, l'apprentissage risque alors de devenir le frein majeur. Lors de nos discussions avec les acteurs de terrain, plusieurs profils d'agriculteurs se sont dégagés : les agriculteurs innovants à la recherche des dernières techniques, les agriculteurs utilisateurs de l'innovation et ceux qui sont plutôt réfractaires. Les premiers font partie de groupes dynamiques (Défisol27 par exemple), mutualisent leurs expériences et mettent au point les techniques d'un point de vue opérationnel : ceux-là augmentent leurs compétences et sont convaincus par les matériels (Abadi Ghadim *et al.*, *op. cit.*). Les seconds adopteront ces technologies si le matériel a une prise en main aisée et si des moyens sont mis en termes d'accompagnement et de dépannage rapide (Sunding et Zilberman, 2001). Pour les derniers, des solutions « clefs en main » sont à étudier, par le biais de travail à façon (Prestation d'entreprises de travaux agricoles, CUMA). Ces solutions restent à simuler dans des travaux ultérieurs.

Conclusion et perspectives

- 55 Notre méthodologie fondée sur la modélisation à partir du simulateur *Olympe* a démontré que la modulation des fongicides n'est pas rentable mais que l'agriculture de précision

doit se concevoir dans la globalité de l'exploitation. En effet, en appliquant la modulation des apports sur les engrais et les fongicides, on augmente la marge directe des cultures sans affecter le rendement du fait d'une meilleure valorisation du matériel et autres coûts spécifiques. Ceci est particulièrement pertinent à une époque où le prix des intrants et l'insécurité alimentaire augmentent.

- 56 Notre démarche peut être utile à plusieurs niveaux. Tout d'abord, pour les agriculteurs ou les conseillers agricoles (pour évaluer la rentabilité de l'investissement en matériel pour moduler les intrants dans le cas d'exploitation) qui voudraient se lancer dans l'application localisée des apports. Ensuite pour les constructeurs afin d'évaluer le potentiel de développement d'un matériel à l'échelle d'un territoire (ici la Normandie). Enfin, pour fournir, des critères de décision économiques et environnementaux aux décideurs à l'échelle du territoire pour leur politique de soutien à des techniques permettant de réduire les doses de pesticides.
- 57 Au delà de la modulation des fongicides, l'autre marge de progrès dans la réduction des pesticides en agriculture de précision est le contrôle des adventices. Cependant, cela ne concerne que les traitements qui se font en post-levée puisqu'il faut pouvoir cartographier les zones où sont les mauvaises herbes (Nordmeyer, 2006). Une des perspectives de ce travail est de simuler la réduction des herbicides grâce à l'application localisée. Cependant les matériels disponibles ne sont pour le moment que des prototypes de recherche que ce soit pour la détection des plantes (Burgos-Artizzua *et al.*, 2009) ou pour le traitement localisé qui devra être beaucoup plus précis (Slaughter *et al.*, 2008) que pour les fongicides si on veut avoir des diminutions significatives des doses. Le transfert de technologies concernant la lutte localisée contre les adventices reste à réaliser pour être opérationnel chez les agriculteurs (Nordmeyer, *op. cit.* ; Slaughter *et al.*, *op. cit.* ; Burgos-Artizzua *et al.*, 2009).
- 58 L'évolution vers la réduction des pesticides grâce aux techniques d'agriculture de précision prendra du temps car il reste encore des aspects techniques à résoudre. Pour diffuser ces techniques il sera, de toute façon, nécessaire d'en démontrer l'efficacité tant du point de vue économique que technique (Jochinke *et al.*, 2007).

BIBLIOGRAPHIE

Abadi Ghadim A., Pannell D. J., Burton M. P. (2005). Risk, uncertainty, and learning in adoption of a crop innovation. *Agricultural economics*, n° 33, p. 1-9.

AGRESTE (2010). Bulletin de conjoncture.

Atherton B. C., Morgan M. T., Shearer S. A., Stombaugh T. S., Ward A. D. (1999). Site-specific farming : a perspective on information needs benefits and limitations. *Journal of soil and water conservation*, vol. 54, n° 2, p. 455-460.

Attonaty J-M., Le Bars M., Allaya M., Le Grusse P. (2005). *Olympe : manuel d'utilisation*. Montpellier, CIHEAM-IAM.

- Aubertot J. N., Barbier J. M., Carpentier A., Gril J. J., Guichard L., Lucas P., Savary S., Savini I., Voltz M. (éds.) (2005). *Pesticides, agriculture et environnement. Réduire l'utilisation des pesticides et limiter leurs impacts environnementaux*. Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA et Cemagref, 64 p.
- BCMA (2008). Coûts d'utilisation prévisionnels des matériels agricoles. Chambre d'agriculture Normandie, BCMA, CUMA.
- Bécu M., Duval C., Debandt V., Taïbi S., Llorens J.-M. (2010). *Influence of past land-use on the geostatical analysis of soil heterogeneity for site specific fertilization*. Clermont-Ferrand, Ageng 2010 - International Conference on Agricultural engineering & Industry Exhibition, September 6-8th.
- Bourgain O., Michaud M. (2006). Evaluation of the economic impact of agricultural practices aiming at limiting muddy flows : farmers from the Plateau du Neubourg (France). Workshop « *the socio-economic aspects in the management of soil erosion* » Strasbourg, April 7-8th.
- Bullock D. S., Lowenbourg-DeBoer J. (2006). *Using Spatial Analysis to Study the Values of Variable Rate Technology and Information*. , Australia, Invited paper at the International Association of Agricultural Economists Conference, Gold Coast, August 12-18th, 41 p.
- Burgos-Artizzua X. P., Ribeiro A., Tellaecheb A., Pajares G., Fernández-Quintanilla C. (2009). Improving weed pressure assessment using digital images from an experience-based reasoning approach. *Computers and electronics in agriculture*, n° 65, p. 176-185.
- CER France (2009). *Gérer pour gagner. hors-série régional*, 24 p.
- Brussaard L., de Ruiter P. C., Brown G. G. (2007). Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 121, p. 233-244.
- Couleaud G. (2009). *Programme fongicide céréales - un investissement calqué sur le prix du quintal*. http://www.terre-net.fr/dossier_special/Fongicides-Cereales-2009.
- Corwin D. L., Lescha S. M., Osterb J. D., Kaffkac S. R. (2005). Monitoring management-induced spatio-temporal changes in soil quality through soil sampling directed by apparent electrical conductivity. *Geoderma*, n° 131, p. 369-387.
- Dailey A. G., Smith J. U., Whitmore A. P. (2006). How far might medium-term weather forecasts improve nitrogen fertiliser use and benefit arable farming in the England and Wales ? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, n° 117, p. 22-28.
- DeVuyst E. A., Halvorson A. D. (2004). Economics of Annual Cropping versus Crop-Fallow in The Northern Great Plains as Influenced by Tillage and Nitrogen. *Agronomy Journal*, n° 96, p. 148-153.
- Duval C., Debandt V., Eveillé J.-P., Mahieu D., Taïbi S., Llorens J.-M. (2007) Influence of the pedo-climatic variability in Haute-Normandie (NW France) on the intra field spatial variability on yields of wheat and oilseed rape. *Précision agriculture 07*, Wageningen Academic publishers, p. 87-94.
- Fertil info (2009). *Special phyto 2010*. Chambre d'agriculture de Seine-Maritime, 52 p.
- Grenelle de l'environnement (2007a). Synthèse du Groupe II – Préserver la biodiversité et les ressources naturelles. 7 p.
- Grenelle de l'environnement (2007b). Synthèse du Groupe III – Instaurer un environnement respectueux de la santé. 6 p.
- Grenelle de l'environnement (2007c). Synthèse du Groupe IV – Vers des modes de production et de consommation durables. 8 p.

- Haefele S. M., Wopereis M. C. S. (2005). Spatial variability of indigenous supplies for N, P and K and its impact on fertilizer strategies for irrigated rice in West Africa. *Plant and Soil*, n° 270, p. 57-72.
- JOCE (2000). Directive 2000/60/ce du parlement européen et du conseil du 23 octobre 2000 établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau. *Journal Officiel des Communautés Européennes* du 22 décembre 2000, 72 p.
- Jochinke D. C., Noonon B. J., Wachsmann N. G., Norton R. M. (2007). The adoption of precision agriculture in an Australian broadacre cropping system-Challenges and opportunities. *Field Crops Research*, n° 104, p. 68-76.
- Koch B., Khosla R., Frasier W. M., Westfall D. G., Inman D. (2004). Economic Feasibility of Variable-Rate Nitrogen Application Utilizing Site-Specific Management Zones. *Agronomy Journal*, n° 96, p. 1572-1580.
- Laurent C., Maxime F., Mazé A., Tichit M. (2003). Multifonctionnalité de l'agriculture et modèles de l'exploitation agricole. *Economie rurale*, n° 273-274, p. 134-152.
- Link J., Graeff S., Batchelor W. D., Claupein W. (2006). Evaluating the economic and environmental impact of environmental compensation payment policy under uniform and variable-rate nitrogen management. *Agricultural Systems*, n° 91, p. 135-153.
- Llorens J.-M., Perrin O., Bourgain O. (2010). Site specific crop fertilization in Haute-Normandie : a tool to improve the profitability of cereal crop systems. In *"Selected problems of soil tillage systems and operations"*, Faculty of Production Engineering Warsaw University of Life Sciences, p. 57-76.
- Lobell D. B. (2007). The cost of uncertainty for nitrogen fertilizer management : A sensitivity analysis. *Field Crops Research*, n° 100, p. 210-217.
- Marra M., Pannell D. J., Abadi Ghadim A. (2003). The economics of risk, uncertainty and learning in the adoption of new agricultural technologies : where are we on the learning curve ? *Agricultural Systems*, n° 75, p. 215-234.
- Melakeberhan H., Avendaño F. (2008). Spatio-temporal consideration of soil conditions and site-specific management of nematodes. *Precision Agriculture*, n° 9, p. 341-354.
- Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (2008). *Plan ecophyto 2018 de réduction des usages de pesticides 2008-2018*. 10 septembre, 20 p.
- Nordmeyer H. (2006). Patchy weed distribution and site-specific weed control in winter cereals. *Precision Agriculture*, n° 7, p. 219-231.
- Novak S. (2008). Méthodes de conception de systèmes de production innovants à l'échelle de l'exploitation agricole. Synthèse bibliographique, Montpellier Supagro, INRA et CIRAD, 63 p.
- Penot E., Deheuvels O. (2007) Modélisation économique des exploitations agricoles, Modélisation, simulation et aide à la décision avec le logiciel Olympe. L'Harmattan, p. 9-21.
- Robert P. C. (2002). Precision agriculture : a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil*, n° 247, p. 143-149.
- ROSACE (2003). Réseau d'Observation des Systèmes Agricoles pour les Conseils et les Etudes.
- Sartori L., Basso B., Bertocco M., Oliviero G., (2005). Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy. *Biosystems Engineering*, vol. 91, n° 2, p. 245-256.
- Slaughter D. C., Giles D. K., Downey D. (2008). Autonomous robotic weed control systems : A review. *Computers and electronics in agriculture*, n° 61, p. 63-78.

Sunding D., Zilberman D. (2001). The agricultural innovation process : Research and technology adoption in a changing agricultural sector. In Bruce L. G., Gordon C. R. (eds.), "*Handbook of Agricultural Economics*", p. 207-261, Elsevier.

Swinton S. M., Lowenberg-DeBoer J., (1998). Evaluating the profitability of site-specific farming. *Journal of precision agriculture*, vol. 11, n° 4, p. 439-446.

Tozer P. (2009). Uncertainty and investment in precision agriculture – Is it worth the money ? *Agricultural Systems*, n° 100, p. 80-87

NOTES

1. Logiciel de simulation économique conçu par Jean-Marie Attonaty (Attonaty *et al.*, 2005 ; Penot et Deheuvels, 2007).

RÉSUMÉS

L'agriculture moderne nécessite des critères de décision à différentes échelles de territoire pour concilier productivité et respect de l'environnement. Les auteurs ont établi une méthodologie pour étudier la rentabilité de la modulation des fongicides pour un système de culture à dominante céréalière en Haute-Normandie (France). Ils ont simulé les apports des produits phytosanitaires pour des surfaces d'exploitation variables (95 ha, 145 ha et 240 ha) et des taux d'hétérogénéité différents (faible variation intraparcellaire de la biomasse végétale, moyenne et forte). La comparaison des marges directes calculées en application uniforme et en système modulé montre que, dans nos conditions pédoclimatiques, la modulation des fongicides n'est pas économiquement rentable en tant que telle. Elle doit se concevoir dans le cadre d'un investissement global pour moduler l'ensemble des intrants à l'échelle de l'exploitation agricole.

Modern agriculture requires decision making criteria applicable to different scales of territory in order to reconcile productivity and respect of the environment. So we have established a methodology to study the profitability of site specific pest management (SSPM) of fungicides for cropping systems dominated by cereals in Haute-Normandie. We have simulated pesticide application for variable surface areas (95 ha, 145 ha, 240 ha) and for different heterogeneity levels of crop biomass. The comparison of the direct margins calculated for a uniform application and with precision agriculture (PA) show that, in our pedoclimatic conditions, SSPM is not profitable as such. In order to be profitable, it should be conceived as part of the global site specific crop management investment at the scale of the farm unit.

INDEX

Keywords : site-specific pest management (SSPM), pesticide strategy, economic perspectives, agricultural policy.

Mots-clés : stratégie de traitement phytosanitaire, modulation des fongicides, perspective économique, approche agro-économique, politique agricole

Code JEL Q12 - Micro Analysis of Farm Firms; Farm Households; and Farm Input Markets

AUTEURS

ODILE BOURGAIN

Unité AGRI'TERR Equipe LECOR, Esitpa, école d'ingénieur pour l'agriculture, Mont Saint Aignan, obourgain@esitpa.org

JEAN-MARC LLORENS

Institute for Material Research, faculté des sciences, université de Rouen, Saint Etienne du Rouvray, llojm82@gmail.com