

Intérêts de l'utilisation conjointe des modèles CERES et AZODYN pour raisonner la modulation de la fertilisation azotée

A. JULLIEN, R. ROCHE, M.-H. JEUFFROY, B. GABRIELLE, P. HUET

Version provisoire

Introduction

Les objectifs affichés de l'AP sont d'augmenter la rentabilité de la production (réduction des intrants) et d'en limiter les impacts environnementaux en ajustant « au mieux » les apports d'intrants aux besoins de la culture. Le principe de la démarche est le suivant : les propriétés du sol (teneur en matière organique, réserve utile, pierrosité...) conditionnent pour partie la croissance et le rendement de la culture. Les pratiques culturales (densité de semis, fertilisation, traitements phytosanitaires...) sont raisonnées en fonction de ces propriétés. Si les caractéristiques du sol sont hétérogènes sur une parcelle, il convient en conséquence de moduler les pratiques en fonction de cette hétérogénéité. Cependant, le fonctionnement de la culture, le rendement et la qualité de la production dépendent également des interactions multiples avec de nombreux autres facteurs tels que le climat, les maladies ou les techniques culturales dont il faut tenir compte. Pour cela, les modèles de culture intégrant les interactions entre plusieurs facteurs limitants, semblent être des outils pertinents. Leur puissance de calcul ainsi que leur caractère dynamique permet de (i) rendre compte de l'effet de plusieurs facteurs du milieu et de leurs interactions sur l'élaboration du rendement (ii) évaluer des stratégies de conduite des cultures, notamment la fertilisation azotée, en tenant compte des interactions sol*climat (simulations sur des séquences climatiques de 10, 20 ou 30 années).

Néanmoins, l'utilisation des modèles de culture en agriculture de précision pose la question de la précision des modèles. En effet, la valeur prédictive des modèles est généralement de l'ordre de 20% ce qui équivaut souvent à l'ordre de grandeur des hétérogénéités intra-parcellaires. Est-il légitime de les utiliser à l'échelle intra-parcellaire et jusqu'à quelle échelle de précision peut-on descendre? Des études ont déjà montré la pertinence d'utiliser les modèles de culture à l'échelle de la zone ou d'une maille (selon un

maillage régulier) pour rendre compte de l'hétérogénéité intra-parcellaire (Cora *et al.*, 1999; Basso *et al.*, 2001; Batchelor *et al.*, 2002; Baxter *et al.*, 2003). Mais il n'est pas proposé de comparaison de la précision des modèles à différentes échelles de simulation. Dans ce papier, nous proposons dans une première partie de comparer deux échelles de simulation :

1. simulations point à point selon une grille de résolution de 40m. Les simulations seront comparées à des cartes de LAI et de rendement
2. simulation à l'échelle de la zone : les simulations ont été effectuées sur chaque unité cartographique de sol identifiée sur la parcelle, chaque zone étant considérée comme une mini parcelle.

Par ailleurs, les modèles de culture ne rendent compte que de l'effet des facteurs limitant qu'ils considèrent. Pour pouvoir simuler l'hétérogénéité des rendements au sein d'une parcelle, il faut donc connaître les bons facteurs limitants à l'origine des hétérogénéités spatiales et utiliser le bon modèle. Cependant, dans la plupart des situations, les facteurs limitants ne sont pas connus a priori. Une manière d'augmenter le nombre des facteurs limitant pris en compte, sans augmenter la complexité des modèles, est d'utiliser conjointement les simulations de plusieurs modèles intégrant des facteurs limitants différents (Draper, 1995; Paz *et al.*, 2001; Batchelor *et al.*, 2002). Nous faisons l'hypothèse qu'en utilisant plusieurs modèles dont on suppose qu'ils sont complémentaires (parce qu'ils répondent à des objectifs différents, qu'ils intègrent des processus différents et fournissent des variables de sortie différentes), on peut enrichir l'information disponible pour effectuer un diagnostic sur l'hétérogénéité des cultures et raisonner la modulation de la fertilisation.

Cette hypothèse sera testée dans une deuxième partie, en confrontant et combinant sur une parcelle donnée et connue, l'information fournie par les modèles CERES et AZODYN pour définir des stratégies de modulation de la fertilisation azotée. L'utilisation conjointe de ces deux modèles nous semble intéressante car les sorties privilégiées de ces modèles sont complémentaires. Le modèle AZODYN a été conçu pour raisonner la fertilisation azotée (optimisation des dates et doses d'apports) en fonction d'un rendement objectif. Il intègre notamment une simulation mécaniste de l'élaboration de la teneur en protéines des grains. Le modèle CERES a été conçu pour l'évaluation du bilan environnemental des cultures, il intègre l'ensemble des phénomènes en rapport avec l'azote jouant sur l'impact environnemental de la culture et prend en compte, en outre, l'effet du stress hydrique. Les objectifs et les sorties complémentaires de ces deux modèles seront mis à profit pour construire et comparer deux stratégies de fertilisation, l'une modulée, l'autre non modulée. L'efficacité des deux stratégies sera confrontée à l'effet de la variabilité interannuelle du climat, de la nature et de la surface respective des sols en présence

Matériels et méthodes

Description des modèles

CERES

CERES-blé (Ritchie et Otter, 1984) est un modèle dynamique de simulation des cycles de l'eau, du carbone et de l'azote dans le système sol-plante selon un pas de temps

journalier. Il a été conçu pour l'évaluation du bilan environnemental des cultures et est constitué de modules décrivant les processus majeurs à prendre en compte. Un module physique simule les transferts de flux de chaleur, eau et nitrates dans le sol, ainsi que l'évaporation du sol, l'absorption d'eau par la plante et sa transpiration en fonction de la demande climatique. Un module microbiologique décrit le turnover du carbone et de l'azote organique via les processus de nitrification et de dénitrification (Gabrielle *et al.*, 1995; Gabrielle et Kengni, 1996). Un troisième module comprend tous les processus de croissance et développement de la plante en fonction de la température, du rayonnement incident et de la disponibilité en azote du sol. Le modèle permet de simuler l'effet d'un stress azoté et d'un stress hydrique sur le fonctionnement de la culture via des coefficients de réflexion qui agissent soit sur la production de biomasse par photosynthèse soit sur la croissance en surface des organes. Les sorties du modèle considérées dans cette étude ont été principalement : le rendement et la teneur en azote des pailles à la récolte. Ces variables permettent de juger du fonctionnement de la culture à la fois en terme de quantité et d'impact environnemental potentiel (plus la teneur en azote des pailles à la récolte est importante, plus le risque de lessivage à l'automne suivant est élevé).

AZODYN

AZODYN (Jeuffroy et Recous, 1999) est un modèle dynamique de fonctionnement du système sol-plante spécifiquement conçu pour le raisonnement de la fertilisation azotée du blé. Il calcule la date d'entrée en carence du peuplement pour une culture de blé d'hiver dans les conditions climatiques du nord-ouest de l'Europe. Il confronte à chaque pas de temps la fourniture en azote du sol aux besoins de la culture sur la période pendant laquelle la fertilisation azotée est usuellement appliquée (sortie hiver – floraison). Le module sol calcule la fourniture en azote du sol en appliquant une version dynamique de la méthode du bilan. Le module plante simule les besoins de la culture à partir de la courbe de dilution du blé et de la biomasse produite calculée en fonction du rayonnement intercepté. Le modèle comprend également un module de simulation mécaniste de la teneur en azote des grains (Girard, 1997; David *et al.*, in press) mais ne contient pas de module hydrique permettant de prendre en compte un stress hydrique. Les sorties du modèle utilisées pour cette étude ont été : le rendement et la teneur en azote des grains.

Comparaison de deux échelles de simulation de l'hétérogénéité intra-parcellaire du rendement

L'objectif dans cette partie est de comparer deux échelles de simulation de l'hétérogénéité intra-parcellaire des rendements : l'échelle du point avec une résolution de 40m et l'échelle de la zone de sol.

Dispositif expérimental

La parcelle expérimentale est située sur la Ferme expérimentale de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Thiverval-Grignon, France (48.9° N, 1.9° E). Cette parcelle de 15 ha a été plantée en blé pour l'année 1999-2000. L'objectif premier de l'expérimentation était de tester l'efficacité de différents traitements fongicides. A cet effet, deux dates de semis, deux densités et deux variétés (Isengrain, Soisson) ont été considérées. Le dispositif

expérimental est détaillé dans Boissard *et al.*(2001). La fertilisation azotée suivie a été réalisée en deux apports sur l'ensemble de la parcelle (60U le 6 mars 2000 et 60U le 8 avril 2000).

Caractérisation des sols

La parcelle comprend 3 unités de sol : une zone de bordure de plateau constitué de sol limoneux calcaire sur substrat de calcaire marneux, une zone de pente de sol sableux sur substrat calcaire sableux et une zone de bas de pente de colluvions limoneuses épaisses sur substrat de craie (Vasse, 2001). La variabilité intra-parcellaire des propriétés physico-chimiques du sol a été évaluée par des sondages selon un plan d'échantillonnage systématique de 40 m de résolution (King, 1976). Chaque prélèvement (178 au total) a été subdivisé en horizons et un échantillon de chaque horizon a été envoyé au laboratoire pour analyse des propriétés physiques et chimiques (texture, teneur en C et N, pH). Les analyses ont permis de calculer les propriétés moyennes de chacune des 3 unités de sol.

Mesures

Une cartographie du LAI vert (GLAI) a été réalisée à partir de mesures de radiométrie (rouge et proche infrarouge) collectées par des capteurs embarqués sur un tracteur (Boissard *et al.*, 2001) le 8 juin 2000 au stade de développement 70 (Zadoks *et al.*, 1974). La largeur de la barre de mesure de réflectance est de 4 m alors que la distance entre deux passages de roues est de 6 m. Certaines zones de la parcelle n'ont donc pas été directement mesurées.

Une carte de rendements a également été réalisée au moyen d'un quantimètre relié à un ordinateur de bord ACT et un GPS Racal embarqués sur une moissonneuse-batteuse CLAAS équipée d'un module LEM. La largeur de la barre de coupe est de 6 m. A partir des mesures brutes de GLAI et de rendements, une valeur moyenne a été obtenue tous les 5 m le long des passages de roues par interpolation.

Simulations du modèle

Dans cette partie, seul le modèle CERES a été utilisé. Deux échelles de simulation ont été testées : simulations en chaque point d'échantillonnage des sols et simulations pour chaque unité de sol. Une simulation de CERES-blé a été réalisée pour chaque profil de sol échantillonné dans la parcelle, au centre de chaque maille de la grille. Les propriétés physiques et microbiologiques des différents horizons de chaque profil ont été estimées à partir des résultats des analyses de sol et selon la procédure décrite dans Gabrielle *et al.* (2001). Les données météorologiques nécessaires aux simulations ont été mesurées par une station météo située à moins de 1km de la parcelle, et à chaque point de simulation a été associé les techniques culturales correspondantes (variété, date de semis, densité, fertilisation). La liaison entre le modèle CERES et le logiciel de SIG ArcView 3 (ESRI) a été assurée selon une méthode similaire à celle décrite dans Engel *et al.* (1997). La comparaison entre simulations et mesures a été faite par jointure spatiale entre les simulations et le point localisé au centre des rectangles où ont été obtenus les enregistrement de GLAI et de rendement.

Une deuxième série de simulations a été réalisée pour chacune des 3 unités de sol délimitées sur la parcelle. Pour chaque zone, le modèle a utilisé les données moyennes de caractéristiques physico-chimiques du sol fournies par les analyses. Les rendements simulés

ont été comparés aux rendements mesurés par quantimètre et moyennés à l'échelle de la zone de sol dans ArcView 3.

Utilisation combinée des modèles AZODYN et CERES pour la conception de stratégies de fertilisation azotée

L'objectif dans cette partie est d'acquérir des informations sur les types de parcelle potentiellement intéressantes pour la modulation intra-parcellaire de la fertilisation azotée. Pour cela deux critères ont été considérés :

- la nature des sols en présence sur la parcelle : on jouera notamment sur le niveau d'hétérogénéité entre les unités de sol (texture, profondeur, réserve utile, substrat...). Afin de pouvoir extrapoler les résultats obtenus à d'autres parcelles du site expérimental, on a tenté de travailler avec une gamme de types de sols représentative des sols majoritairement décrits sur le site de Grignon

- la surface respective de chaque unité de sol dans la parcelle

Construction de «parcelles virtuelles»

Les trois unités de sol identifiées sur la parcelle expérimentale précédente ne représentent qu'une partie de la séquence pédologique décrite à Grignon selon un transect nord-est/sud-ouest passant par cette parcelle (Vasse, 2001). On a donc considéré une unité de sol supplémentaire constituée de colluvions argilo-limoneuses profondes des plateaux sur un substrat de calcaire marneux. Cette zone est adjacente à la parcelle expérimentale précédente et permet d'élargir la gamme de types de sol étudiée. A partir de ces 4 unités, on a construit 2 parcelles virtuelles ayant des niveaux d'hétérogénéité différents (substrat, profondeur, réserve utile). Dans une première approche et par souci de simplification, les parcelles n'ont été constituées que de 3 zones de taille équivalente (3 ha) et dont les propriétés sont données dans le Tableau 1 :

- parcelle virtuelle 1 : zones « Bas de pente » + « Pente » + « Bord de plateau »

- parcelle virtuelle 2 : zones « Bas de pente » + « Pente » + « Plateau »

Tableau 1. Propriétés texturales moyennes de la couche arable 0-60 cm, profondeur et réserve utile des 4 zones de sol

	Bas de pente	Pente	Bord de plateau	Plateau
% argile	26	26	26	23.2
% limon	47	47	47	69.2
Profondeur (cm)	110	70	105	120

Réserve utile (mm)	124.7	79.5	123	153
Substrat	Craie	Calcaire sableux	Calcaire marneux	Calcaire marneux, dur

Evaluation des modèles CERES et AZODYN

2 critères d'évaluation des modèles ont été considérés:

- la valeur prédictive des modèles : a-t-on une bonne prévision de la valeur absolue de la variable de sortie ?
- la cohérence des simulations des deux modèles : les 2 modèles permettent-ils de classer les 4 zones de sol dans le même sens ?

Pour légitimer l'utilisation couplée des deux modèles pour le raisonnement de la fertilisation azotée, il faut que les modèles décrivent correctement le fonctionnement azoté de la culture. Pour l'évaluation, on a donc considéré deux variables de sorties en relation avec la gestion de l'azote par la plante: le rendement et la teneur en protéines. Des données expérimentales obtenues en 1999 sur les 4 zones de sol plantées en blé ont été utilisées. Sur les zones Bas de pente, Pente et Bord de plateau, la fertilisation azotée a été réalisée en 2 apports pour une dose totale de 120 unités : 60U le 26/02/1999 et 60U le 05/05/1999. Une carte de rendement a été établie à la récolte selon le même protocole que celui décrit pour la parcelle expérimentale suivie en 2000. Les rendements moyens par zone ont été calculés sous ArcView 3. Sur la zone Plateau, 240 unités d'azote ont été apportées en 3 apports : 60U le 11/03/1999, 100U le 06/04/1999 et 80U le 18/05/1999. Le rendement a été mesuré manuellement sur 6 placettes de 0.25 m² à la récolte. Des échantillons ont été prélevés pour mesurer la teneur en protéines des grains à partir de la teneur en azote total mesurée selon la méthode Dumas (teneur en azote total = 5.75 * teneur en protéines). Les simulations des modèles CERES et AZODYN ont été réalisées en utilisant les caractéristiques physico-chimiques moyennes de chaque zone de sol (Tableau 1) et les données climatiques nécessaires fournies par une station météo localisée à moins de 1 km des 4 zones.

L'évaluation des simulations de teneur en protéines n'est donc possible que pour une seule valeur expérimentale (zone Plateau). Ces résultats ne permettront donc pas de tirer des conclusions sur la valeur prédictive des deux modèles quant à cette variable de sortie mais de tester la cohérence des simulations entre les 2 modèles. Dans la suite de l'étude, la valeur de teneur en protéines présentée dans les figures sera celle calculée par AZODYN dont le module de calcul de la teneur en protéines a été évaluée par ailleurs (David *et al.*, in press).

Construction de stratégies de modulation de la fertilisation azotée

La démarche générale pour définir des stratégies de fertilisation azotée au moyen de CERES et AZODYN est schématisée dans Figure 1. La modulation a été raisonnée à l'échelle de la zone de sol : une dose de fertilisation azotée optimale a été calculée pour chacune des 4 zones étudiées. Pour cela, le rendement potentiel de chaque zone a été estimé par le premier quartile des rendements simulés par CERES en conditions azotées non limitantes (240U) sur

une série climatique de 15 ans allant de 1987 à 2002, l'année 1996 ayant été supprimée. Cette année a été considérée comme exceptionnelle et non représentative à cause du très faible niveau de pluviométrie enregistré (382 mm). Les simulations de rendement obtenues étaient inférieures à 50 q/ha et n'ont pas été retenus dans le calcul du rendement potentiel.

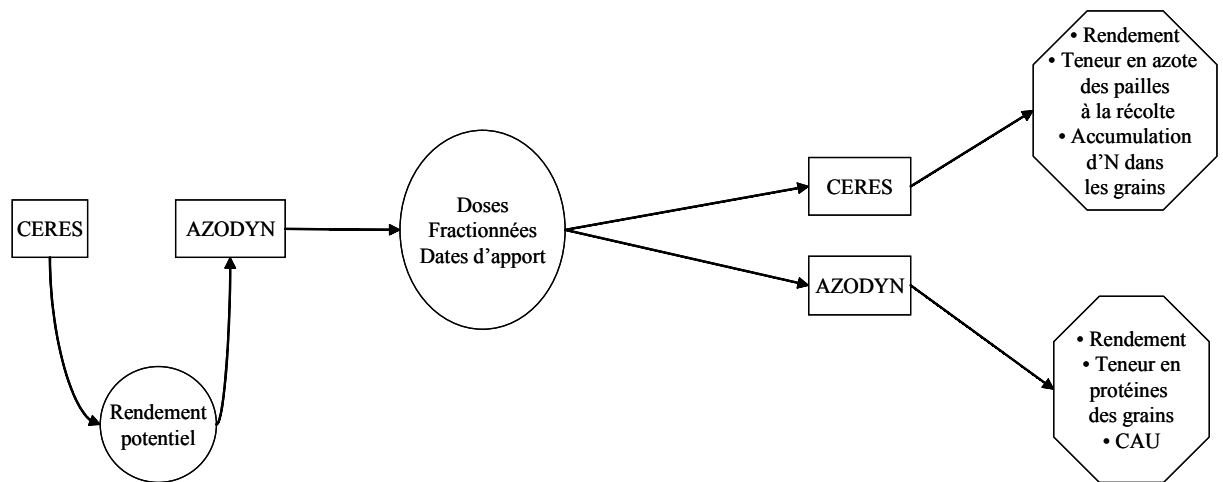


Figure 1. Utilisation couplée des modèles CERES et AZODYN pour la modulation de la fertilisation azotée

Les rendements potentiels obtenus ont été utilisés dans AZODYN en tant que rendements objectifs afin de définir les dates et les doses d'apport d'azote optimales pour atteindre ces rendements en l'absence de facteurs limitants autre que l'azote. Pour cela, on a testé différentes doses et retenu celle qui permettait d'atteindre le rendement objectif, puis testé différentes dates d'apport et retenu celles qui donnaient les résultats les plus satisfaisants par rapport aux objectifs fixés. Les doses et dates ainsi déterminées ont été utilisées en données d'entrée des modèles CERES et AZODYN pour calculer pour une année climatique donnée les variables de sorties étudiées : rendement, teneur en protéines, teneur en azote des pailles.

Définition d'une fertilisation conventionnelle de référence pour l'évaluation de la modulation

La modulation a été comparée à une fertilisation conventionnelle non modulée. La définition de la stratégie non modulée (référence) peut influencer le résultat de la comparaison. Si on définit une fertilisation intensive considérant comme rendement objectif de la parcelle, celui de la zone de plus fort potentiel rendement, on va surévaluer les bienfaits environnementaux de la modulation : en modulant, on économisera de façon systématique de l'azote sur les zones à plus faible potentiel de rendement. A l'inverse, si on définit une fertilisation « extensive », considérant comme rendement objectif de la parcelle celui de la zone de plus faible potentiel de rendement, on va surévaluer l'impact de la modulation sur le rendement : on apportera systématiquement plus d'azote aux zones de fort potentiel en modulant. Pour cette étude, nous avons considéré que la modulation de la fertilisation s'insérait dans le contexte d'une agriculture raisonnée et s'adressait à des agriculteurs déjà soucieux d'optimiser leurs apports azotés et de minimiser l'impact environnemental des cultures. Nous avons donc choisi comme rendement objectif de la parcelle, la moyenne des rendements potentiels de chaque zone. Ce rendement est celui qui s'approche le plus de celui qu'aurait choisi un agriculteur disposant des caractéristiques moyennes de sol et des rendements sur 15 ans pour la parcelle non zonée.

Evaluation de la modulation

Les sorties des modèles utilisées pour l'évaluation de la modulation ont été : les rendements des deux modèles, la teneur en azote des pailles fournies par CERES et la teneur en protéines des grains fournies par AZODYN. Les variables de sortie obtenues par zone ont été moyennées à l'échelle de la parcelle qui est l'échelle pertinente pour un agriculteur. Une marge brute a été calculée pour le facteur azote selon l'équation :

$$MB = \text{Rendement} * 10 - \text{Dose N} * 0.6 \quad \text{Equation (1)}$$

Où MB est la marge brute exprimée en euros, 10 est le prix de vente du quintal de blé en euros et 0.6 le prix d'achat d'une unité d'azote en euro.

L'évaluation de la stratégie modulée a tout d'abord été réalisée pour l'année climatique 1998-1999 pour chacune des 2 parcelles. Cette comparaison a été étendue à 15 années climatiques différentes afin d'évaluer également l'effet de la variabilité interannuelle du climat sur la modulation (de 1987 à 2002 sauf 1996).

Dans un deuxième temps, la parcelle virtuelle 2 a été utilisée pour estimer l'effet de la taille relative des différentes zones de sol d'une parcelle sur l'intérêt de la modulation. L'effet de la taille des zones a été estimé en modifiant le % de surface totale affecté à chaque zone lors des calculs des variables de sortie à l'échelle de la parcelle. Ces simulations ont été réalisées en utilisant les données climatiques de l'année 1998-1999.

Résultats

Comparaison des simulations point à point et par zone de sol

Les simulations point à point avec une résolution de 40 m montrent que le modèle permet de rendre compte dans les grandes lignes de l'hétérogénéité du rendement (Figure2) : les points simulés de fort rendement sont globalement associés aux points mesurés de fort rendement et vice-versa. Cependant, le coefficient de détermination entre rendements simulés et rendements mesurés reste très faible ($r^2 = 0.02$). La simulation du LAI au 8 juin 2000 n'est pas concordante avec la carte de LAI enregistrée par radiométrie à cette date là. On observe qu'il n'y a pas de concordance non plus entre les zones de forts LAI mesurés et les zones de forts rendements mesurés.

Lorsque les simulations sont effectuées à l'échelle de l'unité de sol, l'erreur du modèle sur le rendement est comprise entre 5 et 15% (Tableau 2) et les valeurs prédites permettent de classer les parcelles dans le même ordre que les valeurs mesurées.

Figure 2. Comparaison des simulations point à point et de la carte de rendement obtenue sur la parcelle Pont Cailloux en 2001

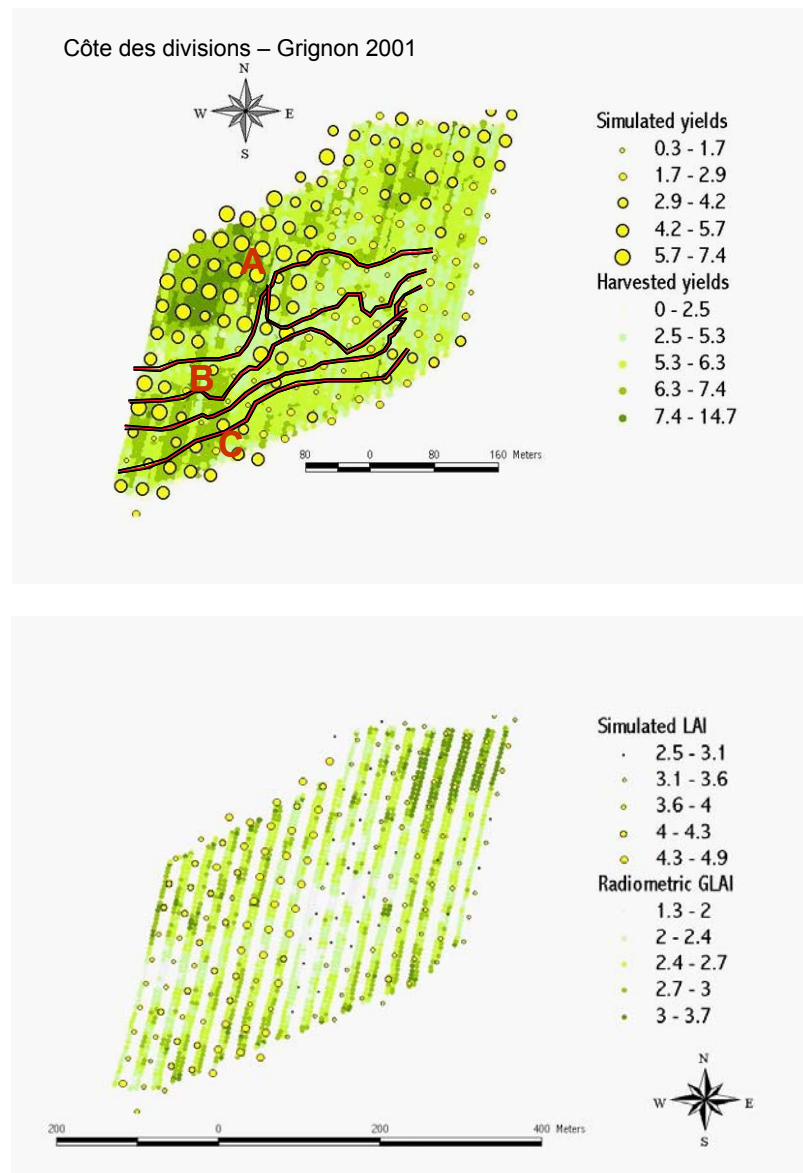


Tableau 2. Comparaison des rendements mesurés et simulés par CERES-blé par zone de sol pour l'année 1999-2000 sur la parcelle expérimentale

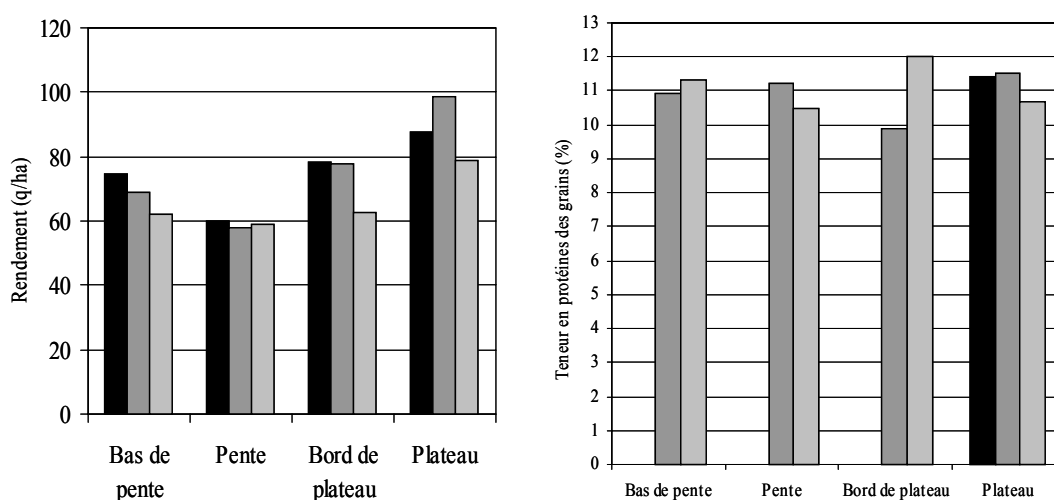
Zone de sol	Bord de plateau	Pente	Bas de pente
Rendements simulé	52.3	54.7	66.1
(q/ha)	[1.99]	[2.02]	[0.98]
Rendements observés	59.4	59.7	67.7
(q/ha)	[1.16]	[0.63]	[1.21]

Utilisation conjointe des deux modèles pour la définition d'une stratégie de modulation de la fertilisation

Evaluation des sorties des modèles de culture en 1999

Les modèles de culture CERES et AZODYN simulent le rendement pour les 4 zones de sol en 1999 avec une erreur d'environ 20% (Figure 3). CERES a tendance à surestimer les rendements alors qu' AZODYN les sous-estime. Les simulations des deux modèles sont cohérentes entre les zones de sol et permettent de les classer dans le même ordre que les observations (Plateau > Bord de plateau > Bas de pente > Pente). Ils peuvent donc être tous les deux utilisés par la suite pour raisonner la fertilisation azotée en fonction de la sortie rendement.

Figure 3. Evaluation des simulations des modèles CERES et AZODYN sur les 4 zones de la parcelle. Barres noires : valeurs mesurées, barres gris foncé : simulations CERES, barres gris clair : simulations AZODYN



Sur la zone Plateau, la teneur en protéine est simulée avec une erreur de +0.1 pour CERES et - 0.7 pour AZODYN. Les simulations des teneurs en protéines pour les autres zones ne sont pas cohérentes entre les deux modèles (notamment zone Pente) : les zones de sol ne sont pas classées de la même façon selon les simulations d' AZODYN et de CERES, et pour le bord du plateau, l'écart est supérieur à 2%.

Modulation de la fertilisation azotée sur les parcelles virtuelles en 1999

Les simulations CERES sur 15 années climatiques ont permis de calculer les rendements potentiels de chaque zone qui sont par ordre décroissant : Bord de plateau : 104.4 q/ha, Bas de pente : 100.7 q/ha, Plateau : 99.0 q/ha, Pente : 83.5 q/ha.

Les doses obtenues en prenant le rendement de 1999 comme référence sont présentées dans le Tableau 3. Les doses avec modulation se situent dans une fourchette de 140 à 210 kg N/ha, à comparer avec une valeur de 180 ou 183 kg N/ha pour les stratégies non modulées. Ces écarts relativement importants se traduisent par des différentiels de rendements appréciables sur les zones les plus extrêmes, mais au final la différence de rendement moyen sur la parcelle entre les 2 stratégies de fertilisation est de - 0.4 q/ha pour la parcelle virtuelle 1 et de seulement + 1.7 q/ha pour la parcelle virtuelle 2. De même, l'écart entre les teneurs en protéines n'est que de 0.3% pour la parcelle virtuelle 1 et de 0.5% pour la parcelle virtuelle 2, avec une valeur plus élevée avec la stratégie non modulée. Concernant la teneur en azote des pailles, pour laquelle une diminution signifie une amélioration du bilan environnemental de la culture, elle est augmentée de 0.9 kg/ha sur la parcelle virtuelle 1 et diminuée de 0.3 kg/ha sur la parcelle virtuelle 2. La marge brute azotée présente également des écarts faibles : la différence est de 5 euros/ha en faveur de la stratégie non modulée pour la parcelle virtuelle 1 et de 16 euros/ha en faveur de la parcelle modulée pour la parcelle virtuelle 2

Effet de la variabilité interannuelle du climat sur les résultats de la modulation

L'étude sur 15 années met en évidence des interactions entre hétérogénéité spatiale et climat (Tableau 4). En effet, sur 15 années, le gain de la modulation sur la marge brute azotée varie de -20.8 euros/ha à + 8.6 euros/ha pour une valeur moyenne de -3.2 euros/ha sur 15 années climatiques sur la parcelle virtuelle 1 et de -16.8 euros/ha à +16.8 euros/ha pour un gain moyen de 3.8 euros/ha sur la parcelle virtuelle 2.

Si l'on considère les valeurs moyennes sur 15 ans, les résultats sont variables en fonction des critères considérés et des parcelles. Pour la parcelle virtuelle 1, l'effet de la modulation est négatif pour le rendement (-0.3 q/ha) et la marge brute (-0.3 euros/ha); positif pour la teneur en azote des pailles (-0.6 kgN/ha). Pour la parcelle virtuelle 2, l'effet de la modulation est positif pour le rendement (+0.3 q/ha), la marge brute (+3.8 euros/ha) et la teneur en azote des pailles (-1.3 kgN/ha). Pour les deux parcelles, l'effet de la modulation sur la teneur en protéines de grains est nul.

Tableau 3. Evaluation d'une stratégie de modulation de la fertilisation azotée pour l'année 1999 par simulation. Les doses d'azote ont été calculées avec AZODYN à partir des rendements potentiels de l'année 1999 calculés par CERES pour chaque zone. Rendements et teneur en azote des pailles 1999 : calculés avec CERES ; teneurs en protéines 1999: calculées avec AZODYN. MB : marge brute relative au coût de l'intrant azote. Parcelle virtuelle 1 : zones « Bas de pente » + « Pente » + « Bord de plateau ». Parcelle virtuelle 2 : zones « Bas de pente » + « Pente » + « Plateau ». La stratégie conventionnelle a une fertilisation calée sur le rendement moyen de la parcelle simulé par CERES sur 15 années climatiques.

Fertilisation	1999	Bas de pente	Pente	Bord de plateau	Plateau	Parcelle virtuelle 1	Parcelle virtuelle 2
Modulée	Dose (kgN/ha)	190	140	210	220	180	183
	Rendement (qtx/ha)	88.7	70.0	99.3	95.2	86.0	84.7
	Teneur en protéines des grains (%)	9.7	8.5	10.9	8.7	9.7	8.9
	Teneur en azote des pailles (kg/ha)	84.8	80.4	112.7	82.1	92.6	82.4
	Marge brute (euros/ha)					752	737
Conventionnelle parcelle virtuelle 1	Dose (kgN/ha)	180	180	180		180	
	Rendement (qtx/ha)	88.0	73.7	97.65		86.4	
	Teneur en protéines des grains (%)	10.0	9.4	10.6		10.0	
	Teneur en azote des pailles (kg/ha)	81.69	87.46	106.02		91.7	
	Marge brute (euros/ha)					756	
Conventionnelle parcelle virtuelle 2	Dose (kgN/ha)	183	183		183		183
	Rendement (qtx/ha)	88.3	73.9		87.0		83.0
	teneur en protéines des grains (%)	10.0	9.5		8.8		9.4
	Teneur en azote des pailles (kg/ha)	83.5	90.5		74.4		82.7
	Marge brute (euros/ha)						721
Rendements potentiels objectifs		100.7	83.5	104.4	99.0	94.4	96.2

Tableau 4. Effet de la modulation de la fertilisation azotée sur 15 années climatiques. Pour chaque variable, les valeurs représentent la différence entre stratégie modulée et stratégie conventionnelle. Min : valeur minimum sur 15 ans, Max : valeur maximale sur 15 ans et Moyenne : valeur moyenne sur 15 ans. Voir également légende du Tableau 3

		Rendement (q/ha)	MB (euros/ha)	Teneur en azote des pailles (kg/ha)	Protéines grains (%)
Parcelle virtuelle1	Min	-2.1	-20.8	-4.0	-0.2
	Max	0.9	8.6	1.5	0.3
	Moyenne	-0.3	-3.2	-0.6	0.0
Parcelle 2 virtuelle	Min	-1.7	-16.8	-6.4	-0.2
	Max	1.6	16.8	1.2	0.3
	Moyenne	0.3	3.8	-1.3	0.0

Effet de la surface respective de chaque unité de sol dans la parcelle

Cette étude a été réalisée à partir de la parcelle virtuelle 2. Les résultats de différences de marge brute entre les stratégies modulée et conventionnelle montrent que le gain attendu est très variable en fonction de la proportion de surface de chaque unité de sol sur la parcelle, même si celui-ci reste globalement faible et inférieur à 4 euros/ha (Figure 4). Pour les parcelles à 2 zones (graphe A), les gains les plus importants sont obtenus pour l'association des zones Bas de pente et Pente soit les zones respectivement de plus fort et plus faible rendement potentiel. Pour les associations Pente + Plateau et Bas de pente + Plateau, le gain de la modulation augmente lorsque la proportion de sol du Plateau diminue.

Pour les parcelles à 3 zones, le gain de marge brute diminue lorsque le pourcentage de surface de la zone Plateau augmente (graphe B). Il augmente lorsque le pourcentage de la zone Pente augmente (Graphe C). Le gain le plus important a été simulé avec la combinaison : 75% de Bas de pente, 19% de Pente et 6% de Plateau (Graphe D).

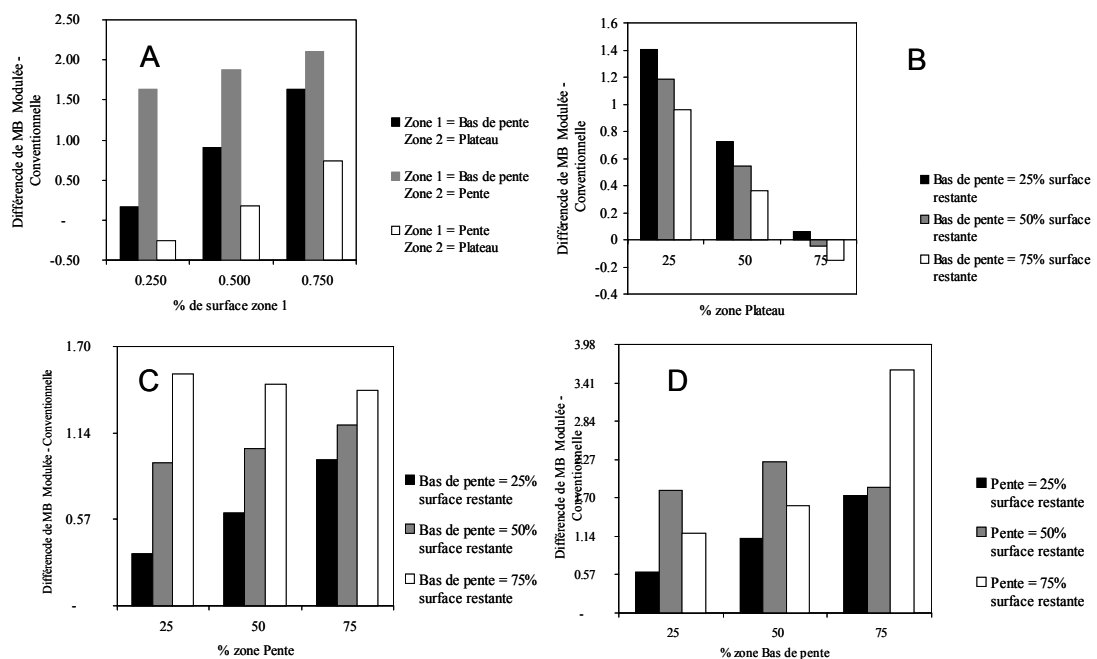


Figure 4. La surface respective de chacune des zones de la parcelle modifie le gain en marge brute azotée (MB) attendu. Graphe A : parcelles à 2 zones, Graphes B, C et D : parcelles à 3 zones.

Discussion

Ce travail constitue une première approche dans l'évaluation de l'intérêt potentiel de la modulation de la fertilisation azotée sur les parcelles du site de Grignon et sa région en utilisant 4 types de sol représentatifs et 2 modèles.

La première partie de l'étude a montré que les simulations rendaient bien compte de la variabilité des rendements à l'échelle de la zone de sol, mais était trop imprécis pour des simulations à l'échelle du point. Cette imprécision peut être due d'une part au modèle et d'autre part à un manque de précision sur les données d'entrée. En effet, il y a certainement

une imprécision sur le positionnement des points de sondage des sols réalisés en 1976 qui n'avaient pas été positionnés par GPS. De plus, les largeurs de bande de mesure du LAI et du rendement ne sont pas équivalentes (4 m et 6 m respectivement). De ce fait les petites variations d'une échelle inférieure à 5 m dans les propriétés du sol et de la culture peuvent brouter les relations entre LAI et sorties des modèles d'une part et les rendements observés d'autre part. Une manière de corriger les erreurs de simulations à petite échelle est la méthode d'assimilation des données présentées dans le papier associé de cet ouvrage par Guérif *et al.* ou par (Moulin *et al.*, 1998). A l'échelle de la zone de sol, la précision des prévisions du modèle est suffisante pour justifier son utilisation à cette échelle dans la suite de l'étude.

Dans la deuxième partie, les modèles AZODYN et CERES ont des résultats cohérents en terme de rendements et donnent le même ordre de classement entre les zones de sol. Cela signifie que les deux modèles rendent compte correctement de la réponse de la culture à la fertilisation azotée et justifie leur utilisation pour le raisonnement de la modulation des apports d'azote. Le modèle AZODYN permet de calculer les doses de fertilisation azotée en l'absence de facteur limitant autre que l'azote. L'occurrence d'autres facteurs limitant, notamment le stress hydrique, peut expliquer que les simulations du rendement par CERES en 1999, à partir des doses calculées par AZODYN, soient inférieures au rendement potentiel calculé. Les modèles ont par ailleurs fourni des informations complémentaires comme la teneur en protéines (AZODYN) et la teneur en azote des pailles (CERES). Cependant, les simulations de ces variables de sorties (teneur en protéines et teneur en azote des pailles) n'ont pas pu être évaluées (ou seulement sur un seul point pour la teneur en protéines) dans le contexte de cette étude. Les valeurs de ces variables doivent en conséquence être interprétées avec précaution.

De manière générale, le gain en marge brute attendu suite à la modulation de la fertilisation azotée pour les parcelles considérées est faible. Il est au mieux, de 16,8 euros/ha en marge brute et de seulement 1,6 q/ha en rendement pour les 15 années. Il existe peu de références économiques produites sur l'agriculture de précision, le résultat obtenu dans notre étude est donc difficile à comparer à d'autres sources. Certaines références techniques donnent des exemples d'exploitations agricoles et d'exploitants ayant tiré bénéfice de la modulation des apports d'intrants (Richard, 2002; Baratte et Le Duc, 2003), mais ces exemples restent particuliers et non généralisables. Prato et Kang (1998) proposent un modèle théorique permettant d'estimer le rapport entre coût des intrants et gain de rentabilité pour différentes stratégies modulées ou non modulées en fonction du nombre d'unités de gestion considérées sur la parcelle (plus le nombre d'unités de gestion est important plus la précision des apports d'intrants est bonne et en conséquence plus la rentabilité est importante) et du niveau d'hétérogénéité intra-parcellaire. Cependant, les courbes de réponse du gain de rentabilité au nombre d'unités de gestion restent théoriques et non validées. Le papier associé dans cet ouvrage de Hautcolas *et al.* Donne des gains de marge brute de l'ordre de 3 euros/ha soit équivalent au gain moyen de 3,8 euros/ha calculé sur 15 années pour la parcelle virtuelle 2 dans notre étude.

L'utilisation couplée des modèles a permis une évaluation multicritère des effets de la modulation de la fertilisation azotée (rendement, teneur en protéines du grain, teneur en azote des pailles). Le gain de la modulation est très variable en fonction du critère considéré et en fonction des situations. Les résultats montrent que l'intérêt de la modulation varie fortement en fonction des types de sol en présence sur la parcelle. Les 4 zones de sol étudiées différaient principalement par leur profondeur, la nature du substrat mais étaient très proches en terme de texture. La variable intégrative rendant compte de ces différences est la réserve utile. Pour la parcelle virtuelle 1, qui associait un sol de faible réserve utile (zone Pente sur substrat calcaire

dur) à deux sols de réserves utiles équivalentes (zones Bas de pente et Bord de plateau), les résultats de la modulation ont été négatifs pour toutes les variables considérées en 1999 et en moyenne sur 15 années, sauf pour la teneur en azote des pailles pour laquelle on simule une réduction de 0.6 kg/ha en moyenne sur 15 années. Pour la parcelle virtuelle 2, les sols en présence, plus contrastés, ont constitué un gradient de réserve utile de 80 mm à 153 mm. Dans ce cas là, les résultats de la modulation ont été positifs (sauf pour la teneur en protéines) en 1999 et sur 15 années avec un gain moyen de 0.3 q/ha de rendement, 3.8 euros/ha de marge brute et une réduction de 1.3 kg/ha de teneur en azote des pailles. La variable intégrative réserve utile semble donc un bon critère de caractérisation de l'hétérogénéité des parcelles sur le site de Grignon: plus les différences de réserve utile entre les zones sont contrastées plus la modulation de la fertilisation azotée a un impact positif sur les variables étudiées. Les sols présentaient également de différences de teneurs en matière organique non présentées dans cette étude et donc de fournitures en azote qui peuvent interagir avec le facteur réserve utile dans l'élaboration du rendement (les sols du Plateau sont plus riches en matière organique que les trois autres). Ces interactions sont analysées dans le papier associé dans cet ouvrage de Roche *et al.*.

Les 4 zones étudiées sont représentatives des profils de sol que l'on observe sur d'autres parcelles expérimentales du site. Les résultats obtenus pourront ainsi être extrapolés aux parcelles présentant des combinaisons de ces 4 zones. Cependant, l'étude devra être étendue à d'autres profils de sol observés, notamment les sols superficiels sur craie et les sols de colluvions argilo-limoneuses sur argile du sparnacien. Cette couche pédologique, intermédiaire entre le calcaire du lutétien et la craie (King, 1976) peut en effet parfois affleurer en fonction de la morphologie de la parcelle notamment en fonction de la pente. Sur les cartes de rendement, on observe des rendements forts sur ces zones.

Les simulations sur 15 années climatiques ont montré l'importance des interactions entre hétérogénéité des sols et variabilité interannuelle du climat. L'impact de la modulation, notamment sur la marge brute peut être négatif ou positif selon les années, ce qui atténue fortement le gain moyen attendu. Ceci s'explique, entre autres, par les variations interannuelles du rendement potentiel de chaque sol qui est parfois mal estimé par l'indicateur moyen choisi (= premier quartile). Sur 15 années, on observe que les unités de sol ne sont pas systématiquement classées dans le même ordre en terme de rendement potentiel (Figure 5). Ces variations semblent notamment reliées à la pluviométrie. Par exemple en 1991, année à fort déficit pluviométrique (492 mm pour une moyenne annuelle de 596 mm), le rendement maximal de la zone Plateau, habituellement du même ordre de grandeur que celui des zones Bas de pente et Bord de plateau, est cette année là bien supérieur. Cela peut être dû à des fonctionnements hydriques des sols différents, liés notamment à la forte réserve utile de la zone Plateau ou à son substrat de calcaire marneux permettant la pénétration des racines ou bien encore aux différences de teneur en matière organique évoquées plus haut. Le même classement est observé en 1996, pour une pluviométrie de 382 mm. Cependant, le très faible niveau de pluviométrie cette année là (équivalent aux pluviométries observées en zone sahéliennes, comprises entre 250 et 500 mm, source : www.fao.org) pourrait être dû à un dysfonctionnement du pluviomètre. Néanmoins, d'une année sur l'autre, les rendements de la zone Plateau sont au-dessus ou au-dessous des rendements des zones Bas de pente et Bord de plateau. La meilleure « résistance » du sol de la zone Plateau au déficit hydrique pourrait expliquer que la modulation soit plus intéressante sur la parcelle virtuelle 2 que sur la parcelle virtuelle 1 notamment en moyenne sur 15 années climatiques. La présence de ce type de sol (Plateau) a donc une forte valeur ajoutée dans une démarche de modulation de la fertilisation azotée. Pour affiner l'études des interactions sol * climat, il conviendrait de préciser le

fonctionnement hydrique de chaque unité de sol et son interaction avec les processus de transformation de l'azote dans le sol.

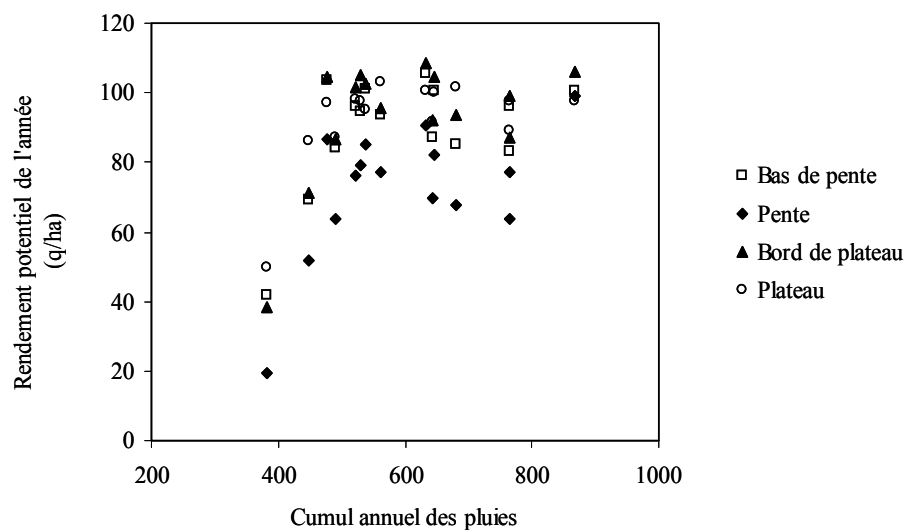
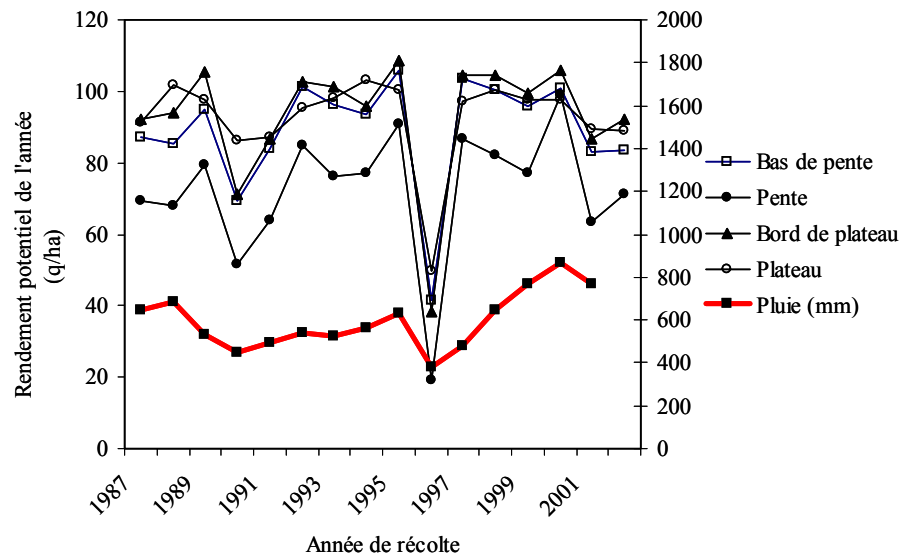


Figure 5. Evolution des rendements potentiels des 3 zones de sol (fertilisation : 240 unités en 3 apports : 60 100 80) en fonction de l'année (graphe du haut) et du cumul annuel des pluies (graphe du bas). En 1996, les simulations sont anormalement faibles. Ceci peut être expliqué par une très faible pluviométrie

Les résultats ont montré un fort effet de la surface relative de chaque zone de sol sur l'intérêt de la modulation. Ces résultats restent toutefois difficiles à interpréter ou à généraliser. Afin de pouvoir interpréter correctement ces résultats, il faudrait les croiser avec une caractérisation plus précise du potentiel de rendement des sol et de leur évolution dans le

temps, en considérant par exemple, comme cela est fait dans le papier associé dans cet ouvrage de Gilliot *et al.*, des zones à forts rendements stables dans le temps, des zones à faibles rendements stables dans le temps et des zones de rendements variables d'une année sur l'autre (forte interaction sol*climat).

Si les types de sol en présence, leur surface respective et la variabilité interannuelle du climat conditionnent le gain attendu de la modulation de la fertilisation azotée, il ressort également de cette étude que ces 3 facteurs de variation interagissent : l'effet de la surface d'une zone dépend du type de sol de cette zone et de ses interactions avec le climat. Cependant, en étendant cette étude à d'autres types de sol et en l'enrichissant de connaissances plus approfondies sur leur fonctionnement, notamment hydriques, on peut envisager de construire une typologie des parcelles et types de sol potentiellement intéressants pour la modulation sur le site expérimental de Grignon et dans sa région. Cette étude a également montré l'apport des modèles de culture utilisés indépendamment ou de manière couplée pour raisonner la modulation de la fertilisation azotée et en proposer une évaluation multicritère. Certains facteurs limitants comme les maladies non pas été pris en compte dans cette étude. Or ces facteurs ont certainement un rôle dans la variabilité des rendements potentiels annuels calculés sur 15 ans. Pour en tenir compte, on pourrait introduire l'information provenant d'un troisième modèle de culture intégrant l'effet des maladies ou d'un modèle d'épidémiologie comme c'est le cas dans l'étude de (Paz *et al.*, 2002).

Dans l'absolu, l'étude montre que les gains à attendre de l'AP sont relativement faibles dans notre cas, et probablement impuissants à justifier cette démarche d'un point de vue économique. Les résultats obtenus dans cette étude sont valables dans le contexte d'une production agricole intensive où le prix des intrants est faible (0.10 euros le kg d'engrais azoté). Dans ce contexte, les rendements obtenus sont souvent proches du rendement maximum de l'année (plateau de la courbe de réponse à l'engrais, Figure 6) et une variation de la fertilisation de +/- 20 unités d'azote n'aura que peu d'impact sur le rendement. En revanche, tout excès d'apports azotés entraînera un risque important de pollution par lessivage des nitrates à l'automne suivant. L'exploration d'autres conditions tend à généraliser ce résultat aux conditions de production agricoles intensives, dans lesquelles le coût des intrants est très inférieur aux prix des produits finaux (papier associé dans cet ouvrage de Hautcolas *et al.*). L'intérêt environnemental de l'AP reste donc un élément majeur dans l'analyse coûts/bénéfices de cette démarche. Or, les simulations économiques obtenues dans le papier associé à cet ouvrage de Hautcolas *et al.*, montrent que même une augmentation du coût des intrants de 50% n'aurait pas un impact significatif sur le gain de marge brute suite à une modulation. Un facteur de développement de la technique de modulation des apports, pourrait être la mise en place de primes à la manière de produire (pour les modes de production les moins néfastes pour l'environnement) ou de taxes à la pollution. Par ailleurs, la valorisation des technologies de l'agriculture de précision (SIG adaptés aux exploitations agricoles, capteurs et informatique embarqués sur les engins agricoles) dans d'autres applications d'actualité comme la traçabilité (Roux, 2002), fait de ces techniques un outil supplémentaire intéressant s'inscrivant dans un contexte d'agriculture durable.

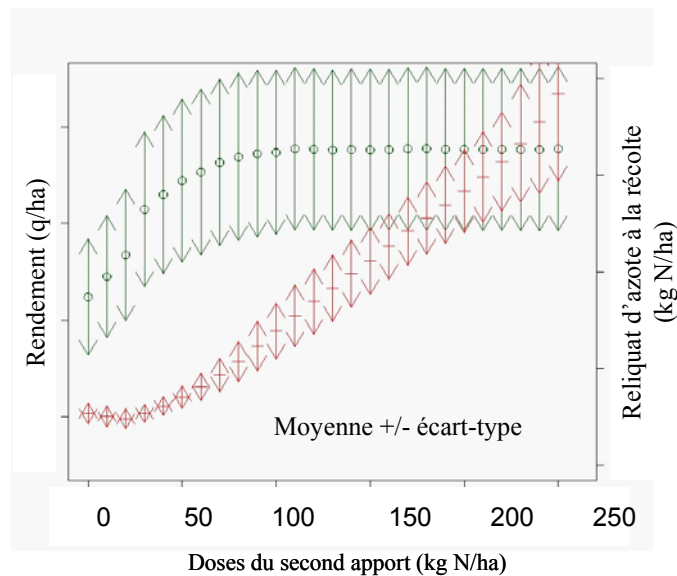


Figure 6. Relation entre apports excessifs d'azote et risque de pollution par lessivage automnal des récoltes estimé par le reliquat d'azote à la récolte.

References

- Baratte, E., E. Le Duc, 2003. "Etre rentable pour s'autofinancer". Dossier Agriculture de précision. *Réussir Céréales Grandes Cultures* 157, 50-53.
- Basso, B., J. T. Ritchie, F. J. Pierce, R. P. Braga, J. W. Jones, 2001. Spatial validation of crop models for precision agriculture. *Agricultural Systems* 682, 97-112.
- Batchelor, W. D., B. Basso, J. O. Paz, 2002. Strategies to analyze spatial and temporal yield variability using crop models. *European Journal of Agronomy* sous presse.
- Baxter, S. J., M. A. Oliver, J. Gaunt, M. J. Glendining, 2003. *Simulating the spatial variation of soil mineral N within fields using the model SUNDIAL (Simulation of Nitrogen Dynamics In Arable Land)*. 4th European Conference on Precision Agriculture, Berlin, Germany.
- Boissard, P., D. Boffety, J. F. Devaux, P. Zwaenepoel, P. Huet, J. M. Gilliot, 2001. *Mapping of the wheat leaf area index from multirate radiometric data provided by on-board sensors*, Montpellier, France.
- Cora, J. E., F. J. Pierce, B. Basso, J. T. Ritchie, 1999. *Simulation of within field variability of corn yield with Ceres-Maize model*. Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture, St. Paul, Minnesota, USA, 19-22 July 1998. Part A and Part B., American Society of Agronomy, Madison, USA.
- David, C., M. H. Jeuffroy, S. Recous, F. Dorsainvil, in press. Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat, EJA, in press. *Experimental Journal of Botany*.
- Draper, D., 1995. Assessment and propagation of model uncertainty. *Journal of Royal Statistical Society B* 571, 45-97.
- Engel, T., G. Hoogenboom, J. W. Jones, P. W. Wilkens, 1997. AEGIS/WIN: a computer program for the applications of crop simulation models across geographic areas. *Agronomy Journal* 89, 919-928.
- Gabrielle, B., L. Kengni, 1996. Analysis and field evaluation of the CERES model's soil components : Nitrogen transfer and transformations. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 60, 142-149.
- Gabrielle, B., S. Menasseri, S. Houot, 1995. Analysis and field evaluation of CERES models water balance component. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 59, 1403-1412.
- Gabrielle, B., R. Roche, P. Angas, C. Cantero-Martinez, L. Cosentino, M. Mantineo, M. Langensiepen, C. Hénault, P. Laville, B. Nicoulaud, G. Gosse, 2001. A priori extrapolation of functional soil-crop models across soil types. *Agronomie* 22, 119-132.
- Girard, M. L., 1997. Modélisation de l'accumulation de biomasse et d'azote dans les grains de blé tendre d'hiver (*triticum aestivum* L.) : simulation de leur teneur en protéines à la récolte. *Agronomie*, INA-PG: 96p.
- Jeuffroy, M. H., S. Recous, 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy* 102, 129-144.

- King, D., 1976. Modélisation pédologique et cartographie automatique. Mémoire de Diplôme d'Agronomie Approfondie, INA P-G. 82 pages.
- Moulin, S., A. Bondeau, R. Délécolle, 1998. Combining agricultural crop models and satellite observations: from field to regional scale. *International Journal of Remote Sensing* 196, 1021-1036.
- Paz, J. O., W. D. Batchelor, T. S. Colvin, S. D. Logsdon, T. C. Kaspar, D. L. Karlen, 2002. Characterizing spatial yield variability of soybeans using a crop growth model. Paper presented as ASAE paper no. 97-1031, <http://129.186.104.180>. 2002.
- Paz, J. O., W. D. Batchelor, G. L. Tylka, R. G. Hartzler, 2001. A modelling approach to quantify the effects of spatial soybean yield limiting factors. *American Society of Agricultural engineers* 445, 1329-1334.
- Prato, T., C. Kang, 1998. Economic and water quality effects of variable and uniform application of nitrogen. *Journal of the American Water Resources Association* 346, 1465-1472.
- Richard, R., 2002. Une incidence positive sur la rentabilité des exploitations. L'Internet agricole et Nouvelles Technologies: 12.
- Ritchie, J. T., S. Otter, 1984. CERES-WHEAT : a user-oriented wheat yield model. Preliminary documentation. *Argristars Publ. N°YM-U3-04442-JSC-18892*.
- Roux, M., 2002. Tracer : une condition nécessaire pour exporter. L'Internet agricole et Nouvelles Technologies: 3-5.
- Vasse, B., 2001. Agriculture de précision. Etude des hétérogénéités intra-parcellaires et de leurs effets sur le fonctionnement de la culture de blé. Mémoire de fin d'études ESITPA., INRA: 51p.
- Zadoks, J. C., T. T. Chang, C. F. Konzak, 1974. A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed research* 14, 415-421.