

CRITERES DE RENTABILITE ECONOMIQUE DE MODULATION INTRAPARCELLAIRE DE LA FERTILISATION PK EN SYSTEMES DE GRANDES CULTURES EN HAUTE-NORMANDIE.

Bourgain O. ⁽¹⁾ et Llorens J-M ⁽²⁾.

⁽¹⁾ Esitpa, école d'ingénieur pour l'agriculture (Mont Saint Aignan, France)

⁽²⁾ Nov&atech, (Saint Etienne du Rouvray, France)

Résumé

Les techniques modernes de localisation des pratiques agricoles permettent de concilier productivité et respect de l'environnement. Cependant les critères objectifs de leur rentabilité sont rarement étudiés à l'échelle de l'exploitation agricole. Dans ce travail, nous avons établi une méthodologie pour quantifier la rentabilité de la modulation des engrais PK pour les systèmes de culture dominants en Haute-Normandie. Nous avons simulé l'impact technico-économique de la fertilisation de précision pour des surfaces d'exploitation variables dans des contextes de prix d'achats des intrants des productions différents. Les marges directes calculées en application uniforme et en système modulé montrent que, dans nos conditions pédoclimatiques, la modulation des intrants est d'autant plus rentable que la surface est importante et que le coût des engrais est élevé.

Mots clefs : Phosphore, potassium, analyses de sols, fertilisation de précision, historique cultural.

Introduction :

La méthode d'application localisée des intrants est plus qu'une simple technologie, elle permet d'augmenter la pertinence des critères de décisions à la fois pour le conseil en agronomie (Swinton and Lowenberg-Deboer, 1998) et pour quantifier leurs conséquences environnementales (Melakeberhan et avendano, 2008). Cependant dans la plupart des cas l'intérêt agro-environnemental se heurte avec la rentabilité économique (Atherton et al, 1999) ou des freins socio-économiques (Robert, 2002).

Pour simuler l'intérêt de ces techniques il est important d'avoir une vision globale à l'échelle de l'exploitation. L'efficacité économique de telles techniques ne peut se concevoir qu'en prenant en compte toutes les composantes du système. En effet, compte tenu du coût d'acquisition de l'information et du surcoût du matériel utilisé, la rentabilité doit être évaluée pour un système de production qui cumule intérêts et limites pour chaque culture. Dans la littérature, les résultats techniques sont évalués partiellement du point de vue économique. Ils se limitent le plus souvent au gain que représente la diminution des quantités d'engrais ou les 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'élément fertilisant, l'azote en général (Koch et al, 2004, Link et al, 2006). Cependant, 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 d'évaluer la rentabilité des techniques de modulation des engrais (Haefele and Wopereis, 2005).

Dans un contexte de prix des matières premières fluctuant à la hausse, il est important de développer des outils d'aide à la décision permettant d'évaluer la rentabilité économique de ces nouvelles techniques. Des études récentes de modulation des engrais en grandes cultures ont montré que des diminutions de doses étaient compatibles avec le maintien des niveaux de rendements en Haute-Normandie (Llorens et al, 2010).

La méthodologie que nous avons élaborée permet d'estimer la rentabilité des investissements en matériel nécessaire pour moduler les intrants. Nous l'avons appliquée sur les systèmes de grandes cultures présents en Haute-Normandie. Nous avons simulé des exploitations de dimension variables pour des fourchettes de prix d'achats d'engrais observées au cours des dernières années.

Les résultats issus de ce travail sont destinés aussi bien aux agriculteurs qu'aux conseillers agricoles ou encore aux décideurs à l'échelle du territoire (Flemming and Adams, 1997, Link et al., 2006).

L'outil de simulation retenu, le logiciel Olympe, a déjà été utilisé dans un contexte de bassin versant soumis à l'érosion et du chiffrage des mesures agronomiques antiérosives à mettre en place (Bourgain et Michaud, 2006). Suite à cette première expérience réussie, nous avons souhaité l'étendre à la rentabilité de l'agriculture de précision dans nos conditions pédoclimatiques.

Les deux principaux objectifs de ce travail sont :

1. D'élaborer et de valider une méthodologie permettant de définir les indicateurs technico-économiques les plus pertinents pour approcher la rentabilité de l'agriculture de précision à l'échelle de l'exploitation agricole
2. D'appliquer cette méthodologie pour réaliser des simulations sur des cas types en faisant varier le coût des intrants sur des exploitations dont on maîtrise l'ensemble des informations économiques et comparer les résultats obtenus avec ou sans agriculture de précision.

Matériel et méthode

Echelle d'étude et typologie des systèmes simulés

A partir de données acquises au niveau de chaque culture (itinéraires techniques, données économique, spécificité d'hétérogénéité), notre échelle d'investigation finale est l'exploitation agricole. Les systèmes de production retenus sont issus d'un réseau d'observation économique mis en place par les chambres d'agriculture (chambre d'agriculture, 2008). Nous avons choisi trois grands types de systèmes (céréaliier, betteravier-liniculteur, patatier). En effet ces exploitations de cultures représentent 40% des exploitations de Haute-Normandie. Elles sont définies comme étant sans productions de lait avec une surface toujours en herbe limitée (inférieure à 15% de la surface agricole utile) et un chiffre d'affaire animal inférieur à 15-20% du total.

Tableau 1 : **Assolements moyens des systèmes céréaliiers supports de la simulation (en ha).**

Système de culture	Cas-Type	Répartition des cultures en 2001 (ha)									
		Blé	Bet.	Lin	Pt	Pa	Colza	Pois	Escourgeon	J	
Céréaliier	C1 (95 ha)	49				6	17	10		13	
	C2 (145 ha)	75				9	26	15		20	
	C3 (240 ha)	125				14	43	24		34	
Betteravier-liniculteur	BL 1(110ha)	44	15	13		8		12		9	9
	BL 2 (200ha)	80	28	24		14		22		16	16
Patatier conso	PDT (150ha)	63	11	20	26	10		10			10

Bet.. = betterave à sucre, Pt = Pomme de terre, J=jachère, Pa = prairie.

Cette typologie repose sur trois niveaux combinés de facteurs :

- le pourcentage de surface en céréales et oléo-protéagineux, en betterave et lin, en pomme de terre.
- La main d'œuvre,
- L'importance de surface agricole utile.

Les caractéristiques dominantes des systèmes sont les suivantes:

- Céréaliier : plus de 80% des terres labourables en céréales-oléagineux et jachère.
- Betteravier-liniculteur : 20 à 25% des terres labourables en betteraves et lin.
- Patatier consommation : plus de 10ha de pomme de terre de consommation (moyenne 25ha)

Le tableau 1 reprend les cas-types retenus et la répartition des surfaces intégrée dans les simulations.

Les six systèmes représentés regroupent 87% des exploitations de cultures de Haute-Normandie soit 2800 fermes. Nous avons utilisés des informations économiques standard représentatives des exploitations de la région. Elles sont la synthèse de six années de références.

Référentiel technique

Nous avons retenu des rotations comprenant au maximum sept à huit cultures différentes pour trois systèmes de cultures (céréales, betterave-lin, pomme de terre). Nous avons donc collecté des informations concernant les itinéraires techniques de chaque culture et les prix actualisés des intrants nécessaires et du coût des opérations culturales. Une partie des données techniques et économiques ont été acquises en parcelles expérimentales (Llorens, 2010). Pour la fertilisation de précision, les cartes d'hétérogénéité des teneurs sont obtenues à partir d'analyses de sol échantillonnées à une

fréquence de l'ordre de 1,3 analyse par hectare (méthode mise au point par la société Défisol dans l'Eure). Dans le cas de l'application uniforme, une teneur moyenne de la parcelle est évaluée par les méthodes classiquement utilisées (une analyse par parcelle).

Pour calculer la dose d'engrais P et K à apporter en fonction de l'hétérogénéité des teneurs, nous avons utilisé la méthode préconisée par le COMIFER (Llorens et al., 2001) fondée sur la table des exportations actualisée en 2007 et la grille de préconisation de doses validée en 2009.

Indicateurs économiques

Les indicateurs économiques choisis sont les coûts des intrants, les frais de mécanisation spécifiques à la fertilisation, la main d'œuvre et la marge directe (marge brute – les charges de structures spécifiques à la production).

Dans notre cas, cette dernière est calculée de la manière suivante :

- Produit des cultures (PC) = rendement*prix de vente + primes directes aux cultures.
- Charges opérationnelles et de structures spécifiques fertilisation (COSSF)= intrants (engrais, semences, phytosanitaires) + matériel de traction + main d'œuvre + matériel d'épandage + matériel de positionnement (GPS, boîtier) + analyses de sols.
- Marge directe (MD) = PC – COSSF.

Le matériel d'épandage des engrais variant selon les pratiques (uniforme ou modulation), nous avons choisi de retenir cette charge spécifique. Les performances de ces matériels étant différentes nous avons été amenés à prendre en compte les frais de traction ainsi que la main d'œuvre. Les charges qui leurs sont affectées ainsi que celles des intrants ont été établies par hectare de cultures. Les coûts des analyses de sol ont été considérées soit à hectare (cartographie des parcelles pour la modulation PK) soit réparties sur l'ensemble de l'exploitation (forfait cartographie pour la modulation PK ou coût des analyses en application uniforme).

Celles liées aux matériels spécifiques pour l'épandage ont été affectées à l'ensemble des surfaces.

Ainsi, ces dernières seront donc moins importantes quand les surfaces augmenteront.

Les hypothèses relatives au matériel d'épandage et à la traction sont issues du référentiel « Coûts d'utilisation prévisionnels des matériels agricoles 2010 » (Chambre d'Agriculture de Normandie, BCMA et CUMA, 2010)

Les coûts des matériels embarqués spécifiques à la modulation proviennent de Défisol (communication personnelle), les amortissements ont été calculés sur 5 ans.

Les données économiques qui ont servi à évaluer les itinéraires techniques proviennent de CER France (Gérer pour gagner, préparer la récolte 2010, 2009) ainsi que du bulletin de conjoncture Agreste (2011).

Simulations technico-économiques

Nous avons utilisé un logiciel de simulation économique « Olympe » qui permet de travailler à différentes échelles d'information (parcelle, système de culture et exploitation). Il s'agit d'un outil d'aide à la décision composé d'une base de données et d'un simulateur (figure 1). Il permet de construire des variantes et de les comparer. Dans notre cas, nous avons retenu les variantes suivantes :

- Trois doses d'engrais (P ou K) appliquée selon l'hétérogénéité des teneurs des sols.
- Quatre niveaux de prix des engrais (Super phosphate 46%, chlorure de potassium 60%)
- Trois systèmes de production.
- Deux ou trois dimensions de ces systèmes.

Pour le premier point, nous avons pris des valeurs moyennes d'hétérogénéité des teneurs en phosphore et potassium rencontrées dans les sols de limons (Défisol 27, communication personnelle). Ces aspects seront repris dans le référentiel technique.

Au vu des fluctuations des prix des engrais constatées ces dernières années (prix du super phosphate 46%, multiplié par 3 entre 2002/ 2003 et 2008/2009, baisse de 50% en 2009/2010, Agreste 2011), il nous est apparu important de simuler ces variations. Cela nous permettait de définir ainsi des seuils de rentabilité en fonction de ce paramètre.

Pour les dernières variantes, les systèmes de production (céréaliier, betteravier-liniculteur, patatier [consommation]) et deux ou trois surfaces agricoles utiles testées (95ha, 145ha et 240ha pour les

céréaliers, 110ha et 200ha pour les betteraviers-liniculteurs) sont imposés par les données issues du référentiel Rosace (Tableau 1).

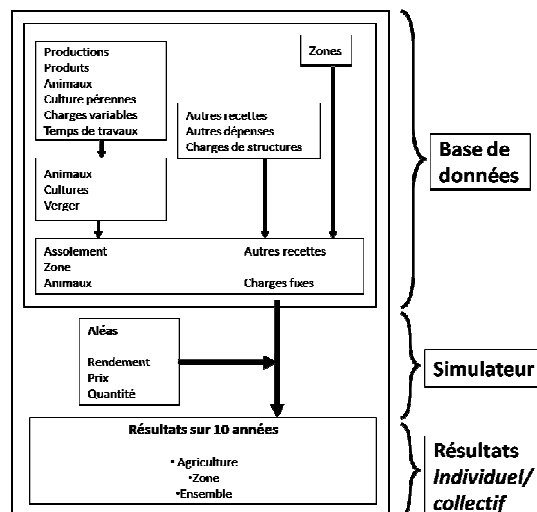


Figure 1 : Olympe un outil de recherche d'aide à la décision en économie qui est à la fois une base de données et un simulateur.

Pour simuler la rentabilité économique de matériel permettant de moduler les intrants 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 d'engrais phospho-potassique.
- Le coût des charges de structures impliquées par l'emploi de l'agriculture de précision : l'achat d'un distributeur à engrais avec débit proportionnel à l'avancement, d'un GPS, du matériel informatique pour gérer les cartes de modulation.
- Le coût d'acquisition des cartes de modulation à partir des cartes d'hétérogénéités des teneurs issues des analyses PK nécessaires par hectare.
- Les pourcentages de surface moyens en termes d'hétérogénéité des teneurs à l'intérieur des parcelles.

Résultats et discussion

L'objectif de ce travail est d'établir une méthodologie permettant de comparer la rentabilité des techniques d'application uniforme et des techniques de fertilisation de précision, en faisant varier les systèmes de cultures, les surfaces d'exploitations, le prix d'achat des engrais. Le critère économique qui nous a paru être le plus pertinent à simuler est la marge directe. Il permet de prendre en compte les charges de mécanisation qui sont le principal verrou économique au développement de l'agriculture de précision.

Avantages et limites des hypothèses économiques et techniques :

La typologie des systèmes de culture décrits dans le réseau Rosace date de 2001. Elle comprenait des surfaces en jachère et en prairies qui n'ont pas été prises en compte dans le nombre d'analyses à réaliser. Ces cultures ne sont pas considérées comme fertilisées dans nos simulations. Les surfaces en jachères ont probablement été remplacées par du blé et du colza dans les rotations actuelles. Les données concernant les systèmes de production seront mises à jour avec les résultats du recensement agricole de 2010 dont le détail n'est pas encore disponible. Cependant, les premières tendances montrent une évolution vers l'agrandissement des structures. Les systèmes de cultures utilisés pour nos simulations sont cependant cohérents avec l'évolution constatée depuis 2000 dans l'Eure : la spécialisation vers les grandes cultures, déjà importante en 2000 avec près de 50 % des exploitations moyennes et grandes, s'est encore accentuée, elle concerne désormais près de 60 % des exploitations (Agreste, 2011).

Les variations de teneurs à l'intérieur des parcelles sont exprimées en pourcentage de la surface (Tableau 2). Les différences de teneurs observées dans certaines zones de parcelles sont en liaison

avec leur historique (Llorens et al., 2010). En effet, l'agrandissement des parcelles suite aux remembrements successifs a regroupé au sein de grandes entités de surface des anciennes prairies voire des anciens vergers dont le passé de fertilisation sont très différents de ceux pratiqués en grandes cultures (Llorens et al., 2010). Un taux d'hétérogénéité élevé se caractérise par une représentation importante des valeurs extrêmes des teneurs par rapport à la moyenne. Plus le niveau d'hétérogénéité des teneurs au sein d'une parcelle est élevé, plus la modulation intraparcellaire de la fertilisation peut se justifier.

Dans la méthodologie mise au point dans ce travail, nous avons choisi, par souci de simplification de prendre des taux moyens d'hétérogénéités intraparcellaires observées dans l'Eure et répartis dans trois classes de teneurs (Tableau 2). La précision des données d'hétérogénéité dont nous disposions ne nous permettait pas de tenir compte des 7 classes que comporte la nouvelle grille du COMIFER.

Concernant le calcul des doses de P et de K à apporter en fonction des teneurs dans les différentes zones des parcelles, il nous a fallu prendre des hypothèses simplificatrices :

- Pour tenir compte du passé récent de fertilisation nous nous sommes fondés sur l'étude d'une seule rotation pour chaque système de production : colza – blé – pois – escourgeon pour les céréaliers, betterave – blé – pois – blé – lin – blé – escourgeon pour les betteraviers, Betterave – pomme de terre – blé – lin – blé – pois – blé pour les producteurs de pomme de terre.
- Nous avons pris en compte des rendements moyens des productions (grains pour les céréales) par parcelle et nous avons considéré que tous les résidus étaient enfouis.
- Les coefficients multiplicateurs retenus correspondent aux trois classes de teneurs suivantes : $< T_{renf}$, $T_{imp} - 10\%/T_{imp}$ et $T_{imp} + 10\%/2 \times T_{imp}$.
- La fertilisation est appliquée annuellement. Pas de blocage de fumure sur certaines cultures.
- Les résultats des calculs des doses à apporter sont utilisés au kilogramme près dans les simulations.

Dans la réalité, il n'existe pas ou très peu d'exploitations n'ayant qu'un seul type de rotation cependant cela a très peu d'influence sur la répartition des surfaces de l'assolement. Dans la pratique, les exploitants ont souvent tendance à bloquer les fumures sur cultures exigeantes. De même, pour optimiser la gestion opérationnelle du temps de travail, les valeurs issues du calcul des doses ne sont pas appliquées à l'unité près. Certains céréaliers exportent leurs pailles ce que nos simulations ne prennent pas en compte.

Malgré les limites que nous venons d'énoncer, nous avons des hypothèses de travail techniques pour nos simulations qui paraissent proches des conditions opérationnelles du raisonnement de la fertilisation en systèmes de grandes cultures.

Tableau 2 : Hypothèses des niveaux moyens d'hétérogénéité intra parcellaire observés dans l'Eure en phosphore et potassium.

hétérogénéité	teneur < T Renf	teneur moyenne	teneur > Timp
Phosphore	13%	37%	50%
Potassium	9%	41%	50%

Ayant pour objectif d'évaluer l'incidence du surcoût des matériels spécifiques à la modulation des engrais sur la rentabilité des systèmes, il nous fallait obtenir des informations sur les prix d'acquisition de ce type de matériel. Les gammes étant relativement larges et les constructeurs pratiquant des prix différents, nous avons choisi de nous baser sur le référentiel établi par la Chambre d'Agriculture de Normandie (cf. indicateurs économiques).

D'autre part, nous avons pris pour hypothèse que le distributeur d'engrais en agriculture uniforme était identique pour l'ensemble des systèmes et des surfaces d'exploitation.

Les matériels retenus présentent les caractéristiques suivantes :

- Agriculture uniforme : cuve 12 à 18hl bidisques 12 à 28 m, 4600€, 5ha/h
- Modulation des engrais : cuve 25hl porté, Débit Proportionnel A l'Avancement, 24 à 36m, 9700€, 10ha/h

Les taux d'amortissement pour ces matériels sont de 15% sur 10 ans. Les distributeurs d'engrais ont des performances différentes (surfaces traitées par heure) ce qui a des incidences sur les débits des chantiers. C'est pourquoi, nous avons retenu les coûts de traction. Nous avons choisi d'intégrer éga-

lement la main d'œuvre qui peut être salariée ou non selon les systèmes. En effet, les agriculteurs s'interrogent de plus en plus souvent sur les conséquences de la mise en place de nouvelles techniques de production ou technologies sur leur charge de travail (Bourgain et Michaud, 2006). Le coût horaire pris en compte s'élève 15€ (base main d'œuvre salariée).

Nous avons ainsi retenu dans nos simulations les coûts d'épandage pour l'ensemble des engrais y compris l'azote, le matériel étant également utilisé pour cet élément.

Dans un contexte de fluctuation des prix des intrants, nous avons retenu quatre niveaux de prix des engrais. Nos hypothèses reposent sur les données obtenues dans le bulletin de conjoncture Agreste 2011. Elles reprennent les variations importantes (à la hausse ou à la baisse) constatées ces dernières années (Tableau 3). Il s'agit des prix moyens observés sur la campagne. La référence à 1997/1998 reprend les valeurs les plus basses depuis 13 ans (dernières données d'Agreste 2011). Ces simulations nous permettront de dégager des tendances sur les conditions de rentabilité de la modulation PK.

Tableau 3 : Prix des engrais (€/kg unité fertilisante). Source : Agreste, 2011.

	2009/2010	2008/2009	2002/2003	1997/1998
Nitrate d'ammonium (33,5%N)	0.82	1.31	0.61	0.54
Super phosphate (46% P2O5)	0.68	1.47	0.50	0.48
Chlorure de potassium (60%)	0.74	0.97	0.35	0.29

Afin d'étudier l'intérêt économique de l'application localisée de la fertilisation PK, il s'agira de, non pas de baser notre analyse sur les résultats de marges directes dans l'absolu obtenus à partir des simulations ce qui n'aurait pas réellement de sens, mais bien de discuter les résultats relatifs des variations constatées entre l'agriculture uniforme et l'agriculture de précision.

C'est pourquoi, même si certains choix peuvent être discutables (coût d'épandage de l'azote, variation des prix du nitrate d'ammonium par exemple), ils n'ont pas d'impact sur le différentiel de marge directe.

Résultats des simulations :

Les premiers résultats montrent que, quel que soit le système de production, la fertilisation de précision dégage des marges directes supérieures à celles obtenues en l'application uniforme des engrais. Les gains de marge directe varient entre 8 et 27 €/ha suivant les cas (Tableau 4). Ils sont essentiellement dus aux quantités moindres d'engrais épandus (unité fertilisante) qui varient de 1 à 4 tonnes par système et par an (figure 2a).

La variation du poste « autres charges spécifiques » en faveur de la modulation des apports d'engrais P et K est due principalement à l'utilisation de matériels plus performants. Ces résultats confortent nos hypothèses de travail en matière d'optimisation des débits de chantier (coût de traction et temps de travail). Le surcoût de la fertilisation de précision lié au matériel d'épandage spécifique (performance de l'épandeur et électronique embarquée) ainsi que celui lié à la démarche analytique nécessaire à la caractérisation de l'hétérogénéité sont plus que couverts par les gains engendrés puisque la variation de marge directe reste toujours positive (Tableau 4).

Tableau 4 : Rentabilité de la fertilisation de précision par rapport à l'application uniforme pour différents systèmes de culture sur la base du prix des engrais 2009-2010.

en €	Céréaliers						Betteravier-liniculteur				Patatier conso.	
	C1 (95ha)		C2 (145 ha)		C3 (240 ha)		BL1 (110 ha)		BL2 (200 ha)		PDT (150 ha)	
	Application uniforme	Fertilisation de précision	Application uniforme	Fertilisation de précision	Application uniforme	Fertilisation de précision	Application uniforme	Fertilisation de précision	Application uniforme	Fertilisation de précision	Application uniforme	Fertilisation de précision
Produits des cultures	102530	102530	156650	156650	260209	260209	129182	129182	236832	236832	266894	266894
Charges opérationnelles et de structure spécifiques												
engrais	19749	17485	30220	26858	50344	44618	18740	17149	34236	31255	29646	26672
dont P	3467	2354	5300	3645	8813	6021	3142	2324	5735	4234	4544	3322
dont K	2887	1735	4407	2700	7315	4381	4417	3645	8119	6639	8402	6651
semences	6569	6569	10007	10007	16541	16541	12196	12196	22440	22440	33439	33439
traitements	17481	17481	26724	26724	44430	44430	16545	16545	30224	30224	30005	30005
autres charges	4296	3555	6570	5436	10933	9039	4623	4042	8456	7400	7619	6773
total	48095	45090	73521	69025	122248	114628	52104	49932	95356	91319	100709	96889
Marge semi-directe	54435	57440	83129	87625	137961	145581	77078	79250	141476	145513	166185	170005
Autres charges de structure spé.	611	2085	741	2085	791	2085	691	2085	791	2085	611	2085
Marge directe	53824	55355	82388	85540	137170	143496	76387	77165	140685	143428	165574	167920
Marge directe/ha	567	583	568	590	571	598	694	702	703	717	1104	1119
Gain ou perte/ha (1)	16		22		27		8		14		15	

(1) gain ou perte /ha = marge directe /ha fertilisation de précision - marge directe /ha application uniforme

Les résultats des systèmes de production fondés sur les céréales montrent une meilleure rentabilité que ceux comportant des pommes de terre ou des betteraves. Pour les premiers le gain de marge directe varie entre 16 et 27 €/ha en fonction de la taille de l'exploitation (Tableau 4). Tandis que pour les deux autres, ce gain ne dépasse pas 15 €/ha (figure 2). Cela provient d'économie d'engrais moindres dans les systèmes avec betteraves et pomme de terre. Une analyse approfondie du poste « engrais » fait apparaître que ces économies sont majoritairement observées sur céréales à pailles. Le blé et l'escourgeon représentent 65 à 98% des quantités de phosphore et de potassium qui n'ont pas été épandues en adaptant la répartition des engrais à l'hétérogénéité intraparcellaire. Ce sont des cultures à faibles exigences sur lesquelles il est possible de réaliser des impasses. Dans nos hypothèses concernant les rotations le blé et l'escourgeon sont intercalés entre les autres cultures et on réalise généralement l'impasse dans les zones à teneurs élevées. Ceci réduit fortement les quantités épandues car ces zones représentent 50% de l'hétérogénéité (Tableau 2).

Cependant dans cette première approche, les classes de teneurs choisies ne prennent pas en compte des teneurs des sols très élevées (2xTimp, 3xTimp) au delà desquelles il est possible de réduire la fertilisation pour les cultures les plus exigeantes. Il conviendra pour les suites à donner à ce travail, de quantifier en termes de pourcentage de surface les zones à très fortes teneurs et de calculer l'influence que cela pourra avoir sur le résultat final à l'échelle de l'exploitation.

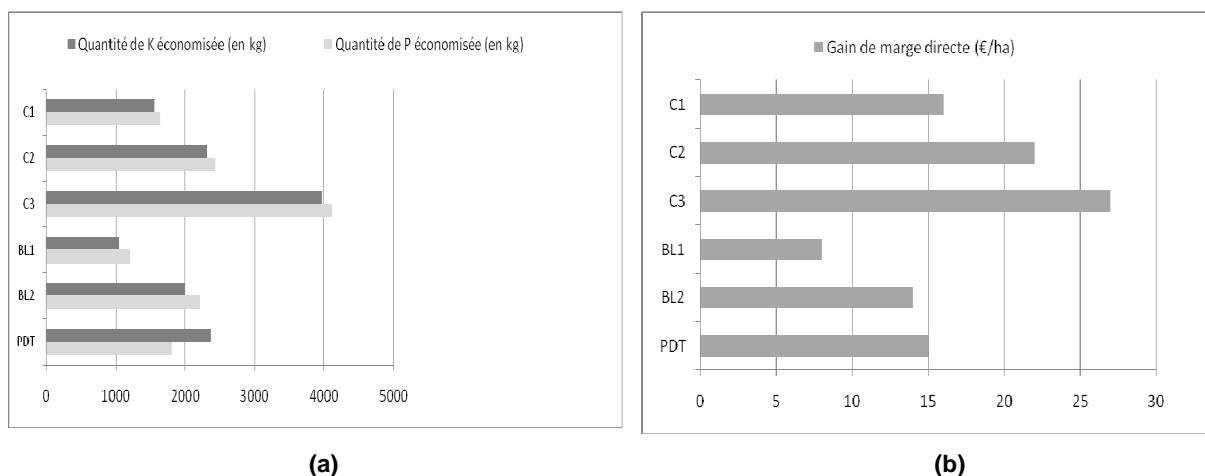


Figure 2 : Quantités d'engrais économisées (en Kg) grâce aux techniques d'épandage de précision (a) et gains de marge directe (en €/ha) par système de production (b).

Les résultats présentés sont fondés sur des prix d'engrais moyens observés ces dernières années (campagne 2009/2010). Les différents prix simulés montrent des variations plus ou moins importantes du différentiel de marge directe. Plus les prix des engrais sont importants (campagne

2008/2009), plus le gain est élevé (de 18€/ha à 44€/ha selon les systèmes). Par contre dans le cas de prix bas (2002/2003 ou 1997/1998), le gain constaté peut être relativement limité (de 0€/ha à 15€/ha selon les systèmes). En deçà de ces références, la fertilisation de précision peut être remise en cause principalement pour les systèmes de dimension moindre (céréaliier 95ha et betteravier 110ha), la diminution du coût des engrais ne couvrant pas le surcoût lié aux matériels spécifiques. Toutefois, les perspectives d'évolution (prix campagne 2010/2011 Agreste 2011, CER France 2011), présentent une augmentation continue des prix des engrais. La modulation de la fertilisation montre ainsi tout son intérêt dans ce contexte.

D'un point de vue environnemental, ce sont les quantités de phosphore qui prendront potentiellement une importance vis à vis de l'eutrophisation des cours d'eau. Le potassium quant à lui n'a pas d'impact significatif sur l'environnement.

Conclusion et perspectives

La méthodologie mise au point dans ce travail a démontré son intérêt dans le cadre d'une vision globale des impacts technico-économiques de changements de pratique, ici l'introduction de la fertilisation de précision pour P et K. Cependant, le paramétrage de ce type de simulateur reste long et fastidieux. Il doit être le résultat d'une recherche approfondie sur les hypothèses techniques et économiques à prendre en compte. Cet outil peut être utilisé par des organismes de conseil qui cherchent à avoir une vision prospective de changement d'outils ou de pratiques agricoles et à simuler des contextes de prix fluctuants.

Notre méthodologie a permis de dégager des premiers arguments pour démontrer l'intérêt économique de l'agriculture de précision dans les conditions pédoclimatiques de l'Eure. Ainsi, en appliquant la modulation des engrais phospho-potassiques, on diminue les quantités appliquées à l'échelle du système de culture et on augmente la marge directe quel que soit le système considéré dans des conditions de prix de 2009-2010.

Cette méthodologie a montré sa robustesse sur des cas types et peut potentiellement être transférée à des cas réels. Ceci devrait être réalisé à partir de 2012 dans le cadre du projet de recherche collaborative FERTIPREC financé pour partie par la région Haute-Normandie. Ce travail sera issu d'une collaboration entre l'Esitpa, les chambres d'agriculture 27 et 76, la coopérative Capseine, la société Défisol et coordonné par Nov&atech. Dans ce cadre est prévue la réalisation d'un référentiel technique concernant les matériels disponibles pour la fertilisation de précision.

Les perspectives à plus long terme de ce travail sont, d'une part, d'étendre l'étude à la fertilisation azotée dans laquelle il faudra introduire l'utilisation de pulvérisateur qui permet de moduler les apports en engrais liquide, et, d'autre part, de simuler des externalités environnementales telles que le potentiel de pollution à partir des excès de fertilisation notamment en azote.

Ainsi, nous serons en mesure d'offrir un grand nombre de critères de décision pour les conseiller en agriculture et les décideurs politiques sur des zones sensibles telles que les bassins d'alimentation de captage.

Remerciements :

Ce travail 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.

Bibliographie

ATHERTON B.C., MORGAN M.T. SHEARER S.A., STOMBAUGH T.S. and WARD A.D. (1999). Site-specific farming : a perspective on information needs benefits and limitations. *Journal of soil and water conservation* 54 (2), 455-460.

BOURGAIN O. and 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, France 7th – 8th April 2006.

Chambre d'agriculture Normandie, BCMA, CUMA, (2010), Coûts d'utilisation prévisionnels des matériels agricoles.

- HAEFELE, S.M. and 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* 270: 57–72.
- KOCH, B., KHOSLA, R., FRASIER, W. M., WESTFALL, D. G. and INMAN D. (2004). Economic Feasibility of Variable-Rate Nitrogen Application Utilizing Site-Specific Management Zones. *Agron. J.* 96:1572–1580.
- LINK, J., GRAEFF, S., BATCHELOR W. D. and CLAUPEIN W. (2006). Evaluating the economic and environmental impact of environmental compensation payment policy under uniform and variable-rate nitrogen management. *Agricultural Systems* 91: 135–153.
- LLORENS J-M (2001). La méthode de raisonnement de la fertilisation PK: un outil pour l'agriculture. COMIFER-GEMAS, 5ème Rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre, Blois, France, p.99-108.
- LLORENS JM., PERRIN O. and 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". 2010. p. 57-76. Faculty of Production Engineering Warsaw University of Life Sciences.
- MELAKEBERHAN, H. and AVENDAÑO, F. (2008). Spatio-temporal consideration of soil conditions and site-specific management of nematodes. *Precision Agric* 9: 341–354.
- Robert, P. C., 2002. Precision agriculture: a challenge for crop nutrition management. *Plant and Soil* 247: 143–149.
- SARTORI, L., BASSO, B., BERTOCCO, M., and OLIVIERO, G. (2005). Energy Use and Economic Evaluation of a Three Year Crop Rotation for Conservation and Organic Farming in NE Italy. *Biosystems Engineering* 91: (2) 245–256.
- SWINTON SM, and LOWENBERG-DEBOER J. (1998). Evaluating the profitability of site-specific farming, *Journal of precision agriculture* 11 (4), 439-446