



HAL
open science

Elaboration d'un indicateur de nutrition azotée du blé basé sur l'indice foliaire et la teneur en chlorophylle pour la préconisation de doses d'azote

V. Houlès, Martine Guerif, Philippe Gate, Jean-Marie J.-M. Machet, Sophie
Moulin

► To cite this version:

V. Houlès, Martine Guerif, Philippe Gate, Jean-Marie J.-M. Machet, Sophie Moulin. Elaboration d'un indicateur de nutrition azotée du blé basé sur l'indice foliaire et la teneur en chlorophylle pour la préconisation de doses d'azote. Agriculture de précision, Editions Quae, 2007, 9782759200191. hal-02824250

HAL Id: hal-02824250

<https://hal.inrae.fr/hal-02824250>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Élaboration d'un indicateur de nutrition azotée du blé basé sur l'indice foliaire et la teneur en chlorophylle pour la préconisation de doses d'azote

V. HOULÈS, M. GUÉRIF, B. MARY, P. GATE, J.-M. MACHET, S. MOULIN

Introduction

Des méthodes de préconisation de la fertilisation azotée éprouvées existent et sont utilisées en routine à l'échelle de la parcelle dans les grandes régions de production céréalières. On peut en distinguer deux principales catégories : celles qui sont basées sur des analyses de sol et celles qui sont issues d'un diagnostic de l'état de nutrition azotée de la culture. Dans la première catégorie on trouve notamment la méthode du bilan azoté (Stanford, 1973) dont le logiciel Azobil (Machet *et al.*, 1990) est une des applications les plus employées dans le nord de la France. Elle consiste en une évaluation en sortie d'hiver de la quantité d'azote dont la culture aura besoin jusqu'à la récolte. Pour ce faire, on mesure la quantité d'azote minéral restant dans le sol après la lixiviation hivernale et qui constitue une réserve pour la plante. On mesure également la teneur en azote organique de l'horizon labouré de façon à pouvoir prédire l'azote alloué à la culture par la minéralisation. Enfin, on évalue les besoins absolus de la plante en azote d'après un objectif de rendement que l'on se fixe notamment en fonction de l'historique de la parcelle. La seconde catégorie de méthodes de préconisation est illustrée par la méthode Jubil (Justes *et al.*, 1997). Celle-ci est, dans la pratique, complémentaire de la méthode Azobil. Elle consiste en effet à fractionner les apports préconisés par cette dernière et à en réserver une certaine quantité, par exemple $40 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1}$. Des mesures de son statut azoté sont effectuées à divers rendez-vous au cours du cycle de la culture. En fonction de leur résultat, la quantité d'azote mise de côté est rajoutée ou non. Si dans la méthode Jubil l'évaluation du statut azoté de la culture passe par la mesure de la teneur en nitrates du jus de base de tige du blé, ce qui peut présenter des limites du point de vue pratique, des méthodes telles que le Hydro-N-Tester de Hydro-Agri proposent, sur le même principe, des solutions alternatives. L'évaluation du statut azoté de la culture est ici effectué au moyen d'un chlorophylle-mètre dont les mesures rapides, basées sur la transmittance de la feuille et calibrées pour chaque groupe de variétés, permettent aussi de

statuer sur la nécessité d'un apport d'azote complémentaire par des règles de décision analogues à celles de Jubil.

L'ensemble de ces méthodes, si utilisées qu'elles soient, peuvent difficilement s'adapter aux contraintes et requis en densité d'échantillonnage de l'agriculture de précision. La méthode Hydro-N-Tester, si rapide soit-elle dans ses conditions normales d'utilisation, à savoir la caractérisation d'une parcelle entière, ne permet pas de couvrir de façon exhaustive un champ, et donc de caractériser à l'échelle intra-parcellaire le statut azoté de la culture. La société Hydro-Agri propose un autre type de capteur, embarqué sur tracteur, qui est censé donner des mesures équivalentes à celles du chlorophylle-mètre. Il réalise en réalité des mesures de réflectance du couvert lors des passages de l'engin. C'est ce que l'on appelle de la proxydétection, mais en pratique, la couverture spatiale du champ n'est pas exhaustive car les mesures se font de part et d'autres des lignes de passage d'engin, sur une bande trop étroite pour couvrir l'ensemble de la parcelle. Une couverture plus large poserait d'importants problèmes de visée oblique, vu la faible hauteur à laquelle se trouve le capteur.

Un moyen de caractérisation spatiale exhaustive de la culture, proche dans le principe de ce genre de capteur et dont l'utilisation est beaucoup plus développée et généralisée, est de recourir à la télédétection (*cf.* Moulin *et al.*, cet ouvrage). Cette technique d'observation apporte en effet une bonne solution au problème spatial puisque, par définition, elle effectue des mesures en tout point de la parcelle, et ce avec une résolution compatible avec les exigences de l'agriculture de précision ($5 \times 5 \text{ m}^2$ pour le satellite Spot et jusqu'à $2 \times 2 \text{ m}^2$ pour des capteurs embarqués sur aéronef). Le second intérêt de la télédétection dans la problématique qui nous préoccupe est que les variables auxquelles elle donne accès – le chapitre cité ci-dessus détaille de quelles façons on peut déterminer l'indice de surface foliaire (*LAI*) ou la teneur en chlorophylle des feuilles (*Cab*) – peuvent être liées de façon déterministe à des variables telles que l'indice de nutrition azoté (*INN*) qui fait référence en matière de caractérisation du statut azoté (Lemaire *et al.*, 1997), ou à des variables traduisant un déficit d'absorption de l'azote. Cette liaison, vue sous l'angle expérimental, fait l'objet du présent chapitre : nous chercherons en effet à montrer comment on peut passer des variables biophysiques déterminées par télédétection – *LAI*, *Cab* et le produit des deux, correspondant à la quantité de chlorophylle présente dans le couvert, noté *QCab* – à des préconisations de fertilisation azotée.

Cette façon d'utiliser des informations issues de mesures de télédétection en passant par ce qu'il convient d'appeler des indicateurs peut être mise en parallèle d'approches plus complexes et basées sur l'utilisation de modèles de culture qui font l'objet de développement dans la partie 4 de cet ouvrage.

Principe de l'approche

Cette approche de préconisation de la fertilisation azotée, basée sur le calcul d'indicateurs du statut azoté de la culture à partir de variables biophysiques, est une généralisation à l'échelle intra-parcellaire des méthodes développées pour être utilisées à l'échelle de la parcelle entière. Nous chercherons donc à déterminer un déficit d'absorption par rapport à une situation optimale. Cette dernière sera décrite à l'aide du concept de courbe de dilution rappelé ici.

Courbe de dilution de teneur en azote et déficit de fertilisation

Le concept de courbe de dilution traduit le fait que la teneur en azote des parties aériennes d'un peuplement végétal diminue, se « dilue », au cours de sa croissance. Cette dilution est liée à deux processus : l'auto-ombrage des feuilles et la diminution du rapport feuille sur tige au cours du développement (Justes *et al.*, 1994). La courbe de dilution est définie dans le plan formé en abscisse par l'axe de la biomasse et en ordonnée par l'axe de la teneur en azote des parties aériennes du peuplement (fig. 1 a et b). Elle correspond à une situation de nutrition azotée optimale, aussi parle-t-on également de courbe de dilution critique. Pour chaque espèce, elle peut être construite par l'ensemble des points correspondant, pour une date donnée, à la teneur en azote au-delà de laquelle la matière sèche aérienne n'augmente pas de façon significative malgré une augmentation de la fourniture d'azote (fig. 1a). Pour les plantes en C3, dont le blé, elle peut être paramétrée comme suit (Justes *et al.*, 1997) :

$$N_C = 5,35 \text{ si } W \leq 1 \text{ t.ha}^{-1} \quad [1]$$

$$N_C = 5,35 \cdot W^{0,442} \text{ si } W \geq 1 \text{ t.ha}^{-1} \quad [2]$$

où N_C est la teneur en azote critique exprimée en g d'azote pour 100 g de matière sèche et W la matière sèche des parties aériennes donnée en t.ha^{-1} .

Cette courbe de dilution critique délimite trois zones dans le plan (fig. 1b). Si la teneur en azote réelle d'un couvert végétal donné, notée N_R , est égale à N_C , le couvert est à l'optimum de la nutrition azotée. Si $N_R < N_C$, le couvert végétal est en état de carence et si au contraire $N_R > N_C$, il est en état de surfertilisation, ce qui se traduit par une consommation d'azote dite de luxe. Cependant, étant donné un couvert caractérisé par le couple $\{W_R - N_R\}$, il y a deux façons de calculer la teneur en azote critique. Dans l'absolu, il faudrait utiliser la valeur de la courbe critique correspondant à la biomasse qu'aurait atteint le couvert s'il n'avait jamais été en état de carence, W_{opt} (fig. 1 b). Mais en pratique, on utilise la teneur en azote critique calculée en fonction de W_R et notée $N_{C|R}$ (fig. 1 b). Ceci est traduit par l'indice de nutrition azoté, INN , qui est défini comme le rapport de ces deux teneurs :

$$INN = N_R / N_{C|R} \quad [3]$$

Ces définitions ne sont néanmoins valables qu'au cours de la période végétative. Durant le remplissage des grains, la teneur en azote de la plante décline plus rapidement du fait de l'accumulation d'amidon dans les grains : l'utilisation de l' INN ou de la courbe de dilution au cours de cette phase doit donc se faire avec circonspection (Lemaire & Gastal, 1997).

On peut très simplement passer de la courbe de dilution à une courbe critique d'absorption en azote (fig. 1 c) : il suffit pour cela de multiplier l'axe des ordonnées par la matière sèche, et on obtient la courbe donnant la quantité d'azote absorbée en condition optimale en fonction de la biomasse, notée QN_C . On peut ainsi déterminer, pour des points expérimentaux donnant l'azote absorbé par un couvert, QN_R , et sa biomasse, W_R , l'excès ou le déficit d'absorption, noté ΔQN :

$$\Delta QN = QN_R - QN_{C|R} \quad [4]$$

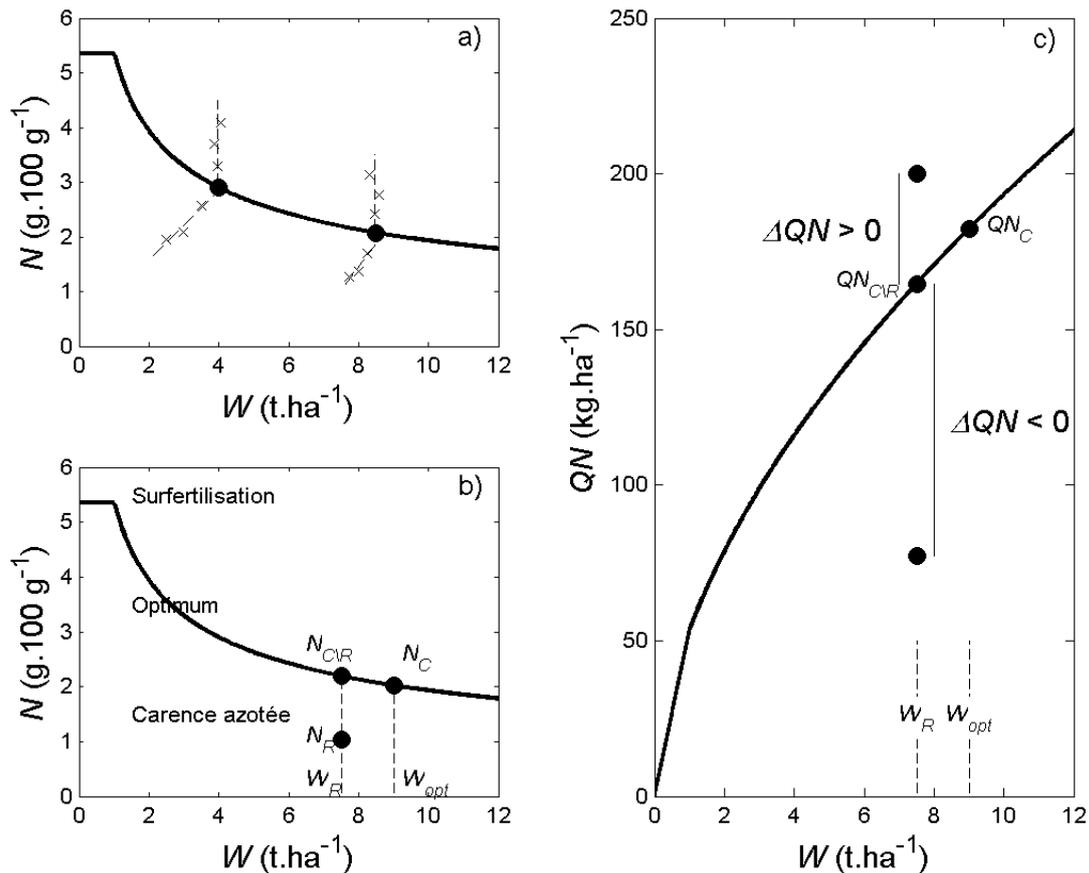


Figure 1. Courbe de dilution et déficit d'absorption. a) Construction de points de la courbe de dilution (ronds pleins) à partir de points expérimentaux (croix) ; b) Les trois zones définies par la courbe de dilution – Définition de la teneur en azote critique à partir d'une mesure de biomasse réelle (W_R) et de teneur en azote réelle (N_R) : N_{CR} est la projection de W_R sur la courbe de dilution, tandis que N_C est déterminé en fonction de la biomasse qu'aurait atteinte le couvert s'il n'avait jamais subi de carence azotée, W_{opt} (ronds pleins) ; c) Courbe d'absorption critique et déficit d'absorption : le déficit ou l'excès d'absorption sera calculé en fonction de la quantité d'azote qu'aurait dû absorber la culture à la biomasse observée plutôt qu'à la biomasse W_{opt} .

De la même façon que l'on utilise N_{CR} pour le calcul de l'INN, on utilisera dans cette étude QN_{CR} pour calculer le déficit ou l'excès d'absorption. On peut en effet considérer qu'une plante qui est dans l'état $\{W_R - N_R\}$ avec $N_R < N_C$ et donc $W_R < W_{opt}$ a accumulé un retard de croissance qu'elle ne pourra pas rattraper. Le but est alors de lui permettre de retrouver le niveau d'absorption d'azote qui est autorisé par sa biomasse réelle. En outre, cela permet d'économiser de l'azote, et de ne pas chercher à surfertiliser pour compenser des carences qui peuvent être liées à d'autres facteurs.

La problématique de ce chapitre consistera donc à lier ΔQN calculé de cette manière aux grandeurs que l'on peut déduire des mesures de télédétection.

Trois voies de calcul de ΔQN à partir de Cab et LAI

Gate (2000) propose d'estimer l'INN par des relations empiriques avec la valeur de Cab obtenue grâce aux données de télédétection. La variable LAI permet quant à elle d'estimer W_R par le biais de modèles écophysologiques de conversion. W_R donne alors accès à N_{CR} et QN_{CR} grâce à la courbe de dilution (équations [1] et [2]). Connaissant INN et N_{CR} ,

l'équation [3] permet de retrouver N_R et, partant de là, QN_R grâce à W_R (fig. 2 a). Ce mode de calcul sera nommé « méthode 1 ».

Le calcul de l' INN correspond à une volonté de se raccrocher à un indicateur qui fait référence ; mais pour déterminer un déficit d'absorption, il peut être plus simple de ne pas le choisir comme intermédiaire. On propose donc une deuxième méthode (fig. 2 b) qui consiste à calculer directement N_R à partir de Cab grâce à des relations expérimentales. De la même façon que pour la première méthode, on peut passer aux quantités absorbées grâce à l'évaluation de W_R à partir de LAI .

Toujours pour simplifier les calculs et pour utiliser la variable intégrée $QCab$, *a priori* mieux évaluée par télédétection, on peut choisir d'évaluer QN_R directement à partir de cette dernière : c'est ce que nous appellerons la méthode 3 (fig. 2 c).

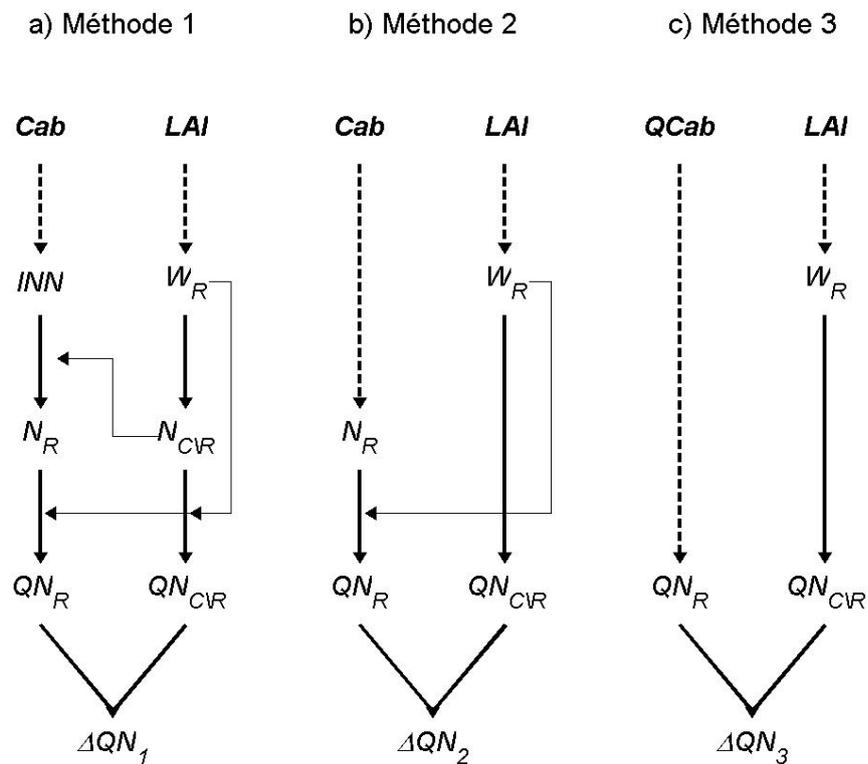


Figure 2. Méthodes de calcul du déficit d'absorption. a) En prenant comme intermédiaire l' INN (d'après Gate, 2000) ; b) En prenant comme intermédiaire N_R ; c) En utilisant $QCab$ pour calculer directement QN_R . Les flèches pointillées représentent des relations expérimentales, les flèches pleines les relations données par les équations [1] à [4].

Relation entre LAI et biomasse et entre chlorophylle et azote

La liaison entre les variables LAI et matière sèche (W) a fait l'objet de nombreux travaux et est d'ailleurs à la base de la plupart des modèles de culture qui s'appuient sur la relation de Monteith (1972). Celle-ci donne l'accroissement potentiel journalier de la matière sèche en fonction de LAI :

$$\Delta W_j = \varepsilon_{a_max} \cdot (1 - e^{-k \cdot LAI_j}) \cdot \varepsilon_b \cdot PAR_j \quad [5]$$

où ΔW_j désigne l'accroissement de matière sèche au jour j ($\text{t}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$), ε_{a_max} l'efficacité maximale d'interception du rayonnement par le couvert (sans dimension), k le coefficient d'extinction du rayonnement dans le couvert (sans dimension), ε_b l'efficacité de conversion du rayonnement intercepté ($\text{t}\cdot\text{MJ}^{-1}$) et PAR_j la quantité de rayonnement efficace du point de vue de la photosynthèse (*Photosynthetically active radiation*, $\text{MJ}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{jour}^{-1}$).

Dans le calcul de ΔQN , nous aurions pu utiliser ce genre de relations, qui nécessitent cependant de connaître la variable *LAI* pour tous les jours de croissance, outre les valeurs de *PAR*. Ou, comme proposé par Gate (2000), nous aurions pu utiliser des modèles simples qui sont du reste basés sur cette équation. Dans le cadre de ce travail, nous nous contenterons néanmoins d'utiliser des relations empiriques entre *LAI* et *W*, ces relations empiriques étant les mêmes pour les trois méthodes de calcul de ΔQN comparées.

En ce qui concerne les relations entre les teneurs en chlorophylle et en azote dans la plante, l'hypothèse de base est que la chlorophylle étant un élément essentiel de la biochimie des feuilles par son rôle dans la photosynthèse, elle est liée à l'ensemble des éléments du métabolisme cellulaire, et notamment les protéines. On peut séparer l'azote contenu dans les feuilles en deux pools : celui qui est directement impliqué dans la photosynthèse et donc associé à la chlorophylle et celui qui est impliqué dans le reste du métabolisme. Hikosaka & Terashima (1996) indiquent un ordre de grandeur de chacun de ces pools : l'azote impliqué dans la photosynthèse représente environ 50 % de l'azote total des feuilles. L'azote contenu dans les protéines non photosynthétiques représenterait environ 30 % et les autres formes d'azote 20 %. Lawlor *et al.* (1997) donnent des ordres de grandeur similaires : 55 % pour l'azote impliqué dans la photosynthèse, 25 % pour les protéines non photosynthétiques et 20 % pour l'azote structural. Hikosaka & Terashima (1995) proposent un modèle, validé par eux-mêmes en 1996, donnant la répartition de l'azote entre les différents constituants de l'appareil photosynthétique en fonction de facteurs trophiques. Celui-ci est basé sur des relations quantitatives entre ces constituants qui s'apparentent à des relations stœchiométriques ; cette approche intéressante présente au demeurant deux limites : elle ne permet pas d'estimer le reste de l'azote contenu dans les feuilles ; de nombreux auteurs mettent en évidence l'extrême complexité des relations « stœchiométriques » liant les différents éléments de l'appareil photosynthétique. Les stress azoté et hydrique notamment affecteraient les relations entre divers constituants impliqués dans la photosynthèse (Macnab *et al.*, 1987 ; Sivanskar *et al.*, 1998 ; Lu & Zhang, 2000 ; Esquivel *et al.*, 2000 ; Karrou & Maranville, 1995 ; Shangguan *et al.*, 2000). Le Roux *et al.* (2001) rapportent une influence de la position de la feuille dans le couvert sur la répartition de l'azote disponible dans les différents pools photosynthétiques et d'autres auteurs indiquent également un gradient vertical de la concentration en azote dans le couvert qui pourrait résulter de différences dans la stœchiométrie photosynthétique (Shiraiwa & Sinclair, 1993 ; Lemaire & Gastal, 1997 ; Bindraban, 1999). Esquivel *et al.* (2000), Karrou & Maranville (1995) et Shangguan *et al.* (2000) attestent également un effet du génotype sur la stœchiométrie, ce qui constitue une preuve de l'existence d'une régulation complexe, d'ordre génétique, de celle-ci. Enfin, Macnab *et al.* (1987) observent un effet de la température sur la répartition de l'azote entre chlorophylle a et b, et Osaki *et al.* (1993) montrent un effet de l'âge de la plante sur la répartition de l'azote entre les différents pools, dépendant du génotype.

Ce bref aperçu indique que la chlorophylle et l'azote sont bel et bien liés dans le métabolisme cellulaire : la quantité de chlorophylle conditionne l'efficacité de la photosynthèse et celle-ci conditionne le reste du métabolisme par sa fonction de producteur primaire. Mais il existe des régulations complexes entre les différents éléments de la chaîne.

Il faut donc être conscient que les relations expérimentales pouvant être établies à l'échelle du couvert entre des teneurs en chlorophylle et en azote resteront hautement empiriques. En outre, la quantité d'azote contenue dans la chlorophylle est minime par rapport à l'azote total de la feuille. Par exemple, pour une concentration en chlorophylle a et b de $1,33 \cdot 10^{-2} \text{ g g}^{-1}$ et en azote de $4,17 \cdot 10^{-2} \text{ g g}^{-1}$, pour un ratio de chlorophylle a sur b de 3, et compte-tenu du poids molaire des chlorophylles a et b, l'azote contenu dans les molécules de chlorophylle représente 2 % de l'azote total (ces valeurs ont été extraites du jeu de données utilisé au cours de ce travail).

À l'échelle du couvert, une très grande majorité des travaux traitant de la relation entre teneurs en chlorophylle et en azote remplace les premières par des mesures indirectes effectuées avec des chlorophylle-mètres, de type SPAD (Minolta) ou Hydro-N-Tester (Hydro Agri), basées sur des mesures de transmittance. Ces mesures étant indirectes, il faut percevoir que la relation entre ces mesures et les teneurs en azote contient les deux sous-relations ayant comme intermédiaire la teneur en chlorophylle. À l'origine, les mesures de type chlorophylle-mètre ont été conçues comme un moyen rapide et efficace pour raisonner la fertilisation azotée. Un grand nombre d'auteurs trouvent effectivement une bonne corrélation entre les mesures de chlorophylle-mètre et les teneurs en azote de la plante (Piekelek & Fox, 1992 ; Feibo *et al.*, 1998 ; Vidal *et al.*, 1999 ; Reeves *et al.*, 1993 ; Matsunaka *et al.*, 1997), montrant ainsi la relation à l'échelle du couvert entre la teneur en chlorophylle et en azote. Mais, d'une étude à l'autre, ces relations sont hautement variables. Dumont *et al.* (2001) suggèrent ainsi de travailler à l'échelle intégrée, c'est-à-dire de raisonner non pas en terme de concentration, mais en terme de quantité de chlorophylle et d'azote présente dans le couvert, ce qui permet de lever la difficulté soulevée par plusieurs auteurs qui ont montré (i) une meilleure corrélation entre les mesures SPAD et les teneurs surfaciques et non massiques (Peng *et al.*, 1993 ; Chapman & Barreto, 1997) et (ii) la difficulté d'estimer le terme de passage entre teneurs surfacique et massique (Roderick *et al.*, 1999) : la surface foliaire spécifique (*Specific Leaf Area*, SLA).

De l'analyse bibliographique exposée ci-dessus, il ressort qu'il est préférable de travailler sur la relation entre chlorophylle et azote (i) en mesurant réellement la teneur en chlorophylle et sans passer par les mesures de chlorophylle-mètre qui constituent un intermédiaire introduisant des erreurs supplémentaires ; (ii) en prenant en compte l'effet du stade. Le fait de travailler à l'échelle du couvert, c'est-à-dire en déterminant des relations entre $QCab$ et QN_R , contenus en chlorophylle et en azote du couvert, plutôt qu'entre teneurs, peut aussi être préférable : c'est le rôle de la méthode 3. Ce dernier point est particulièrement important, étant donné que $QCab$ est mieux estimée que Cab par inversion de mesures de télédétection.

Évaluation expérimentale des trois voies de détermination de ΔQN à partir de Cab et de LAI

Cette partie décrit la façon dont les différentes relations nécessaires au calcul de ΔQN à partir de LAI , Cab et $QCab$ ont été établies expérimentalement, la façon dont l'influence du temps a été prise en compte et les résultats des trois méthodes de calcul.

Matériel et méthodes

Expérimentations réalisées

Deux essais de doses d'azote ont été réalisés en 2000 et 2001 à Chambry, près de Laon (Aisne) dans le cadre de l'expérimentation agriculture de précision de l'Inra de Laon (Guérif *et al.*, 2001 ; Guérif *et al.*, cet ouvrage). Cinq ou six placettes par essai ont reçu des doses différentes selon le fractionnement décrit par le tableau 1. Les dates de prélèvement sont données dans le tableau 2. Si à une date de prélèvement donnée, plusieurs placettes avaient reçu le même niveau de fertilisation azotée, une seule d'entre elles était prélevée. Pour ces différentes dates de mesure, des prélèvements de deux (en 2000) ou trois (en 2001) échantillons ont été effectués et ont permis de mesurer les variables *LAI*, *Cab*, *N_R*, *W_R*. Le *LAI* a été mesuré sur des sous-échantillons grâce à un *LAI*-mètre LICOR LI-3000A : cet appareil mesure la largeur des feuilles qui sont convoyées sur une bande plastique et par intégration, retrouve la surface des feuilles entières. La biomasse sèche a été mesurée classiquement après séchage à 80°C pendant 48 heures en étuve. L'azote total a été mesuré grâce à un analyseur élémentaire (NA 1500, Fisons). La chlorophylle a et b a été mesurée sur des sous-échantillons selon la méthode de Moran (1982). Soixante-dix disques ponctionnés sur des feuilles, pour une surface totale d'environ 20 cm² par sous-échantillon, ont été plongés dans 50 mL d'un solvant organique, le N,N-Diméthylformamide. La chlorophylle a ainsi été extraite pendant 16 heures à 4°C. La concentration du solvant a été calculée à partir de la mesure de l'absorbance de la solution à 664 et 647 nm effectuée grâce à un spectrophotomètre Beckman DU-64. De la concentration de la solution, la teneur surfacique des feuilles a été déduite.

Tableau 1. Dates de fertilisation des essais de 2000 et 2001, stades de développement du blé correspondants (entre parenthèse, stade Zadocks) et doses d'azote apportées (kg.ha⁻¹).

Date	Stade de développement		Traitement					
			P1	P2	P3	P4	P5	P6
Essai 2000								
6 mars	plein tallage	(Z 23)	0	60	60	60		60
20 mars	épi à 1 cm	(Z 30)	0	0	60	60		60
11 avril	premier nœud	(Z 31)	0	0	0	60		60
4 mai	après 2 nœuds	(Z 35)	0	0	0	0		60
24 mai	épiaison	(Z 50)	0	0	0	0		60
	total		0	60	120	180		300
Essai 2001								
20 février	tallage	(Z 22)	0	0	40	40	80	80
2 avril	épi à 1 cm	(Z 30)	0	40	40	100	100	80
2 mai	après 2 nœuds	(Z 35)	0	80	40	80	40	80
1 ^{er} juin	épiaison	(Z 55)	0	0	40	0	20	40
	total		0	120	160	220	240	280

Tableau 2. Dates de prélèvement des essais de 2000 et 2001 et stades de développement du blé correspondants (entre parenthèses, stade Zadocks).
Les croix indiquent les traitements prélevés à la date considérée.

Date	Stade de développement		Traitement					
			P1	P2	P3	P4	P5	P6
Essai 2000								
6 avril	premier nœud	(Z 31)	×	×				×
25 avril	2 nœuds	(Z 32)	×	×	×			×
6 mai	plusieurs nœuds	(Z 35)	×	×	×			×
24 mai	début épiaison	(Z 50)	×	×	×	×		×
Essai 2001								
6 mars	plein tallage	(Z 22-23)	×		×		×	
28 mars	épi à 0,8 cm	(Z 28)	×		×		×	
11 avril	début 1 ^{er} nœud	(Z 31)	×	×	×	×	×	×
25 avril	début 2 nœuds	(Z 31-32)	×	×	×	×	×	×
2 mai	plusieurs nœuds	Z 35	×	×	×	×	×	×
17 mai	sortie dern. f.	Z 37	×	×	×	×	×	×
31 mai	épiaison	Z 55	×	×	×	×	×	×
13 juin	floraison	Z 65	×	×	×	×	×	×

Les étapes de calcul

On cherchera à déterminer les relations définies dans la figure 2. Elles seront tout d'abord établies pour chaque date de mesure. Pour prendre en compte l'effet du temps et de façon à pouvoir extrapoler les mesures à diverses dates de préconisation de la fertilisation azotée, les coefficients de ces relations seront à leur tour représentés en fonction du temps. Le temps sera mesuré de plusieurs façons :

- par la somme de températures depuis le semis ;
- par la somme de températures depuis le stade plein tallage ;
- par la somme de PAR (*Photosynthetically active radiation*) depuis le semis ;
- par la somme de PAR depuis le stade plein tallage.

Bien que les sommes de température et de PAR soient très corrélées pour une année donnée, l'utilisation de cette dernière est susceptible d'améliorer la prise en compte du temps car les processus impliqués sont influencés par le rayonnement plus que par la température. L'utilisation du stade plein tallage comme point de départ permet de gommer les écarts entre années dus aux cumuls de températures ou de PAR éventuels au cours de l'hiver. Ces cumuls ont en effet moins d'influence que ceux qui surviennent au moment du développement du blé.

Chaque relation à déterminer sera donc également une fonction du temps mesuré en terme de sommes de températures (ΣT) ou de PAR (ΣP) :

- $W = f_T(LAI, \Sigma T)$ ou $W = f_P(LAI, \Sigma P)$
- $INN = g_T(Cab, \Sigma T)$ ou $INN = g_P(Cab, \Sigma P)$

- $N_R = h_T(Cab, \Sigma T)$ ou $N_R = h_P(Cab, \Sigma P)$
- $QN_R = i_T(QCab, \Sigma T)$ ou $QN_R = i_P(QCab, \Sigma P)$

Les différents paramètres de ces fonctions seront évalués par ajustement par la méthode des moindres carrés (fonction *lsqcurvefit* de Matlab), ce qui permettra de calculer les déficits d'absorption donnés par chacune des trois méthodes.

La qualité des résultats sera évaluée par la mesure de l'erreur quadratique moyenne (RMSE, *Root Mean Square Error*) définie comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (Y_i - \hat{Y}_i)^2} \quad [6]$$

où I représente le nombre d'observations, Y_i la valeur mesurée de la i^e observation de la variable considérée et \hat{Y}_i sa valeur estimée. Comme proposé par Wilmott (1981), nous décomposerons la RMSE en deux termes, un qui mesure l'erreur systématique (RMSEs) et l'autre qui mesure l'erreur non-systématique (RMSEu), ainsi définies :

$$RMSE_s = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (Y_i - \hat{Y}_i^*)^2} \quad [7]$$

$$RMSE_u = \sqrt{\frac{1}{I} \sum_{i=1}^I (\hat{Y}_i - \hat{Y}_i^*)^2} \quad [8]$$

où \hat{Y}_i^* est le résultat de la régression linéaire de \hat{Y}_i sur Y_i . La RMSEs mesure donc l'écart entre cette droite de régression et la première bissectrice alors que la RMSEu mesure la dispersion autour de cette droite de régression des valeurs simulées par le modèle, \hat{Y}_i .

Afin d'évaluer les capacités des trois méthodes à prédire correctement les déficits d'absorption dans une situation qui n'a pas servi à estimer les paramètres, nous évaluerons par validation croisée la valeur de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne de prédiction (RMSEP, *Root Mean Square Error of Prediction*) définie d'après Wallach & Goffinet (1987). La validation croisée consiste ici à supprimer une placette du jeu de données, à ajuster les coefficients sur les autres placettes, et à calculer l'erreur commise sur la placette isolée avec ces valeurs des coefficients. Ces opérations sont effectuées pour chaque placette et l'estimation de la RMSEP est la racine carrée de la moyenne des erreurs quadratiques.

Résultats et discussion

Les résultats sont organisés en deux ensembles : le premier montre les relations expérimentales obtenues à chaque date de mesures ; le second expose les résultats des calculs visant à prédire les déficits d'absorption à partir de LAI , Cab ou $QCab$ selon les trois méthodes proposées.

Relations expérimentales obtenues

La relation entre LAI et W est assez bien décrite par une fonction logarithmique (fig. 3 a et b). Les coefficients de corrélation entre $\ln(LAI)$ et W (tabl. 3) sont en grande majorité

supérieurs à 0,9. Dans cette étude, nous utiliserons donc un ajustement de ce type pour estimer W à partir de LAI :

$$W = a_1 \cdot \ln(LAI) + b_1 \quad [9]$$

Les paramètres a_1 et b_1 seront eux mêmes une fonction du temps, représenté soit par la somme des températures (ΣT), soit par la somme des PAR (ΣP).

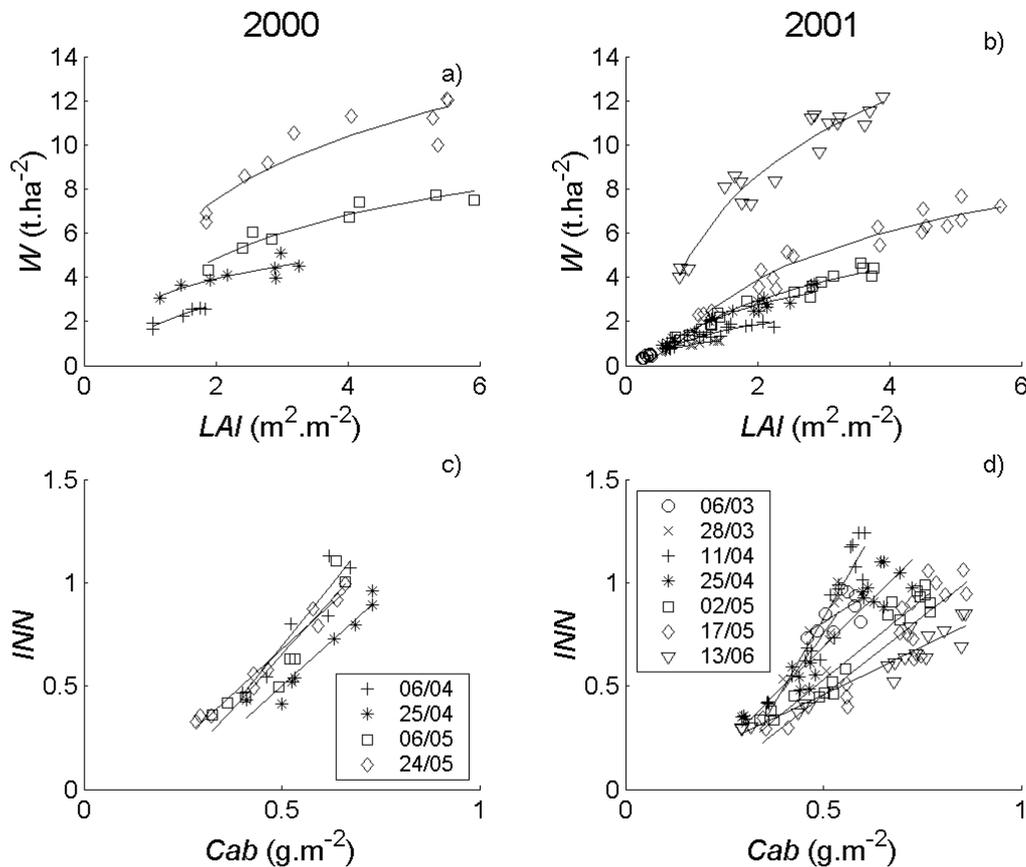


Figure 3. Relations expérimentales entre LAI et W (a et b) et Cab et INN (c et d) pour les années 2000 (a et c) et 2001 (b et d).

La relation entre Cab et INN est bien décrite par date par une simple relation linéaire (fig. 3 c et d). Le fait que cette relation soit linéaire et ne présente pas de phénomène de saturation peut indiquer que les traitements sont généralement en état de carence. La valeur maximale des INN est du reste de 1,2 et 89 % des valeurs d' INN sont inférieures à 1. Les coefficients de corrélation (tabl. 3) sont corrects sauf pour les prélèvements effectués en mars : il semble qu'aux stades relativement précoces, c'est-à-dire avant l'élongation des tiges, la teneur en chlorophylle des feuilles ne représente pas fidèlement la teneur en azote de la plante (R^2 de 0,63 et 0,71 respectivement pour le 6 et le 28 mars). Mais il est vrai que ces dates ont fait l'objet de moins de prélèvements que les autres de 2001 (tabl. 2). Nous utiliserons donc comme ajustement entre Cab et INN :

$$INN = a_2 \cdot Cab + b_2 \quad [10]$$

À l'instar de la précédente, la relation entre Cab et N_R est bien décrite par un ajustement linéaire (fig. 4 a et b). Les dates précoces de prélèvement présentent également un

plus mauvais ajustement (tabl. 3) que les autres. Deux phases semblent s'esquisser : aux mois de mars et avril (soit jusqu'au stade premier nœud) les points restent relativement groupés, alors que par la suite la teneur en azote pour une même valeur de Cab diminue progressivement. Cela peut être relié au phénomène de dilution, la teneur en azote dans la plante diminuant plus rapidement que la teneur en chlorophylle dans les feuilles. Le comportement d'une année à l'autre n'est cependant pas identique : dans la deuxième période dégagée, en 2000, les points sont très regroupés d'une date à l'autre, alors qu'en 2001, ils se distinguent beaucoup plus par dates. Mais les mesures du mois d'avril 2000 se détache nettement des autres. Nous utiliserons ici aussi comme ajustement entre Cab et N_R des relations linéaires dont les paramètres devront être fonction du temps :

$$Nr = a_3 \cdot Cab + b_3 \quad [11]$$

Les relations entre les mesures de $QCab$ et de QN_R sont également linéaires (fig. 4 c et d) et sont caractérisées par des coefficients de corrélation très proches de 1 dans la plupart des cas. Les coefficients du mois de mars sont bien meilleurs que pour les autres relations. Ceci illustre que les relations sont meilleures à l'échelle du couvert (Dumont *et al.*, 2001), car on travaille sur des quantités et non plus sur des teneurs. D'ailleurs, si les données de télédétection donnent plus facilement accès à $QCab$ qu'à Cab et LAI , ce sont pour des raisons sommes toutes assez voisines. Quoiqu'il en soit, on a toujours deux groupes de points : avant le stade 2 nœuds et à partir de celui-ci, c'est-à-dire quand les tiges commencent à être de taille non négligeable par rapport à la surface foliaire, ce qui peut induire des modifications dans le métabolisme et le ratio chlorophylle sur azote. La dernière date de mesure néanmoins (13 juin 2001) a tendance à avoir un comportement plus proche des premières dates. Pour représenter la liaison entre $QCab$ et QN_R , nous utiliserons encore une fois des relations linéaires :

$$QN_R = a_4 \cdot QCab + b_4 \quad [12]$$

Évaluation des trois méthodes de calcul des déficits d'absorption

La première étape consiste à calculer les coefficients a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 , a_4 et b_4 en fonction de la somme de température (ΣT) ou de PAR (ΣP). Comme nous l'avons dit, le début du calcul de ces sommes pourra se faire à partir du semis ou du stade plein tallage. La figure 5 présente l'évolution des valeurs de ces coefficients avec le temps exprimé, pour cette illustration, en somme de température depuis le semis. Les valeurs du coefficients a_1 par exemple forment une courbe régulière de type puissance, les points des deux années se confondant assez bien. L'évolution du coefficient b_1 peut être représentée par le même type de fonction, même si les points des deux années sont dans ce cas plus distants. Il n'en va pas de même de tous les autres coefficients, même si l'interpénétration des points des deux années peut être améliorée en jouant de façon relative sur l'axe des abscisses : c'est pour cette raison que la somme de PAR a été utilisée, et que deux dates de départ de calcul des sommes ont été comparées. L'évolution des coefficients a_2 , b_2 et a_3 peut assez bien être représentée par une simple droite, mis à part le point correspondant au 6 mars 2001 qui sort largement de la tendance générale (les R^2 sont respectivement de $-0,84$; $0,85$ et $-0,72$ pour a_2 , b_2 et a_3 sans cette date). Le coefficient b_3 présente une évolution très irrégulière, bien que ces valeurs de pentes de la relation [11] soient loin d'être négligeables par rapport aux valeurs de N_R . Malgré tout, le coefficient de corrélation entre b_3 et ΣT est de $0,75$ toujours à la condition de

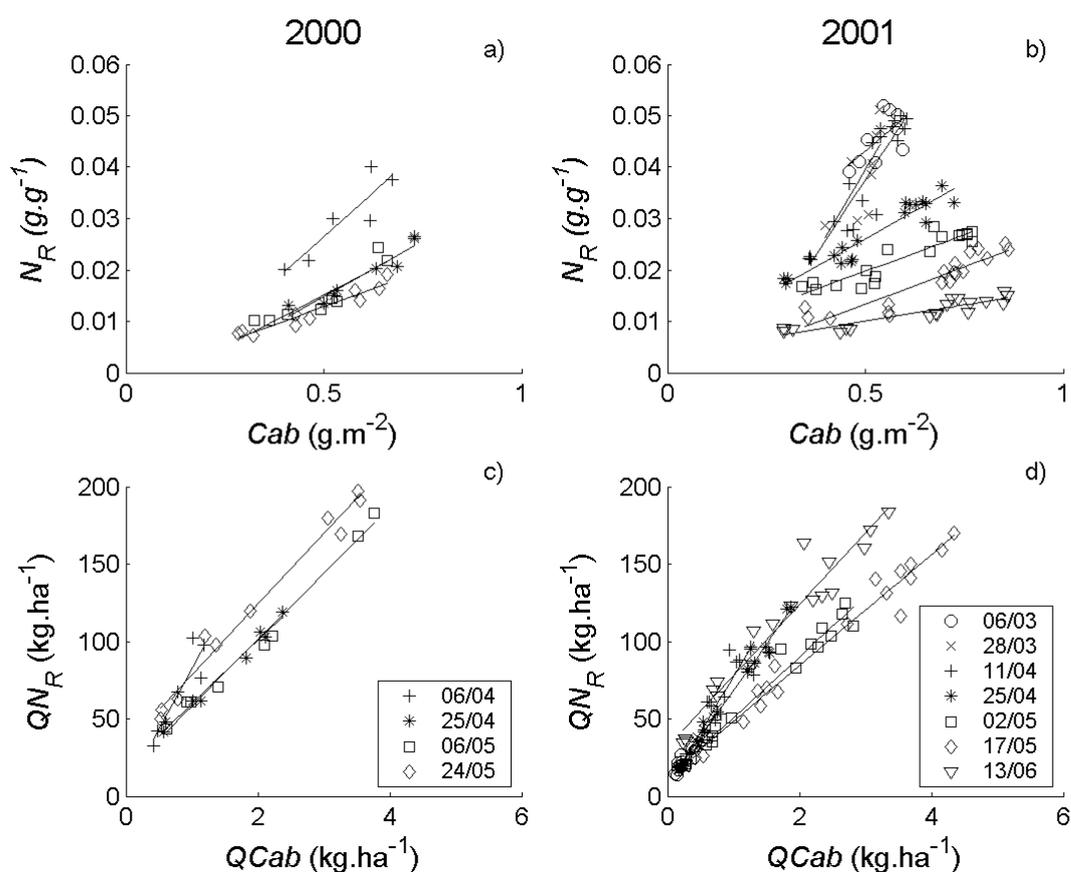


Figure 4. Relations expérimentales entre Cab et N_R (a et b) et $QCab$ et QN_R (c et d) pour les années 2000 (a et c) et 2001 (b et d).

Tableau 3. Coefficients de corrélation des différentes relations expérimentales.

Date	Coefficients de corrélation			
	$\ln(LAI)-W$	$Cab-INN$	$Cab-N_R$	$QCab-QN_R$
Essai 2000				
6 avril	0,97	0,93	0,9	0,92
25 avril	0,86	0,97	0,96	0,99
6 mai	0,96	0,93	0,92	0,99
24 mai	0,92	0,99	0,96	0,99
Essai 2001				
6 mars	0,85	0,63	0,63	0,77
28 mars	0,99	0,71	0,71	0,99
11 avril	0,96	0,95	0,92	0,94
25 avril	0,97	0,95	0,96	0,99
2 mai	0,98	0,97	0,93	0,99
17 mai	0,97	0,91	0,92	0,99
31 mai	0,97	0,96	0,92	0,97
13 juin	0,97	0,96	0,95	0,99

supprimer le point correspondant au 6 mars 2001. L'évolution du coefficient b_4 quant à elle peut tout aussi avantageusement être représentée par une relation linéaire ($R^2 = 0,87$ avec le 6 mars 2001 et $R^2 = 0,91$ sans cette date). La représentation de a_4 est quelque peu plus problématique, car son évolution présente trois phases, une descendante jusqu'au stade 2 nœuds, une qui est plus constante et une nouvelle augmentation pour les stades les plus tardifs (floraison). Pour représenter cette évolution, un polynôme de degré 2 a été choisi.

Les graphiques de la figure 5 nous ont donc conduit à exprimer l'évolution de ces coefficients selon le formalisme suivant :

$$a_1 = a_{11} \cdot \Sigma T^{a_{12}} \quad \text{et} \quad b_1 = b_{11} \cdot \Sigma T^{b_{12}} \quad [13]$$

$$a_2 = a_{21} \cdot \exp(a_{22} \cdot \Sigma T) \quad \text{et} \quad b_2 = b_{21} \cdot \Sigma T + b_{22} \quad [14]$$

$$a_3 = a_{31} \cdot \exp(a_{32} \cdot \Sigma T) \quad \text{et} \quad b_3 = b_{31} \cdot \Sigma T + b_{32} \quad [15]$$

$$a_4 = a_{41} \cdot \Sigma T^2 + a_{42} \cdot \Sigma T + a_{43} \quad \text{et} \quad b_4 = b_{41} \cdot \Sigma T + b_{42} \quad [16]$$

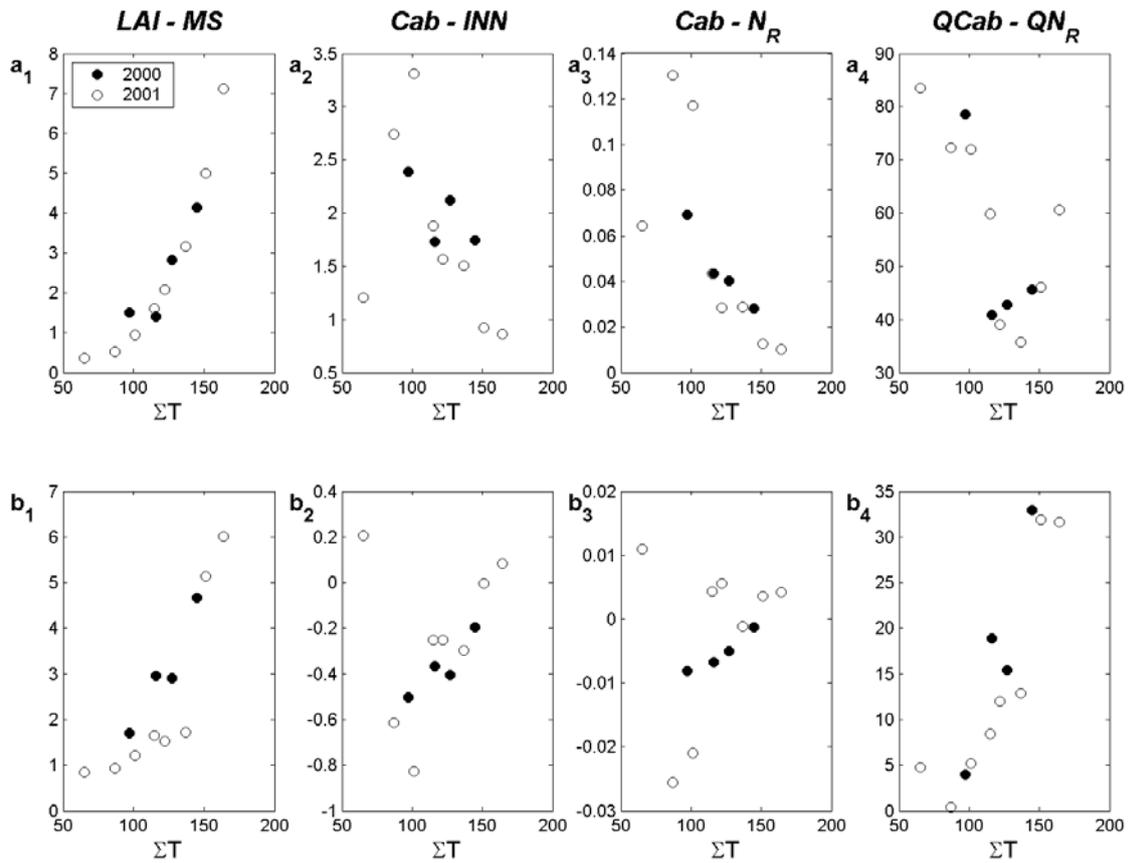


Figure 5. Évolution des coefficients a_1 , b_1 , a_2 , b_2 , a_3 , b_3 , a_4 et b_4 en fonction du temps exprimé en somme de température depuis le semis.

Dans toutes ces relations, ΣT peut être remplacée par ΣP , tous deux pouvant être mesurés depuis le semis ou depuis le stade plein tallage. Les coefficients déterminés par ajustement des courbes de la figure 5 ont servi de points de départ pour l'optimisation basée sur les moindres carrés entre les déficits d'absorption observés et calculés par chacune des trois méthodes.

Le résultat sur l'ensemble du jeu de données des ajustements pour le calcul des déficits d'absorption, ΔQN , est présenté sur la figure 6 dans le cas où l'on calcule ΣT ou ΣP à partir du semis et la figure 7 lorsqu'on calcule ΣT ou ΣP à partir du stade plein tallage. La façon de calculer ΔQN qui donne la meilleure RMSE (13,4 kg.ha⁻¹) est la méthode 3 en représentant les effets du temps par la somme de PAR depuis le semis (fig. 6 f). Les résultats obtenus avec les méthodes 2 et 3 sont cependant assez proches. Selon les cas de figures, la méthode 1 est plus ou moins proche de la 2, mais n'est jamais la meilleure. L'utilisation de sommes de température ou de PAR calculées depuis le stade plein tallage (fig. 7) décrit en revanche ΔQN de façon très peu biaisée d'après les valeurs de RMSEs : cette métrique vaut en effet par exemple 0,9 kg.ha⁻¹ seulement avec la somme des températures (fig. 7 c et d), mais la dispersion est beaucoup plus forte.

Il ressort donc que la méthode 3 est la plus efficace pour décrire ΔQN en connaissant Cab , LAI et les sommes de température ou de PAR. Une façon d'évaluer la capacité de prédiction de ces relations est d'estimer la valeur de la RMSEP par validation croisée. Le tableau 4 indique les valeurs de RMSE déjà données dans les figures 6 et 7 comparées aux valeurs de RMSEP, ainsi que le différentiel entre les deux. Ces résultats indiquent que la tendance esquissée sur les RMSE concernant la robustesse des relations s'amplifie quand on considère leur pouvoir de prédiction : la méthode 3 donne les meilleures prévisions et c'est de façon générale celle pour laquelle la différence entre RMSE et RMSEP est la plus faible. Il semble donc préférable de calculer ΔQN à partir de $QCab$ et de LAI . La distinction entre ΣT et ΣP a quant à elle moins d'importance, tout comme le fait de commencer à partir du semis ou du stade plein tallage.

Tableau 4. Valeurs de RMSEP estimées par validation croisée pour la prédiction de ΔQN comparées à celle de la RMSE, pour les méthodes de calcul de ΔQN 1 à 3 et en utilisant pour représenter le temps la somme de température ou de PAR à partir du semis ou du stade plein tallage.

	Méthode 1		Méthode 2		Méthode 3	
	ΣT	ΣP	ΣT	ΣP	ΣT	ΣP
Calcul de ΣT et de ΣP depuis le semis						
RMSE	19,4	18,4	15,0	15,1	15,2	13,4
RMSEP	30,2	27,7	23,0	22,3	18,0	17,6
Différence	10,8	9,3	8,0	7,2	2,8	4,2
Calcul de ΣT et de ΣP depuis le stade plein tallage						
RMSE	18,0	16,7	18,3	16,1	14,7	16,1
RMSEP	27,1	25,1	21,9	25,4	18,0	20,3
Différence	9,2	8,4	3,5	9,3	3,3	4,2

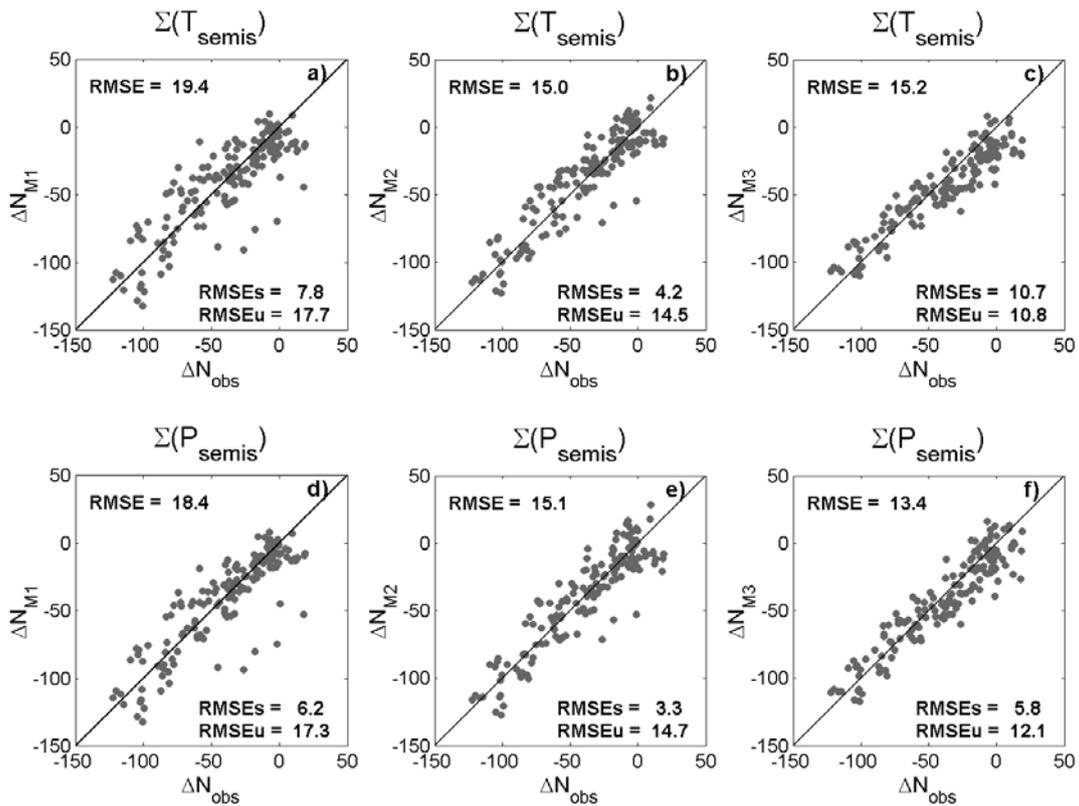


Figure 6. Comparaison des déficits d'absorption (ΔN) mesurés et calculés à partir de *Cab* et *LAI* suivant les méthodes 1 (a et d), 2 (b et e) et 3 (c et f). Le temps est représenté dans les relations par la somme de température (a à c) ou de PAR (d à f) depuis le semis.

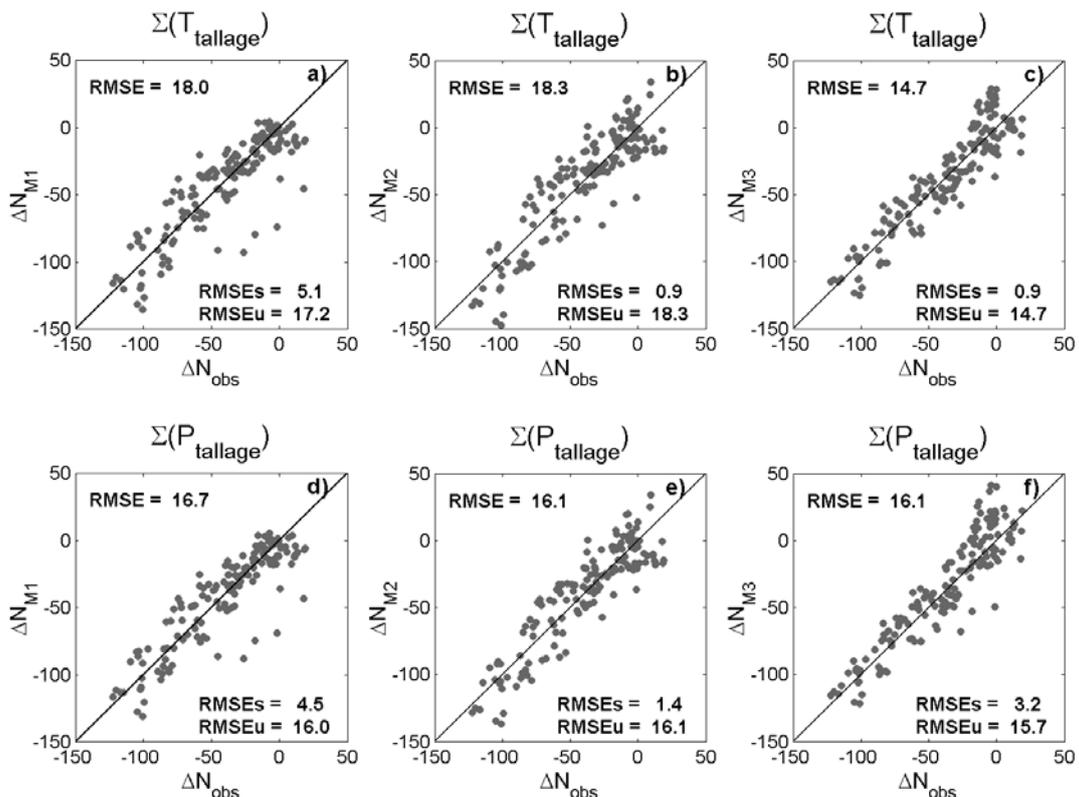


Figure 7. Comparaison des déficits d'absorption (ΔN) mesurés et calculés à partir de *Cab* et *LAI* suivant les méthodes 1 (a et d), 2 (b et e) et 3 (c et f). Le temps est représenté dans les relations par la somme de température (a à c) ou de PAR (d à f) depuis le stade plein tallage.

Discussion et conclusion

Une erreur de prévision d'une vingtaine de kilogramme d'azote à l'hectare pour une gamme de variation de -120 à $20 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ de ΔQN est relativement acceptable. Mais cette gamme de variation ne reflète pas les conditions réelles d'utilisation : pour une date donnée – correspondant par exemple à la date de décision – et surtout en considérant des parcelles fertilisées normalement, elle sera moindre. À côté de ces considérations, il faut aussi rajouter les erreurs d'estimation de LAI et Cab à partir des données de télédétection, qui peuvent être assez conséquentes elles aussi (cf. Moulin *et al.*, cet ouvrage). C'est là que la dernière méthode testée, passant par le calcul de QN_R à partir de $Qcab$, prend tout son intérêt, puisque d'une part elle permet une meilleure estimation de ΔQN à partir des vraies valeurs de LAI et Cab et que d'autre part le produit de LAI et Cab , $QCab$, est mieux estimé que Cab seul.

Si l'on s'en tient à une stricte application des méthodes de type Jubil appliquées à l'échelle intra-parcellaire en remplaçant la mesure du statut azoté classique par l'estimation de ΔQN par télédétection, on raisonne en terme de seuil : au-dessus d'une certaine valeur de ΔQN , on n'applique pas la dose complémentaire, au-dessous, on l'applique. On aura donc, pour une date donnée, deux types de zones dans la parcelle seulement. Si on décide que la valeur de ΔQN est représentative du déficit d'absorption, on peut s'en servir pour calculer des doses à appliquer. Ceci implique de faire des hypothèses sur l'efficacité de l'engrais qui peut d'ailleurs être estimée à partir du déficit d'absorption et des doses apportées jusque-là. L'évaluation de la dose correctrice pourrait être précisée en mettant en œuvre des modèles capables de prédire la valeur la plus probable du LAI ou de la biomasse à la floraison, par pixel. En effet, la quantité d'azote absorbé au stade floraison doit correspondre à la production de matière sèche accessible. Cette approche aurait le mérite d'intégrer des éléments dont les enjeux peuvent être significatifs :

- Selon les variétés, les capacités à produire de la biomasse jusqu'à la floraison diffèrent, et ces distinctions sont à mettre en relation avec des besoins en azote ; la méthode permettrait donc de prendre en compte cet effet variétal.
- En parallèle, il faut prendre en compte l'action des principaux facteurs et conditions du milieu à l'origine des variations de production de biomasse entre la date du dernier diagnostic et la date de floraison. Ceci conduit à la mise en œuvre de modèles de prédiction des stades et de production de biomasse, ces derniers devant impérativement prendre en compte les conditions liées au contexte pédoclimatique (en particulier, le régime de température, le rayonnement intercepté et l'alimentation hydrique).
- Une telle approche donne également des possibilités d'intégrer par la suite, des critères de qualité, comme la teneur en protéine, dans le conseil. En effet, des références existent quant à la valeur la plus probable de teneur en protéine de différentes variétés à l'optimum de fertilisation azotée, pour le rendement. Pour parvenir à des objectifs requis et particuliers (par exemple, une teneur en protéine pour être mieux valorisé en panification), il peut être nécessaire pour certaines variétés, d'obtenir à la floraison des statuts azotés différents de celui qui correspond à l'optimum pour la croissance ($INN = 1$). Ces aspects pourraient être intégrés dans le futur, ce qui conduirait à préconiser des doses correctrices toujours basées sur la variable ΔQN , mais conduisant à des quantités d'azote absorbé à la floraison différente. Les caractéristiques variétales ainsi que les objectifs de teneur en protéines pourraient tous être inclus sous forme de ΔQN à ajouter ou à soustraire, relativement à la quantité à absorber à la floraison à l'optimum vis-à-vis de la croissance.

La carte de préconisation sera dès lors constituée de nombreuses zones qui seront le reflet des cartes issues de la télédétection. Ceci constitue – normalement – un progrès par rapport à la situation à deux zones mais implique de simplifier la carte de façon à ce que ses consignes puissent être appliquées par l'épandeur d'engrais modulable. Cela pose donc la question de savoir comment opérer cette simplification.

Les règles de décision qui servent ici de modèle ont été développées avant tout pour optimiser le rendement. Les problématiques concernant la durabilité de l'agriculture tant du point de vue environnemental qu'économique imposent de prendre en compte ces facteurs dans le raisonnement de la fertilisation azotée. Ceci implique donc de modifier ces règles de décision dont le déterminisme est basé sur des bases de données empiriques. Une première approche, pour limiter les impacts d'une surfertilisation azotée par exemple, serait de rendre les seuils plus sévères : dans la méthode Jubil par exemple, on n'appliquerait la dose complémentaire que pour une carence plus forte. Mais ceci ne permet pas de prendre en compte le fait que des carences en azote peuvent être liées à d'autres facteurs trophiques, comme un stress hydrique. Pour prendre en compte l'effet du sol, on pourrait, dans la méthode Azobil, viser un reliquat à la récolte plus faible, en fonction du type de sol, mais encore faut-il le connaître à l'échelle intra-parcellaire. Par ailleurs, l'impact de toutes ces adaptations sur les conséquences sur la marge de l'agriculteur sont difficiles à prévoir avec ces méthodes. En effet, les impératifs environnementaux et économiques, dans le contexte de prix des engrais actuels, sont souvent antithétiques, l'aspect environnemental tirant vers des doses plus faibles, alors que l'aspect économique a tendance à réclamer des doses plus fortes. Une façon de tenter de résoudre ces problèmes consiste à chercher à prédire le rendement, l'impact sur l'environnement et la marge de l'agriculteur au moment de la date de décision pour plusieurs hypothèses de scénarios de fertilisation. On peut alors, grâce à un critère qui combine harmonieusement ces objectifs opposés, déterminer quelle dose appliquée. Les chapitres jumelés de cet ouvrage, Houlès *et al.* et Guérif *et al.*, montrent une première approche de ce problème qui utilise un modèle de développement des cultures ainsi que des données issues de la télédétection.

Références bibliographiques

- BINDRABAN P.S., 1999. Impact of canopy nitrogen profile in wheat on growth. *Field Crop Research*, 63, 63-77.
- CHAPMAN S.C., BARRETO H.J., 1997. Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. *Agronomy Journal*, 89, 557-562.
- DUMONT K., DE BAERDEMAEKER J., 2001. In field wheat nitrogen assessment using hyperspectral imaging techniques. In: *Third European Conference on Precision Agriculture*, 18-20/06/2001, Montpellier, Grenier & Blackmore eds, 905-910.
- ESQUIVEL M.G., FERREIRA R.B., TEIXEIRA A.R., 2000. Protein degradation in C3 and C4 plants subjected to nutrient starvation. Particular reference to ribulose biphosphate carboxylase/oxygenase and glycolate oxidase. *Plant Science*, 153, 15-23.
- FEIBO W., LIANGHUAN W., FUHUA X., 1998. Chlorophyll meter to predict nitrogen sidedress requirements for short-season cotton (*Gossypium hirsutum* L.). *Field Crops Research*, 56, 309-314.
- GATE P., 2000. La prise de décision face à la variabilité – exemples d'applications sur les céréales à partir de la télédétection. In *Actes du colloque UMR Cemagref-ENESAD*, Dijon (France), 29-30 mai 2000, Zwaenepoel P. (éd.), Educagri éditions, p. 383-393.
- GUÉRIF M., BEAUDOIN N., DURR C., MACHET J.-M., MARY B., MICHOT D., MOULIN S., NICOUILLAUD B., RICHARD G., 2001. Designing a field experiment for assessing soil and crop spatial variability and defining site specific management strategies. *Proceedings 3rd European Conference on Precision Agriculture*, Montpellier, June 2001, p. 677-682.

- HIKOSAKA K., TERASHIMA I., 1995. A model of the acclimation of photosynthesis in the leaves of C3 plants to sun and shade with respect to nitrogen use. *Plant, Cell and Environment*, 18, 605-618.
- HIKOSAKA K., TERASHIMA I., 1996. Nitrogen partitioning among photosynthetic components and its consequence in sun and shade plants. *Functional Ecology*, 10, 335-343.
- JUSTES E., MARY B., MEYNARD J.-M., THELIER-HUCHÉ L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74, 397-407.
- JUSTES E., MEYNARD J.-M., MARY B., PLÉNET D., 1997. Diagnosis using the stem base extract: Jubil method. In *Diagnosis of the nitrogen status in crop*. Lemaire G. (ed.), Berlin Heidelberg, Springer-Verlag, p. 163-187.
- KARROU M., MARANVILLE J.W., 1995. Response of wheat cultivars to different soil nitrogen and moisture regimes: III. Leaf water content, conductance, and photosynthesis. *Journal of Plant Nutrition*, 18, 777-791.
- LAWLOR D.W., LEMAIRE G., GASTAL F., 1997. Nitrogen, plant growth and crop yield. In *Plant Nitrogen*, Lea P.J., Morot-Gaudry J.-F. (eds.), Berlin Heidelberg, Springer-Verlag.
- LEMAIRE G., GASTAL F., 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Lemaire G. (éd.), Chapter 1. Berlin Heidelberg, Springer-Verlag
- LE ROUX X., WALCROFT A.S., DAUDET F.A., SINOQUET H., CHAVES M.M., RODRIGUES A., OSORIO L., 2001. Photosynthetic light acclimation in peach leaves: importance of changes in mass:area ratio, nitrogen concentration, and leaf nitrogen partitioning. *Tree Physiology*, 21, 377-386.
- LU C., ZHANG J., 2000. Photosynthetic CO₂ assimilation, chlorophyll fluorescence and photoinhibition as affected by nitrogen deficiency in maize plants. *Plant Science*, 151, 135-143.
- MACHET J.M., DUBRULLE P., LOUIS P., 1990. Azobil: a computer program for fertilizer N recommendations based on a predictive balance sheet method. In *Proceedings of the 1st ESA Congress*, Paris, p. 21-22.
- MACNAB F., LAWLOR D.W., BAKER N.R., YOUNG A.T., 1987. Effects of nitrate on chloroplast composition and photosynthetic activities in wheat. In *Progress in photosynthesis research*, Volume 2. NIJHOFF M. (éd.), Dordrecht, Netherlands.
- MATSUNAKA T., WATANABE Y., MIYAWAKI T., ICHIKAWA N., 1997. Prediction of grain protein content in winter wheat through leaf color measurements using a chlorophyll meter. *Soil Science and Plant Nutrition*, 43, 127-134.
- MONTEITH J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical systems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766.
- MORAN R., 1982. Formulae for determination of chlorophyllous pigments extracted with N, N-Dimethylformamide. *Plant Physiology*, 69, 1376-1381.
- OSAKI M., MORIKAWA K., MATSUMOTO M., SHINANO T., IYODA M., TADANO T., 1993. Productivity of high-yielding crops. III. Accumulation of Ribulose-1,5-Bisphosphate Carboxylase/Oxygenase and chlorophyll in relation to productivity of high-yielding crops. *Soil Science and Plant Nutrition*, 39, 399-408.
- PENG S., GARCIA F.V., LAZA R.C., CASSMAN K.G., 1993. Adjustment for specific leaf weight improves chlorophyll meter's estimate of rice leaf nitrogen concentration. *Agronomy Journal*, 85, 987-990.
- PIEKELEK W.P., FOX R.H., 1992. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirements for maize. *Agronomy Journal*, 84, 59-65.
- REEVES D.W., 1993. Determination of wheat nitrogen status with a hand-held chlorophyll meter: influence of management practices. *Journal of Plant Nutrition*, 16, 781-796.
- RODERICK M.L., BERRY S.L., NOBLE I.R., FARQUHAR G.D., 1999. A theoretical approach to linking the composition and morphology with the function of leaves. *Functional Ecology*, 13, 683-695.
- SHANGGUAN Z., SHAO M., DYCKMANS J., 2000. Effects of nitrogen nutrition and water deficit on net photosynthetic rate and chlorophyll fluorescence in winter wheat. *Journal of Plant Physiology*, 156, 46-51.
- SHIRAWAI T., SINCLAIR T.R., 1993. Distribution of nitrogen among leaves in soybean canopies. *Crop Science*, 33, 804-808.
- SIVANSKAR A., LAKKINENI K.C., VANITA JAIN, KUMAR P.A., ABROL Y.P., 1998. Differential response of two wheat genotypes to nitrogen supply. I. Ontogenic changes in laminae growth and photosynthesis. *Journal of Agronomy & Crop Sciences*, 181, 21-27.
- STANFORD G., 1973. Rationale for optimum nitrogen fertilization in corn production. *Journal of Environmental Quality*, 2, 159-166.

- VAN ANDEL J., 1987. Disturbance of grassland. Outline of the theme. *In Disturbance in grasslands*. Van Andel J. (ed.), Dordrecht, Dr. W. Junk Publishers, p. 1-13.
- VIDAL I., LONGERI L., HETIER J.M., 1999. Nitrogen uptake and chlorophyll measurements in Spring Wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 55, 1-6.
- WALLACH D., GOFFINET B., BERGEZ J.E., DEBAEKE P., LEENHARDT D., AUBERTOT J.-N., 2001. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal*, 93, 757-766.
- WILMOTT C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography*, 2, 184-194.

