

Modulation des apports azotés sur colza : évaluation expérimentale et analyse au moyen du modèle CERES - rape des gains potentiels et aléas

R. ROCHE, J.N. AUBERTOT, A. JULLIEN, D. MAKOWSKI, B. GABRIELLE, P. HUET

Version provisoire

Mots-clés : colza, CERES, modulation, azote, phoma, modèle de culture, rendement, nitrate

Introduction

Un des objets de l'agriculture de précision est de moduler les interventions techniques à l'échelle intra-parcellaire. Dans cette étude nous nous sommes intéressés à la modulation de l'azote parce que c'est un facteur important à la fois en terme d'élaboration du rendement et en terme d'impact environnemental des cultures. En modulant son apport sur les parcelles on vise à (i) atteindre le rendement optimal en chaque point de la parcelle et (ii) éviter les excès et les pertes par lessivage ou volatilisation. Avec la nouvelle PAC, l'agriculture doit répondre autant à un souci de production qu'à un souci de préservation de l'environnement et pouvoir identifier et proposer des modes de production plus propres prend donc une importance accrue. Les surfaces de colza se sont établies à la fin des années 90 autour de 900000 hectares. Si l'on estime à 50 kilogrammes en moyenne la quantité de nitrates lixiviés par hectare sous ce type de cultures (Cf dossiers techniques CETIOM et ITCF), cela représente un total de l'ordre de 45000 tonnes d'azote perdues, pour un pays comme la France.

Par rapport à l'élément azote, le colza présente la particularité d'exporter beaucoup moins d'azote par ses graines qu'il n'en nécessite pour sa croissance: ainsi l'écart entre fertilisation azotée et exportations par les graines peut facilement atteindre 80 U d'azote par hectare. Un tel différentiel rend encore plus cruciale la maîtrise des interactions existant entre le degré de réussite des objectifs cultureux à l'intérieur d'une parcelle et l'aléa climatique à l'échelle des successions culturales. Des études plus spécifiques (Bouthier *et al.*, 2003), ont

montré que l'essentiel des pertes dans ces systèmes de culture ne se produit pas sous les cultures mais en interculture voire au début de l'implantation de la culture suivante (principalement s'il s'agit de céréales d'hiver). Ainsi, les pertes sous céréales d'hiver se produisent bien avant le premier apport d'engrais sur la culture, et elles sont fonction de l'histoire de la parcelle (équilibre de fertilisation du colza précédent, dynamique de l'azote pendant l'interculture). Les pertes sous le colza, quant à elles, dépendent de l'histoire récente de la parcelle avant le semis du colza mais aussi de la capacité d'absorption du colza en fin d'été, qui selon la date de levée et le climat, peut déjà être importante (Dejoux, 1999).

Du point de vue phytosanitaire, le phoma du colza est l'un des bioagresseurs les plus préjudiciables à l'élaboration du rendement. On estime que les pertes dues à la maladie sont comprises entre 5 et 20 % du rendement national en fonction des années (Aubertot *et al.*, 2002). L'agent pathogène, *Leptosphaeria maculans*, se conserve sur les débris de culture contaminés sur lesquels il produit des périthèces qui libèrent des ascospores initiant les contaminations primaires à l'automne. Les symptômes se manifestent alors sur les feuilles sous forme de macules. Ensuite, le champignon progresse dans la plante par voie systémique et colonise le collet et le bas de la tige, provoquant une nécrose susceptible de sectionner la tige et d'entraîner la verse de la plante dans les cas les plus graves (West et al, 2001). Il n'existe pas à l'heure actuelle de méthode de lutte totalement efficace contre la maladie. La lutte culturale et l'utilisation de variétés tolérantes contribuent à limiter la maladie. La lutte chimique ne semble justifiée que pour les situations pour lesquelles on sait que le risque phoma est élevé (forte disponibilité en azote en début de cycle, sources d'inoculum importantes). Une étude a montré que la maladie n'était pas structurée spatialement sur des parcelles de taille relativement modestes (30 m x 50 m, Aubertot *et al.* a, sous presse). Dans un objectif d'acquisition de connaissances pour une agriculture de précision, il serait utile de savoir si, sur une plus grande parcelle présentant des hétérogénéités de sol, la maladie peut être structurée spatialement. De plus, le cycle épidémique semble fortement affecté par les pratiques agronomiques ; choix de la date de semis et disponibilité en azote à l'automne notamment. L'effet de la disponibilité en azote sur la gravité des symptômes observés en fin de cycle de culture n'est pas simple. Il semble qu'une forte disponibilité à l'automne favorise la maladie (Aubertot *et al.* b, sous presse) alors que la fertilisation de printemps n'influencerait pratiquement pas la gravité des symptômes observés à maturité physiologique (Sadowski *et al.*, 1998; Söchting and Verret, 2003). Il serait utile de mieux analyser les effets de la modulation de la fertilisation azotée à la reprise de végétation sur la gravité des symptômes observés.

Enfin, mieux raisonner les conséquences de la fertilisation azotée suppose de pouvoir intégrer la très grande variabilité rencontrée dans les situations agricoles et climatiques, que ce soit à l'intérieur d'une parcelle ou entre parcelles, régions ou années. Cela rend essentiels aussi bien la conduite d'expérimentations appropriées que l'utilisation et le développement de modèles applicables sur le terrain mais reposant néanmoins sur de solides connaissances sur les mécanismes en jeu. Ces deux approches sont en effet totalement complémentaires : l'expérimentation permet d'identifier les facteurs intervenant, de formuler des hypothèses et d'acquérir des données numériques en vue de quantifier les lois d'action particulières, tandis que les modèles permettent d'étendre ces résultats, forcément limités dans le temps et l'espace, à l'ensemble des conditions compatibles, afin de leur donner une portée statistiquement significative.

Sur colza, le seul modèle disponible au début de l'étude, et capable de simuler de façon dynamique les transferts et échanges sol-plante de composés azotés, était le modèle CERES-Rape développé par Gabrielle *et al.* (1998a et b) (Cf planches couleur). Les modèles

de la famille CERES ont été créés pour répondre principalement à trois grandes catégories d'objectifs : i) la prévision des rendements à une échelle parcellaire ou régionale ; ii) l'analyse fréquentielle de risques, pour faire de la planification stratégique ; iii) l'intégration des connaissances et l'aide à la définition des besoins en recherche. Ils requièrent un faible nombre de paramètres pour leur fonctionnement (essentiellement, (i) les données climatiques journalières (températures, rayonnement, pluviométrie, ETP), (ii) une analyse texturale du sol, (iii) les conditions initiales de teneur en eau et azote du sol, et (iv) l'itinéraire technique de la culture), et réalisent un bon compromis entre approches mécaniste et opérationnelle. Ainsi, un soin égal est accordé au traitement des processus i) de transformations chimiques C-N dans les sols (Gabrielle et Kengni, 1996), ii) de transferts physiques dans les sols (Gabrielle *et al.*, 1995) et enfin iii) de croissance et d'absorption N de la plante (Colnenne *et al.*, 1998 et 1999 ; Gabrielle *et al.*, 2002). Enfin, toutes les variables d'états (physiques ou biologiques) sont disponibles à un pas de temps journalier. Les lecteurs peuvent se référer à Jones and Kiniry (1986) pour une description plus complète de CERES.

Si l'objectif théorique de la modulation est bien compris, sa mise au point reste complexe et ses résultats sont difficilement évaluables (Thrikawala *et al.*, 1999 ; Killian, 2001). Une des étapes limitantes est de pouvoir effectuer un diagnostic agronomique afin de savoir en chaque point de la parcelle s'il faut diminuer, augmenter ou conserver la dose d'azote calculée sur une moyenne parcellaire. De part leur caractère dynamique et intégrateur, les modèles de culture sont aussi un des outils privilégiés pour réaliser ce diagnostic (Cora *et al.*, 1999; Paz *et al.*, 2001 : CERES-maïs; Gabrielle *et al.*, 2001 : CERES-blé ; Paz *et al.*, : CropGrow-soja). La puissance de calcul associée aux modèles informatiques permet également de tester différentes stratégies de fertilisation sur plusieurs années climatiques. On peut ainsi prendre en compte l'effet de la variabilité inter-annuelle du climat qui risque, d'une année sur l'autre, de masquer les hétérogénéités spatiales (Martin et Aubry, 2000 ; Eghball *et al.*, 1999 ; O'Neal *et al.*, 2002).

Dans ce papier, nous proposons donc en premier lieu d'analyser expérimentalement les effets d'une modulation de la fertilisation azotée sur l'état sanitaire (par une observation du phoma), la croissance et l'élaboration du rendement d'un couvert de colza, puis d'utiliser le modèle de culture CERES pour étendre ces résultats par analyse fréquentielle, d'abord dans le cadre de la parcelle expérimentale étudiée, et ensuite en proposant des variations réalistes de son état. Nous poserons pour cela l'hypothèse que les hétérogénéités spatiales sont liées à des différences de propriétés physico-chimiques du sol (Cf. Gabrielle *et al.*, 2001). Sous cette hypothèse, différentes stratégies de fertilisation azotée seront testées en terme de rendement et de pertes azotées par lessivage, en prenant en compte les particularités du cycle de culture et les problèmes posés par l'incertitude climatique inter-annuelle.

Matériel et méthodes

Dispositif expérimental

Choix de la parcelle expérimentale

L'essai a été implanté sur le site de la ferme expérimentale de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon, Thiverval-Grignon, France (48.9 N, 1.9 E). La parcelle Côte Des Divisions mesure environ 15 ha et comprend 3 zones de sol réparties le long d'une pente.

Le bas de pente (zone A) est constitué d'un limon argileux profond, le haut de la pente d'un mélange peu profond de limons et de sables limoneux (zone B), et enfin le plateau de sommet de pente, de limons argileux avec cailloux sur calcaire marneux (zone C) (Cf. tableau 1).

Tableau 1. principales caractéristiques pédologiques des différentes zones

	Zone A	Zone B	Zone C
Type de sol	Colluvions bas de pente Limon sur limon	Superficiel mi-pente Limon caillouteux sur sable	Rebord du plateau Limon caillouteux sur calcaire marneux
Taux de matière organique (MO en %)	1.91	1.76	2.16
Rapport C/N de la MO	10	10	10
Reliquat d'azote minéral au semis (kg/ha)	98	90	109
Profondeur de sol (cm)	110	70	105
Réserve Utile (RU en mm)	125	81	123

Matériel végétal et conduite de la culture

L'essai a été semé en colza le 22 août 2001 derrière un précédent blé (succession la plus courante, le colza constituant une bonne tête d'assolement est utilisé pour rompre une monoculture de blé). La parcelle fait partie d'un dispositif d'expérimentation de longue durée en agriculture de précision, essentiellement sur blé, mais dans le cadre de l'AIP, seule l'année 2001-2002 sur colza était financée. La variété utilisée a été Goéland, semée à 3 kg/ha soit environ 60 plantes par mètre carré (inter-rang de 24 cm). Du point de vue phytosanitaire, la parcelle a été conduite de façon conforme aux pratiques régionales. Outre le type de sol, la principale modalité de différenciation des traitements a porté sur la dose du deuxième apport d'azote, lequel s'est étagé de 0 à 125 unités (Cf tableau 2). Le calcul des différentes doses a été fait en tenant compte des reliquats sortie hiver et des quantités déjà absorbées par la culture. Les objectifs de rendement ont été estimés au moyen du modèle CERES. Les besoins totaux de la culture en azote ont alors été calculés en multipliant ces valeurs par 6.5 kg/quintal. En outre un semis tardif (24/09/01) a été réalisé sur une bande supplémentaire. La fertilisation a été de 60 unités au premier apport et de 115 unités au deuxième apport.

Tableau 2. récapitulatif des traitements azotés ; les valeurs sont en kg/ha (apport au semis : 24/08/01 ; 1er apport : 20/02/01 ; 2ème apport : 14/03/02)

objectif de Type de sol	rendement q/ha	dose modulée Nm	dose modulée N- = Nm -50	dose modulée N+ = Nm+50	dose uniforme Nx	apport au semis : Na	témoin sans N : N0
A	40	60 + 60	60 + 10	60 + 110	60 + 45	100 + 0	0 + 0
B	35	60 + 0	60 + 20	60 + 50	60 + 45	100 + 0	0 + 0
C	40	60 + 75	60 + 25	60 + 125	60 + 45	100 + 0	0 + 0

Mesures effectuées

Quatre dates de prélèvement ont été retenues en fonction des stades critiques de la culture : respectivement entrée hiver (3/12/01, au maximum de la croissance automnale), sortie hiver (15/02/02, juste avant le premier apport d'azote et la reprise de végétation), début floraison (02/04/02, qui marque la transition entre phase végétative et période reproductrice)

et peu après la maturité physiologique pour la détermination du rendement afin d'éviter un éventuel égrenage en cas d'orage (24/06/02). A chaque date, 4 placettes de 0.48 m² par zone de sol ont été prélevées sur les 2 traitements N0 et Nx (Cf. [tableau 2](#)). La densité de plantes, l'indice foliaire, la quantité d'azote absorbée, et la matière sèche de chaque compartiment agronomiquement significatif (pivot, tige, feuilles, puis siliques et graines) ont été mesurées pour suivre la croissance et donner des éléments de diagnostic. Des prélèvements de carottes de sol ont aussi permis de suivre l'évolution du stock d'azote minéral dans le sol.

Trois variables ont été suivies pour caractériser l'attaque de phoma : la concentration atmosphérique en ascospores de *Leptosphaeria maculans* (agent causal de la maladie) ; une observation de l'incidence des macules à l'automne et une observation de la sévérité des nécroses à maturité physiologique. La concentration atmosphérique journalière en ascospores de *L. m.* de la région de l'étude a été suivie grâce à un capteur dynamique (Burckard) situé à 500 m environ de la parcelle expérimentale étudiée. Ce capteur est semblable à celui décrit par Hirst (1952). Les bandes de capture ont été observées au microscope chaque semaine et la concentration atmosphérique journalière a été calculée en fonction du débit d'aspiration de l'appareil. L'observation de l'incidence de la maladie (pourcentage de plantes présentant au moins une macule) a été réalisée le 22/10/01 pour chaque parcelle élémentaire de l'essai sur trois placettes (2 mètres linéaires x 2 rangs) choisies de manière aléatoire. Ceci correspond à environ 90 plantes par parcelle élémentaire. Pour des raisons de temps de travail, seuls les traitements N+, Na, N0 et Nx ont été observés. La sévérité des nécroses a été observée selon 6 classes de sévérité de la nécrose au niveau du collet (Aubertot *et al.*, a sous presse) : 1, aucun symptôme visible ; 2, de 0 à 25% de la surface nécrosée ; 3, de 25 à 50% de la surface nécrosée ; 4 de 50 à 75% de la surface nécrosée ; 5, de 75 à 100% de la surface nécrosée ; 6, 100 % de la surface nécrosée ou plante versée à cause du phoma au moment de l'observation. L'observation a été réalisée à la maturité physiologique, le 20/06/02. Pour chaque parcelle élémentaire, 8 séries de 10 plantes consécutives ont été observées aléatoirement dans la parcelle. Seuls les traitements N+, Na, N0, Nx et ST ont été observés. Un indice appelé note G2 et compris entre 0, pour un peuplement sain, et 9 pour un peuplement complètement versé, a été utilisé pour synthétiser les observations. Il s'écrit :

$$G_2 = \frac{n_2 + 3n_3 + 5n_4 + 7n_5 + 9n_6}{\sum_{i=1}^6 n_i} \text{ où } n_i \text{ représente le nombre de plantes dans la classe } i.$$

Problèmes rencontrés

Le climat relativement sec du mois d'août associé à l'humidité résiduelle du sol a engendré une levée très hétérogène de la culture avec un premier tiers environ des plantes qui a levé normalement, et ensuite une levée très échelonnée des autres plantes. Etant donné la très grande fragmentation du phénomène, une structure très hétérogène du peuplement à l'échelle du mètre est apparue. Malgré une certaine atténuation durant la période automnale, la différence de taille entre les différentes populations de plantes pouvait encore aller du simple au double en entrée hiver. Ce problème très gênant pour l'expérimentation nous a amenés à délimiter très tôt en vue des prélèvements futurs des placettes dans chaque zone de sol et sur les 2 traitements faisant l'objet du suivi. La croissance et le rendement ont donc été estimés par une moyenne entre les placettes de plantes levées normalement et celles levées plus tardivement. Par ailleurs, la sensibilité de Goéland au phoma, associée à des conditions climatiques favorables, a entraîné une forte attaque de la maladie. Avec les fortes chaleurs du mois de juin, ceci a entraîné un échaudage important de la culture et nous a amené à faire la récolte manuelle plus d'une semaine avant la date de maturité physiologique théorique.

Enfin, le capteur embarqué de la moissonneuse batteuse, destiné à fournir le rendement spatialisé à l'intérieur de la parcelle a été mal étalonné, rendant toutes les données de rendement machine inexploitable. Ainsi, on n'a pu disposer pour l'évaluation préalable du modèle et des effets de la modulation azotée seulement des données acquises par récolte manuelle sur les 2 traitements suivis.

Paramétrage et simulations

Les humidités caractéristiques et les paramètres pour la conductivité hydraulique des sols de chaque zone ont été estimés au moyen des fonctions de pédotransfert fournies respectivement dans la notice de CERES (Jones et Kiniry, 1986) et dans Driessen (1986). Les conditions initiales d'humidité et de teneur en azote des différentes couches de sol sont celles fournies par les prélèvements de sol de chaque zone au moment du semis. Le fichier climatique pour les analyses fréquentielles est constitué des quinze années enregistrées sur le site de Grignon depuis son existence. Enfin, dans la totalité de l'article, les **zones** composant les parcelles étudiées (réelles ou fictives) ont été considérées comme **de tailles strictement équivalentes** pour les calculs et simulations. L'effet spécifique des tailles de zone est étudié de manière détaillée dans l'article joint de Jullien *et al.*.

Résultats expérimentaux et comportement du modèle

Homogénéité des données

Du fait des problèmes rencontrés, contrôler l'homogénéité des traitements prend une importance accrue pour déterminer la pertinence des résultats. On a reporté dans le tableau 3 les coefficients de variation des valeurs de biomasse sèche mesurées pour les différents traitements, zones de sol et dates de prélèvement, à l'intérieur d'une catégorie donnée de date de levée. On observe quelques valeurs pouvant être très élevées (supérieures à 25 %), surtout dans le cas du traitement sans azote. Cependant la plupart des valeurs restent à un niveau acceptable (inférieures à 15 %) pour une étude en parcelle d'agriculteur.

Tableau 3. valeurs en pourcents des coefficients de variation associés aux biomasses mesurées aux principaux stades pour les deux traitements azotés suivis

	Entrée Hiver	Sortie Hiver	Début Floraison		Récolte	
			N 0	N x	N 0	Nx
A	9.8	M	24.1	14.5	8.4	11.9
B	23.1	11.9	7.1	5.8	34.1	6.85
C	15.2	25.7	18.0	3.8	5.9	5.87

Contrôle de la nutrition azotée

Pour évaluer l'adéquation de la fertilisation azotée appliquée sur chacun des traitements, nous avons utilisé le concept de la courbe de dilution critique développé par Lemaire et Salette (1984). A chaque moment de la croissance végétative, la valeur donnée par cette courbe correspond au minimum de concentration en azote nécessaire pour achever un rendement maximal. Dans la figure 1, où nous avons reporté les valeurs de teneur en azote en

fonction de la matière sèche des différents traitements et zones de sol, nous avons utilisé l'équation spécifique du colza d'hiver, proposée par Colnenne *et al.* (1998). On notera que l'on aboutit à un Indice de Nutrition Azoté (INN, défini comme le rapport entre la teneur en azote de la culture et la teneur critique correspondant à sa biomasse au moment considéré) légèrement inférieur à 1 en entrée hiver (EH). En effet, le colza supporte très bien des carences temporaires et n'est en général pas fertilisé à l'automne par économie et pour limiter les risques environnementaux (Colnenne *et al.*, 2002). Par contre à début floraison (DF) qui correspond à la fin de la période d'applicabilité de ce concept, on constate un INN supérieur à 1 pour toutes les situations du traitement Nx. Enfin, la richesse naturelle de la parcelle en azote n'a pas permis d'obtenir des carences sévères en azote pour le témoin sans azote et ce quelle que soit la zone de sol considérée. La marge de manœuvre dont on dispose pour moduler la fertilisation azotée est donc assez limitée sur cette parcelle.

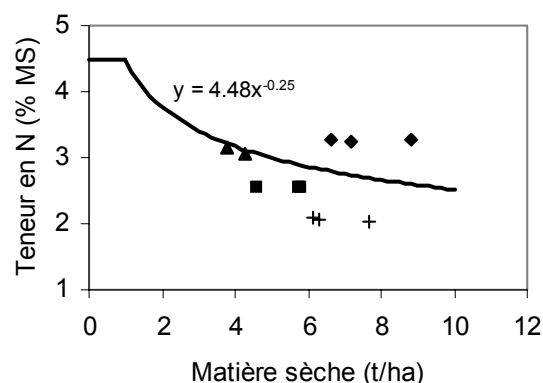


Figure 1. Evolution de la teneur en azote de la culture dans les 3 zones par rapport à la courbe de dilution critique (Colnenne *et al.*, 1998).

(\triangle) Entrée Hiver (\square) Sortie Hiver

(\blacklozenge) Début Floraison (DF) CNx (+) DF CN0.

Caractérisation de l'état sanitaire de la culture : suivi du phoma

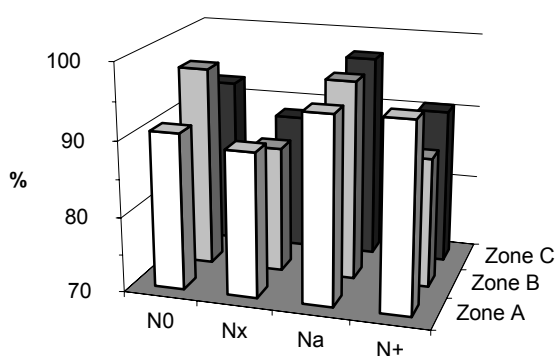


Figure 2. Incidence du phoma (pourcentage de plantes présentant au moins une macule de phoma) observée le 22.10.2001 ($n \approx 90$ plantes par parcelle élémentaire).

Dans la région de l'étude, les premières émissions d'ascospores de *L. m.* ont eu lieu le 20 septembre 2001, et un pic a été observé le 7 novembre (Aubertot *et al.*, b). Ces émissions ont conduit à des incidences élevées, comprises entre 87 et 97% (figure 2). Ni l'effet de la zone, ni l'effet de la fertilisation azotée n'est significatif (respectivement $p = 0.95$ et $p = 0.07$). Ce dernier point est cohérent avec le fait que les traitements Nx, N+ et N0 n'étaient pas encore différenciés au moment de l'observation. Ces fortes incidences sont également cohérentes avec l'enregistrement de la concentration atmosphérique en ascospores qui montrent que les contaminations ont débuté 1 mois environ avant l'observation de l'incidence. L'observation des nécroses à maturité physiologique montre que les peuplements ont été fortement attaqués par le phoma (figure 3). Les notes G_2 sont en effet comprises entre 5.0 et 8.0, ce qui indique un niveau d'attaque important. L'analyse de variance révèle que

l'effet zone dans la parcelle n'est pas significatif ($p = 0.25$). En revanche, les différentes modalités de conduite ont conduit à des écarts significatifs de notes G_2 ($p < 0.01$). Une comparaison multiple de moyennes (Student-Newman-Keuls à un niveau de 0.05) montre que le semis tardif (ST) a une note G_2 significativement plus faible que les autres traitements (note G_2 moyenne de 5.0). En revanche, aucune différence significative n'est observée entre les traitements N^+ , Na , $N0$ et Nx (moyennes comprises entre 6.2 et 7.4).

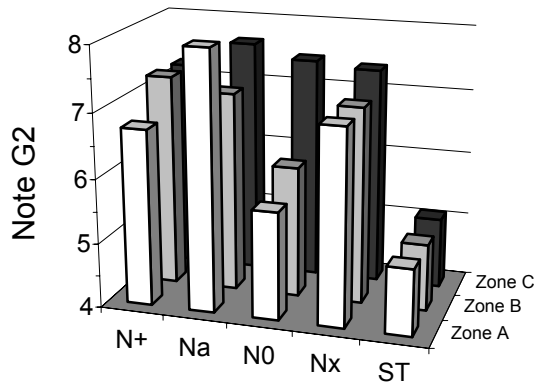


Figure 3. Note G_2 à maturité physiologique (le 20.06.2002) pour différents traitements dans chacune des 3 zones de la parcelle.

La modulation des apports azotés à la reprise de végétation n'a pas eu d'effet significatif sur le développement de la maladie. Ceci est cohérent avec les quelques résultats disponibles dans la bibliographie (Sadowski *et al.*, 1998; Söchting and Verret, 2003). Par ailleurs, l'apport azoté au semis n'a pas eu d'effet significatif sur le développement de la maladie, ce qui est en apparence contradiction avec d'autres résultats expérimentaux (Aubertot *et al.*, b ; sous presse). Ce manque de réponse à l'apport azoté au semis peut s'expliquer par le fait que les traitements non fertilisés à l'automne étaient eux-mêmes non limités en azote (cf. supra), du fait des forts reliquats en azote du sol au semis. Par ailleurs, le semis tardif a limité le développement de la maladie. Un des mécanismes qui pourrait expliquer cette observation est que le développement foliaire du peuplement était beaucoup plus faible que celui des autres traitements (cf. infra). D'un simple point de vue mécanique, la pollution des plantes semées tardivement par les ascospores de *L. m.* s'en est trouvée fortement réduite. Enfin, un autre résultat important à souligner est que les hétérogénéités de sol de la parcelle n'ont pas eu d'effet sur le développement du phoma.

Evaluation du modèle

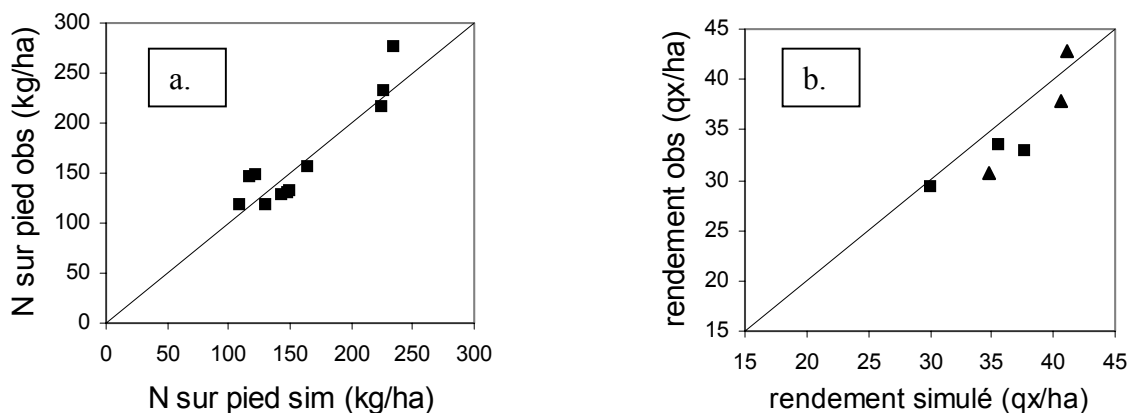


Figure 4. a. comparaison des quantités d'azote absorbées par la culture aux 3 principaux stades végétatifs avec les quantités simulées par CERES-rape ; b. comparaisons des rendements observés et simulés par CERES-rape pour les 3 zones (\square $CN0$ \triangle CNx).

Pour une application aux questions environnementales, l'absorption d'azote par la culture est un processus-clef, puisqu'il constitue souvent le premier poste du bilan. Dans le graphique de la [figure 4a](#), nous avons reporté les quantités d'azote sur pied pour chaque zone aux stades entrée hiver (traitements N0 et Nx non encore différenciés), sortie hiver (N0 et Nx non encore différenciés), début floraison (N0 et Nx différenciés) et fin floraison (N0 et Nx différenciés). Les points sont bien alignés sur la première bissectrice, même si le détail du classement entre dates n'est pas toujours respecté. Concernant l'estimation des rendements (Cf. [figure 4b](#)), on observe un bon alignement des points avec la première bissectrice montrant l'aptitude du modèle à classer les situations. Cependant les valeurs données par le modèle sont en majorité un peu surestimées. Cela est sans doute à rapprocher des pertes dues au phoma, non prises en compte.

Etablissement et test fréquentiel de différents modes de conduite N sur la parcelle expérimentale

Estimation des potentiels climatiques et pédologiques de rendement par année

Sur les 15 années de la série climatique de Grignon, le modèle CERES-rape nous a permis de calculer pour chaque zone : d'une part le rendement potentiel de l'année avec une dose pléthorique d'azote (Cf. [figure 5](#)), et d'autre part le rendement sans apport azoté, ce qui nous permet ensuite de tenir compte de la fourniture en azote du sol sur l'ensemble du cycle et non plus seulement jusqu'à sortie-hiver comme dans les méthodes du bilan prévisionnel classique. On observe que les potentiels de rendement des zones A et C sont finalement quasi identiques, malgré des sous-sols de natures assez différentes. Seule la zone B se distingue avec un potentiel de rendement en moyenne inférieur d'environ 5 qx/ha. Cependant cette différence est assez nettement inférieure aux variations inter annuelles (amplitude maximale de plus de 20 qx/ha).

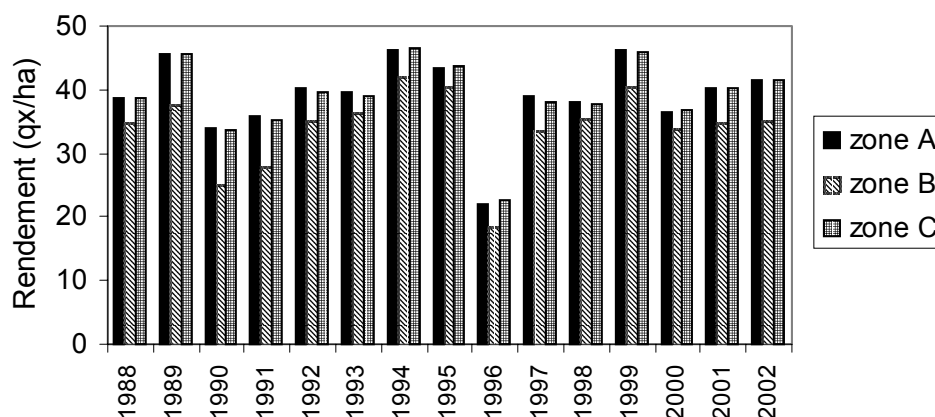


Figure 5. Estimation des rendements potentiels par zone sur 15 ans avec le modèle CERES-rape.

Calcul des apports azotés

Les apports azotés nécessaires année par année et zone par zone ont été calculés en multipliant l'écart de rendement entre potentiel climatique et potentiel dû à la seule fourniture en azote par le classique coefficient de 6.5 unités d'azote par quintal (Lagarde

2001). Ces fertilisations ont ensuite été moyennées zone par zone et c'est ces moyennes qui ont été utilisées pour le test de la stratégie modulée. En effet, lors de l'utilisation concrète, on ne connaît pas l'évolution qu'aura la culture au moment des apports et on est obligé de se contenter d'un indicateur (ici la moyenne sur 15 ans a été choisie). Ces fertilisations modulées sont finalement assez peu différentes entre zones (respectivement **42.7, 44.6 et 27.9 unités** d'azote par hectare **pour A, B et C**) en raison des faibles différences de potentiel de rendement et par le jeu de fournitures d'azote par le sol pouvant elles même varier. Comme conséquence ces fertilisations sont également peu différentes de celle pour la stratégie non modulée (moyenne des 3 zones, soit 38.4 unités par hectare). Ces très faibles amplitudes de variation des besoins théoriques en azote laissent mal augurer de gains importants par la stratégie de modulation, et cette parcelle s'avère finalement assez peu adaptée pour mettre expérimentalement en évidence l'intérêt de ce type de démarche. Cependant, malgré la faiblesse des effets attendus, l'étude reste intéressante dans son principe et l'utilisation de modèle permet de s'affranchir théoriquement de ce genre de limitation.

Test de la stratégie modulée par rapport à un apport homogène équivalent sur l'ensemble de la parcelle

Sur le graphique de la figure 6, nous avons reporté les écarts de rendement (en qx/ha) année par année sur l'ensemble de la parcelle entre conduite modulée et dose homogène pour toutes les zones. On observe des gains de rendement 4 année sur 5. Ces gains restent bien-sûr très faibles, pour les raisons évoquées dans le paragraphe précédent. Ils sont néanmoins en moyenne significativement différents de 0 au seuil de 2% (valeur du test de Student égale à 2.63). La présence de valeurs négatives 1 année sur 5 peut signifier que certaines années, du fait des aléas climatiques, le potentiel de rendement d'une ou plusieurs zones est particulièrement mal estimé par l'indicateur moyen : la dose moyenne peut alors mieux correspondre à la situation, mais de façon purement aléatoire autour d'une tendance moyenne positive et significative de + 0.15 qx/ha. A l'opposé, certaines années où les fertilisations par zone sont particulièrement bien estimées par les indicateurs « moyennes sur 15 ans », le gain apporté par la modulation peut atteindre + 0.5 qx/ha.

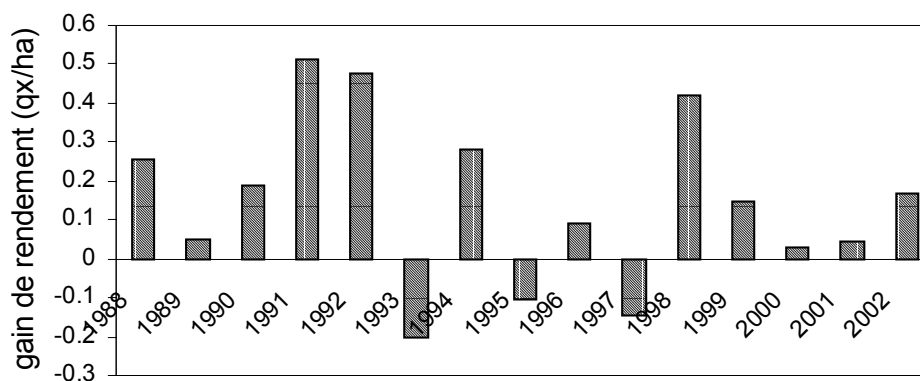


Figure 6. Gains de rendement moyen sur les 3 zones avec la stratégie modulée en fonction des années.

Conclusion partielle

En résumé, une modulation des apports azotés peut apporter des gains significatifs de rendement, mais restant très faibles dans le cas ici présenté. Cette technique nous semble principalement se heurter à 2 limitations : i) le niveau d'hétérogénéité de la parcelle qui fixe le

niveau de l'amplitude sur laquelle la modulation va pouvoir jouer, et ii) la finesse avec laquelle on arrive à estimer le potentiel de rendement de chacune des zones différenciées. Dans les deux parties suivantes, nous allons successivement explorer la portée de chacune de ces 2 pistes, en précisant les situations concrètes auxquelles elles pourraient s'appliquer.

Test avec accroissement de l'hétérogénéité parcellaire

Sources possibles d'hétérogénéité

Nous avons vu que la faiblesse des effets constatés résultait essentiellement d'une conjugaison entre des potentiels de rendement trop faiblement différenciés (moins de 15%) et une fourniture de la parcelle expérimentale en azote du sol très élevée notamment dans les zones de plus haut potentiel. Cependant, dans la réalité, on peut très bien imaginer une parcelle avec un sol un peu plus superficiel que celui de la zone B et des fournitures en azote plus différenciées. Ainsi, plus loin sur le plateau, on peut trouver des sols dont la profondeur se restreint à 50 cm. On peut aussi envisager une parcelle dont seulement une partie aurait reçu des effluents d'élevage ou dont une partie serait formée par une prairie retournée, accroissant ainsi très nettement la fourniture en azote du sol localement. Nous avons ainsi reconstitué une parcelle fictive mais réaliste par rapport à la gamme observée localement. Dans le [tableau 4](#) reprenant les paramètres des différentes zones de sol, nous avons porté en italique les valeurs modifiées par rapport aux simulations précédentes.

Tableau 4. principales caractéristiques pédologiques des nouvelles zones

	Zone A	Zone B	Zone C
Taux de matière organique (MO en %)	1.9	<i>1.9</i>	<i>0.9</i>
Rapport C/N de la MO	10	10	10
Reliquat d'azote minéral au semis (kg/ha)	98	<i>98</i>	<i>49</i>
Profondeur de sol (cm)	110	<i>60</i>	<i>110</i>
Réserve Utile (RU en mm)	125	<i>63</i>	<i>125</i>

Seulement 4 valeurs ont été modifiées de façon significative (en gras plus italique) : i) la profondeur de sol de la zone B, ii) le reliquat d'azote minéral au semis du sol de la zone C et iii) le taux de matière organique de cette même zone C. D'autres valeurs ont été très légèrement modifiées ou arrondies de façon à permettre 2 comparaisons indépendantes : les zones A et B ne variant que par la profondeur de sol et la réserve utile vont permettre d'évaluer cet effet indépendamment de la fourniture du sol en azote, et les zones A et C ne variant que par la fourniture du sol en azote vont permettre d'étudier l'inverse. Enfin la comparaison des zones B et C permettra d'évaluer l'interaction entre les 2 effets. Cela revient en fait à former 3 parcelles fictives mais réalistes, chacune formée de 2 unités.

Calcul des nouvelles fertilisations modulées

Les nouvelles fertilisations modulées et les apports homogènes correspondant aux différentes combinaisons ont été calculés comme précédemment. Les différentes valeurs sont

reportées dans le [tableau 5](#). On observe que finalement le critère Réserve Utile en eau (RU) du sol s'avère assez peu discriminant pour les besoins en azote de la culture. En effet, le potentiel moyen de rendement est plus faible, mais en même temps sa plus grande irrégularité associée au stress hydrique plus important entraîne une moins bonne valorisation de l'azote, et donc des quantités en moyenne plus importantes pour réaliser un rendement donné.

Tableau 5. fertilisations azotées associées aux principales combinaisons testées

	Zone A	Zone B	Zone C
Fertilisation modulée	42.9	34.2	181.2
Apport homogène A et B	38.5	38.5	
Apport homogène A et C	112.0		112.0
Apport homogène B et C		107.7	107.7

Test fréquentiel

Effet RU seul

Comme on pouvait s'y attendre au vu des écarts très faibles de fertilisation, les résultats de la comparaison portant sur les sols A et nouveau B sont très peu concluants, avec quasiment autant de valeurs négatives que de valeurs positives pour les gains de la stratégie modulée par rapport à l'apport homogène (données non montrées). La moyenne des écarts est très légèrement positive (+ 0.02 qx/ha) mais non significativement différente de 0. Le faible écart obtenu entre les fertilisations tient aussi au contexte de forte fourniture en azote du sol, dans lequel on s'est placé. Pour lever cette objection possible au caractère négatif du résultat (absence de gain pour la stratégie modulée), nous avons refait les simulations avec des fournitures en azote du sol équivalentes à celles du sol C. Malgré des fertilisations différant d'une quarantaine de kg/ha entre zones, on n'obtient à nouveau pas de gain significatif ; la moyenne des gains est même maintenant légèrement négative ! (données non montrées)

Dans les zones de potentiel limité par la Réserve Utile en eau (RU), les besoins en azote ne sont en fait pas beaucoup plus faibles : ils sont simplement moins bien valorisés. Par ailleurs, ce potentiel est beaucoup plus irrégulier selon les années, en fonction de la pluviométrie lors du remplissage des graines, si bien que certaines années plus humides, il est assez fortement sous-estimé. L'azote supplémentaire de l'apport homogène est alors particulièrement bien valorisé, ce qui explique tous ces résultats négatifs. Moduler l'azote dans des zones de RU différenciées ne sera donc pas forcément très rentable économiquement.

Effet fourniture du sol en azote seul

Les résultats de la comparaison portant sur les sols A et nouveau C ont été reportés dans le graphe de la [figure 7](#). Malgré la présence de 5 années où les résultats sont négatifs (due aux variations inter annuelles des potentiels de rendement), la modulation présente un gain moyen de + 0.37 qx/ha. Le gain est somme toute assez faible, même si l'on tient compte du prix élevé du quintal pour les graines de colza. Il faut cependant voir qu'il s'agit d'un gain moyenné sur 15 ans et prenant donc déjà en partie en compte l'aléa climatique. Ainsi, certaines années le gain dépasse le quintal.

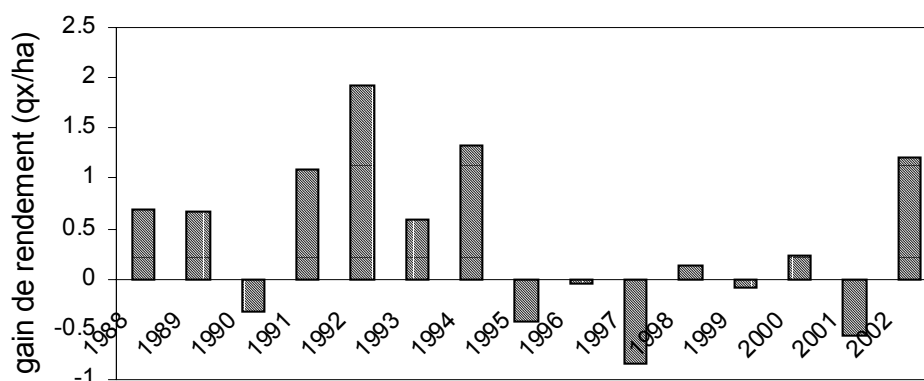


Figure 7. Gains de rendement moyen par modulation sur A et nouveau C en fonction des années.

Interaction entre les 2 effets

Les résultats de la comparaison portant sur les sols nouveau B et nouveau C ont été reportés dans le graphe de la [figure 8](#). Un tiers des années présentent à nouveau des résultats négatifs, mais le gain moyen est cette fois-ci de + 0.70 qx/ha, avec un maximum juste en dessous de 3 qx/ha. Il semble donc que l'interaction entre les deux effets soit des plus positives. Ce résultat nous est confirmée par l'examen de la combinaison symétrique formé de la zone A et de la zone B avec RU modifiée et fourniture en azote du sol elle aussi réduite pour être équivalente à celle du nouveau sol C (données non montrées). L'interaction semble même être encore meilleure, puisque le gain moyen est cette fois-ci de + 0.99 qx/ha.

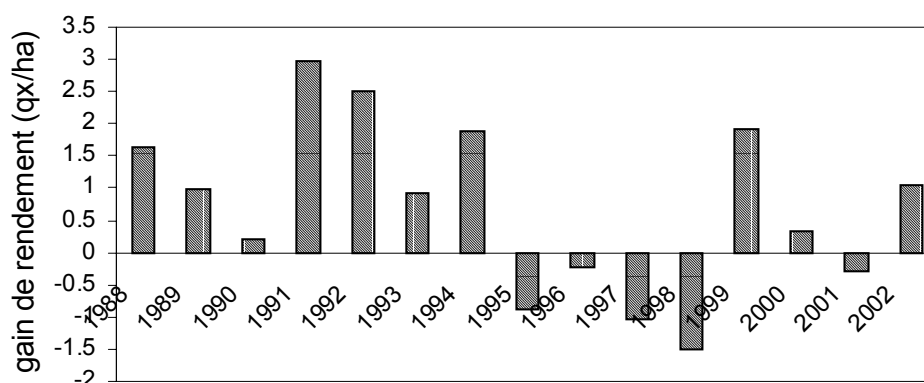


Figure 8. Gains de rendement moyen par modulation sur nouveaux sols B et C en fonction des années.

Conclusion partielle

L'augmentation de l'hétérogénéité parcellaire s'est bien traduite par une augmentation des gains de rendement que l'on peut attendre en modulant les apports azotés par zone, par rapport à des apports homogènes de quantité équivalente. Cependant la nature des hétérogénéités joue un rôle déterminant dans l'ampleur de ces gains, des différences de fourniture en azote du sol se prêtant beaucoup mieux à une valorisation d'une démarche de modulation de la fertilisation azotée qu'une hétérogénéité due à la profondeur ou à la RU du sol. Par ailleurs ces gains sont diminués en moyenne par l'incertitude sur les potentiels de rendement, due aux aléas climatiques. Afin de préciser l'importance de ce facteur, nous allons

examiner dans la partie suivante quelles sont les perspectives d'amélioration de la connaissance du potentiel de rendement.

Amélioration de l'estimation du potentiel de rendement

Principales limites dans la détermination du potentiel de rendement de l'année en cours

Dans le cas du colza, les apports azotés sont systématiquement effectués avant la période de floraison, et le début de celle-ci intervient assez tôt dans le cycle de culture (usuellement fin mars, début avril). Les possibilités d'ajustement de la fertilisation en fonction de l'évolution de la culture, au besoin par assimilation de données dans des modèles, sont donc assez limitées dans le temps. D'autre part, il est assez rare que l'on ait une idée précise du potentiel de rendement à cette période, comme le montre l'absence de lien significatif, dans les graphes de la figure 9, entre d'une part, le rendement, et d'autre part, la biomasse ou le LAI (principale variable sur laquelle se fondent les différentes approches radiométriques) à début floraison, pour notre situation.

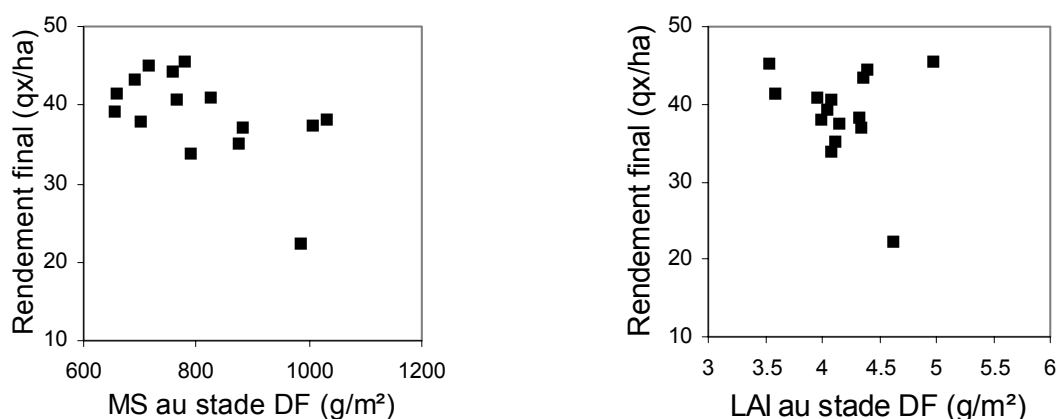


Figure 9. Rendement final en fonction de 2 indicateurs de croissance à début floraison.

Utilisation d'indicateurs précoces en cours de culture

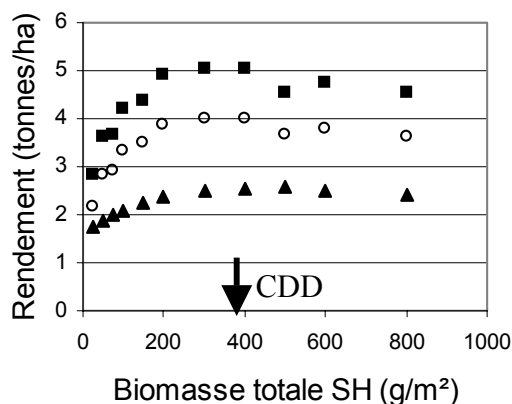


Figure 10. Rendement potentiel en fonction de la biomasse sortie hiver pour différents contextes pédo-climatiques.

En règle générale chez le colza, la fertilisation est calculée au moment du stade sortie hiver (SH), à partir de l'objectif de rendement, de l'azote absorbé par la culture (approché par la biomasse) et de la fourniture attendue en azote par le sol (Lagarde, 2001). Dans le graphe

de la [figure 10](#), nous avons reporté l'évolution du rendement en fonction de l'indicateur « biomasse à SH » pour différents contextes pédo-climatiques. Comme on pouvait s'y attendre d'après la partie précédente, il n'existe pas de liaison nette entre ces 2 variables, et on observe même que notre situation de la Côte Des Divisions (CDD) se situe dans la zone d'incertitude maximale pour le potentiel de rendement. Ainsi, des biomasses SH identiques peuvent conduire à des rendements très différents, et à l'opposé il existe toute une gamme de biomasses SH conduisant à l'obtention d'un même rendement. Cependant, en examinant le début des courbes, on s'aperçoit a contrario qu'il existe un seuil de biomasse SH (environ 200 g/m², Cf. Colnenne et al., 2002), en deçà duquel on ne peut réaliser le potentiel de rendement de l'année. Dans ce genre de situations, la fertilisation devrait donc pouvoir être réduite de façon sensible. Dans le paragraphe suivant, nous allons examiner quelles conditions peuvent conduire à ce genre de situations, et le parti qu'il est possible d'en tirer.

Cas des parcelles à croissance automnale limitante

Facteurs d'hétérogénéité de la croissance automnale

Comme nous l'avons vu plus haut, une parcelle peut présenter des différences de reliquat azoté au moment du semis. Si ces différences sont suffisamment fortes, on peut avoir une pénalisation de la croissance automnale sur une partie de la parcelle, telle qu'elle ne puisse être rattrapée. Ensuite il y a le cas de semis interrompus par la pluie : quelquefois l'épisode dure suffisamment longtemps pour générer de forts écarts de croissance. Il peut y avoir en outre interaction avec la cause précédente. En effet, le couvert moins développé est aussi moins apte à absorber le reliquat azoté avant lessivage hors de portée des racines, et la croissance se trouvera alors d'autant plus pénalisée par rapport à la date normale de levée. Enfin on peut penser au cas des mouillères souvent présentes en bas de parcelle, et où la croissance est souvent très réduite du fait de l'anoxie. De même certains problèmes de ravageurs peuvent présenter une structuration dans l'espace, comme par exemple les attaques de limaces en bordure de prairie ou friche.

Evaluation de la stratégie de modulation

Les simulations dans ce genre de situations à croissance automnale limitante montrent des résultats non clairs. Certes le potentiel de rendement est moins élevé, entraînant des besoins totaux en azote moindres. Mais en même temps, la culture étant moins développée a absorbé moins d'azote au stade SH et nécessite donc des apports azotés plus élevés pour l'obtention d'un rendement donné. La plupart du temps, il y a plus ou moins compensation entre les deux effets, ce qui conduit à des besoins en azote sensiblement identiques, rendant toute technique de modulation inopérante (données non montrées). Ce genre de situations, malgré une hétérogénéité pouvant être très marquée, ne présente donc pas un champ d'application très intéressant à une démarche de modulation de la fertilisation azotée.

Intérêt supplémentaire de l'agriculture de précision pour une application à la préservation de l'environnement

Prise en compte des pertes en nitrate dans le contexte agricole usuel

Jusque là, nous avons voulu étudier l'intérêt **intrinsèque** de la modulation de la fertilisation azotée, d'où la nécessité de raisonner en comparant la stratégie modulée à un apport homogène de quantité **équivalente** pour éviter une confusion avec des effets « dose ». Dans ces conditions d'équité totale, nous avons vu qu'il était possible d'espérer des gains de rendement, certes plutôt faibles, mais néanmoins souvent significatifs. Cela implique en même temps une meilleure valorisation de l'azote et donc déjà des gains pour l'environnement.

Cependant, dans la pratique agricole usuelle, la fertilisation de la parcelle est plutôt ajustée par rapport aux meilleurs rendements de la zone de plus fort potentiel et non pas au potentiel moyen de la parcelle. En effet, les agriculteurs visent avant tout pour la plupart à maximiser la rentabilité de leur parcelle, et le différentiel de prix entre quintal de graines et quantité d'engrais azoté nécessaire pour le produire fait qu'il est toujours plus rentable dans le contexte économique actuel de sur-fertiliser un peu, plutôt que de risquer des pertes de rendement par sous-fertilisation (Cf. chapitre suivant, Jullien *et al.*).

Dans le contexte élargi d'une agriculture plus respectueuse de l'environnement, la modulation des apports azotés selon l'hétérogénéité de la parcelle peut s'avérer un excellent outil pour améliorer les pratiques, et notamment les pertes par lixiviation de nitrate. C'est ce que nous avons voulu quantifier dans cette partie. Il ne s'agit plus alors de parler de gain de rendement, mais de diminution des pertes en nitrate par lessivage par un meilleur ajustement de la fertilisation azotée, ceci sans trop pénaliser les rendements, de façon à rester attractif pour les agriculteurs.

Définition de la stratégie de modulation

Raisonnement à l'échelle de la succession culturale

Comme nous l'avons souligné dans l'introduction, les pertes par lessivage de nitrate dues à un excès de fertilisation de la culture d'une année donnée ont surtout lieu dans l'hiver de l'année suivante, et non pas sous la culture elle-même. Si l'on veut aborder le problème dans toute sa globalité, il y a donc nécessité de considérer la succession culturale dans son ensemble.

Quelle culture vaut-il mieux moduler ?

Dans la parcelle étudiée comme dans la plupart des régions de France, le colza se trouve principalement en rotation avec du blé. Nous n'étudierons donc que ce cas-là. Par ailleurs, le colza implanté dans de bonnes conditions possède des capacités très importantes d'absorption d'azote à l'automne (Dejoux, 1999 ; Dejoux *et al.*, 2003). Ce n'est pas le cas du blé qui présente une croissance beaucoup plus limitée durant cette période et sous lequel, à moins d'une sécheresse importante à l'automne, l'excès de fertilisation précédente est généralement lessivé avant d'être en mesure d'être absorbé (Bouthier *et al.*, 2003). On peut donc en déduire qu'un excès de fertilisation sur un blé suivi par un colza aura beaucoup moins de conséquence que la situation inverse. D'un point de vue environnemental, il y a donc un intérêt beaucoup plus fort à moduler la fertilisation azotée de la culture de colza que celle du blé. Donc, dans cette étude, nous nous limiterons à l'étude de l'effet de la modulation de la fertilisation du colza sur les pertes en nitrate sous la culture suivante.

Choix de la situation

Pour être plus démonstratif, nous avons retenu un des exemples dérivés précédents où la modulation n'avait pas donné de résultat positif sur le rendement malgré des fertilisations assez différentes : le cas de la comparaison où ne variait que la RU, avec la combinaison du nouveau sol C et du nouveau sol B avec fourniture du sol en azote équivalente à celle du sol C (Cf. supra, paragraphe effet RU seul). Pour se rapprocher de la pratique des agriculteurs, la fertilisation modulée a été calculée comme objectif de rendement le premier quartile et non pas le rendement moyen. Cela conduit à des fertilisations de respectivement 170 et 206 kg/ha pur les zones B et C.

Test de la stratégie de modulation pour diminuer le reliquat azoté après culture

Dans ce test, seule la fertilisation de la zone B varie : elle est soit égale à celle de C (apport homogène), soit inférieure de 36 kg/ha (apport modulé). Nous avons représenté dans le graphe de la [figure 11](#) les quantités supplémentaires d'azote restant sur la parcelle après la récolte (sous formes organique et minérale), dans le cas de l'apport homogène par rapport à la stratégie modulée. Ces quantités, toutes positives, représentent en moyenne 7.6 kg/ha, et sont très hautement significativement différentes de 0 (probabilité inférieure à 0.001 %), comme on pouvait s'y attendre. Par ailleurs la perte moyenne de rendement reste assez faible, inférieure à 0.19 qx/ha. Ces quantités sont à comparer aux 18 kg/ha supplémentaires apportés sur l'ensemble de la parcelle (36 kg/ha sur la moitié de la parcelle) : si certaines années on atteint presque la totalité du montant de l'apport supplémentaire, il y a à nouveau une certaine érosion du résultat fréquentiel moyen, mais beaucoup plus faible que dans le cas des gains de rendement. En effet, la valeur moyenne reste quand même égale à 42 % du total. La différence se répartit dans le léger gain de rendement pour l'apport homogène les années où le potentiel est sous-estimé, et en une légère augmentation de la teneur en protéine des graines, favorisée par l'excès d'azote.

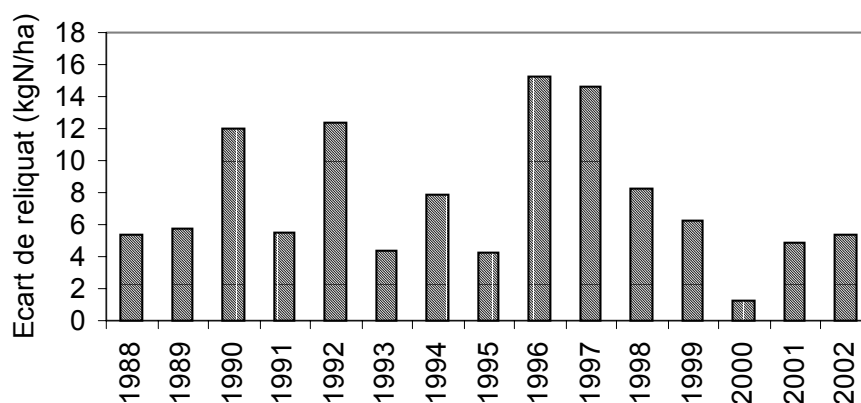


Figure 11. Quantités d'azote supplémentaires restant sur la parcelle après culture dans le cas d'un apport homogène par rapport à la stratégie modulée.

Cette étude confirme donc l'intérêt de premier plan de l'agriculture de précision dans la lutte pour la préservation de l'environnement. Même si les gains restent quantitativement faibles en regard de ceux permis par d'autres techniques (un cinquième environ de ceux que l'on constate avec une culture intermédiaire ou une couverture permanente réussie...) et des pertes totales, ils sont néanmoins loin d'être négligeables. A titre d'illustration en supposant que la totalité serait lessivée lors de l'hiver suivant, 7.6 kg/ha d'azote en moins avec une lame

d'eau de drainage moyenne de 167 mm représentent quand même une diminution de plus de 15 mg/l de la concentration en nitrate de ces eaux de drainage.

Conclusion générale

A travers l'exemple finalement assez riche de la parcelle CDD, même si l'expérimentation mise en place n'a que partiellement réussi, nous avons pu mettre en évidence et analyser l'effet de nombreux facteurs sur l'intérêt d'une démarche de modulation de la fertilisation azotée. L'utilisation du modèle de culture CERES-rape nous a ainsi permis de montrer par analyse fréquentielle l'érosion très importante des gains du fait de l'aléa climatique. En effet cet aléa entraîne une forte incertitude sur le potentiel de rendement effectif de l'année, et donc une difficulté pour ajuster réellement au mieux les apports azotés.

Dans cet article, nous avons aussi exploré plusieurs voies ou situations pouvant permettre de renforcer l'intérêt de l'agriculture de précision, à savoir une forte hétérogénéité de la fourniture en azote du sol, des problèmes localisés de croissance automnale, et une meilleure prise en compte de la préservation de l'environnement. Il faudrait sans doute aussi ajouter le degré d'hétérogénéité climatique entre années : en effet, cette étude a été conduite dans le contexte du climat de la région parisienne durant ces 15 dernières années, et les résultats pourraient s'avérer très différents dans un autre contexte climatique.

Enfin, nous avons montré que du point de vue phytosanitaire, le phoma ne paraissait pas structuré par l'hétérogénéité spatiale du sol. Par contre des peuplements de développements très variables (date de levée, azote...) peuvent présenter des niveaux d'attaque très différents, et un des enjeux futurs sera sûrement de parvenir à intégrer ces effets dans le raisonnement de la modulation.

References

- Aubertot, J.N., Dupeuble, F., Gripon, S., Pinochet, X., Penaud, A., Taverne, M., Reau, R., 2002. Phoma du colza : vers une protection intégrée. Les Rencontres Annuelles du CETIOM, 22-30. 3 et 4 décembre, Paris.
- Aubertot, J.N., Schott, J.J., Penaud, A., Brun, H., Doré, T., a. Methods for sampling and assessment in relation to the spatial pattern of phoma stem canker (*Leptosphaeria maculans*) in oilseed rape. Eur. J. Plant Pathol. Sous presse.
- Aubertot J.N., Pinochet X., Doré T. b. The effects of sowing date and nitrogen availability during vegetative stages on *Leptosphaeria maculans* development on winter oilseed rape. Crop Protection. Sous presse.
- Bouthier A., Wagner D., Champolivier L., Reau R., 2003. Test de systèmes de cultures colza-blé réduisant les pertes de nitrates. Essai mené en terres de groies du Magneraud (17). Rapport ADEME n°99 01 037. 30p.
- Colnenne C., Meynard J.M., Reau R., Justes E., Merrien A., 1998. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter oilseed rape. Annals of Botany 81: 311-317.
- Colnenne C., Roche R., Meynard J.M.- 1999- Test of the CERES-Rape model for winter oilseed rape: effect of the plant nitrogen status on yield components. 10th International Rapeseed Congress- Canberra, Australia- 26-29 septembre 1999.
- Colnenne C., Meynard J.M., Roche R., Reau R., 2002. Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape. Europ. J. Agronomy 17:11-28.
- 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. American Society of Agronomy, Madison, USA.

- Dejoux J.F., 1999. Evaluation d'itinéraires techniques du colza d'hiver en semis très précoces. Analyse agronomique, conséquences environnementales et économiques. Thèse de doctorat, INA P-G, Paris, 244 p. + annexes.
- Dejoux J.F., Meynard J.M., Reau R., Roche R., Saulas P., 2003. Evaluation of environment friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agronomie* 23: 725-736.
- Driessen P.M., 1986. The water balance of soil. In: *Modelling of agricultural production: weather, soils and crops*, éd. Par van Keulen H. et Wolf J., p. 76-116. Wageningen, Pudoc.
- Eghball, B., G. W. Hergert, G. W. Lesoing, R. B. Ferguson, 1999. Fractal analysis of spatial and temporal variability. *Geoderma* 88(3/4): 349-362.
- Gabrielle B., Menasseri S., Houot S., 1995. Analysis and field evaluation of the CERES models water balance component. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 59, no 5, 1403-1412.
- Gabrielle B., Kengni L., 1996. Analysis and field-evaluation of the CERES model's soil components: nitrogen transfer and transformations. *Soil Science Society of America Journal*. Vol. 60, no.1, 142-149.
- Gabrielle B., Denoroy P., Gosse G., Justes E., Andersen M.N., 1998a. A model of leaf area development and senescence for winter oilseed rape. *Field Crops Res.* 57: 209-222.
- Gabrielle B., Denoroy P., Gosse G., Justes E., Andersen M.N., 1998b. Development and evaluation of a CERES-type model for winter oilseed rape. *Field Crops Res.* 57: 95-111.
- Gabrielle, B., P. Huet, J. M. Gilliot, P. Boissard, D. Boffety, P. Zwaenepoel (2001). Prediction of wheat crop yield map using post-anthesis radiometrical data. Third ECPA, Montpellier, France.
- Gabrielle B., Roche R., Angas P., Cantero-Martinez C., Cosentino L., Mantineo M., Langensiepen M., Henault C., Laville P., Nicoullaud B., Gosse G.- 2002 - A priori parameterisation of the CERES soil-crop models and tests against several European data sets. *Agronomie*, 22, 119-132.
- Hirst, J.M., 1952. An automatic volumetric spore trap. *Ann Appl. Biol.* 39, 257-265.
- Jones C.A., Kiniry J.R., 1986. CERES-N Maize: a simulation model of maize growth and development. Temple, TX, Texas A&M University Press, College Station.
- Killian, B., 2001. Economic aspects of precision agriculture: an economic assessment of different site-specific N-fertilization approaches. Third European Conference on Precision Agriculture, Montpellier, France, AgroMontpellier Ecole Nationale Supérieure Agronomique.
- Lagarde F., 2001. La réglette azote colza: un outil performant et fiable pour ajuster la dose d'azote au printemps. *CETIOM – Oléoscope* 59: 10-11.
- Lemaire G., Salette J., 1984. Relation entre dynamique de croissance et dynamique de prélèvement d'azote pour un peuplement de graminées fourragères. I Etude de l'effet du milieu. *Agronomie* 4: 423-430.
- Martin, P., Aubry C., 2000. Précision en agriculture et contraintes de production ou comment concilier horloge et boussole. Colloque AFGR Précision des pratiques agricoles et environnement. Actes du colloque, Rennes.
- Molina J.A.E., Clapp C.E., Schaffer M.J., Chichester F.W., Larson W.E., 1983. NCSOIL, a model of nitrogen and carbon transformation in soil: description, calibration and behavior. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 47: 85-91.
- Monteith J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J. appl. Ecol.*, 9: 747-766.
- O'Neal, M. R., J. R. Frankenberger, D. Ess, R., 2002. Use of CERES-Maize to study effect of spatial precipitation on variability on yield. *Agricultural Systems* 73: 205-225.
- 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* 44(5): 1329-1334.
- 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.
- Sadowski, C., Musnicki, C., Lemańczyk, G., Drozdowska, L., Trzcińska, E., 1998. Effect of different nitrogen fertilization and absence of pest control on health status of rapeseed. *IOBC Bulletin*, 21, 221-226.
- Söchting, H.P., Verreet, J.A., 2003. Effects of different cultivation systems (soil management, nitrogen fertilisation) on the epidemiological behaviour of fungal diseases in oilseed rape (*Brassica napus* L.). Proceedings of the 11th International Rapessed Congress. 6-10 July, Copenhagen, Denmark. 4: 1134.
- Thrikawala, S., A. Weersink, G. Kachanoski, G. Fox, 1999. Economic feasibility of variable-rate technology for nitrogen on corn. *American Journal of agricultural economy* 81: 914-927.

Titre d'ouvrage ou titre de partie

West, J.S., Kharbanda, P.D., Barbetti, M.J. and Fitt, B.D.L., 2001. Epidemiology and management of *Leptosphaeria maculans* (phoma stem canker) on oilseed rape in Australia, Canada and Europe. *Plant Pathol.* 50, 10-27.

