



Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation

Clémence Ravier

► To cite this version:

Clémence Ravier. Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation. Sciences agricoles. Université Paris Saclay (COmUE), 2017. Français. NNT : 2017SACLA005 . tel-02059334

HAL Id: tel-02059334

<https://theses.hal.science/tel-02059334>

Submitted on 6 Mar 2019

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.

NNT : 2017SACLA005

THESE DE DOCTORAT
DE
L'UNIVERSITE PARIS-SACLAY
PREPAREE A
AGROPARISTECH

ECOLE DOCTORALE N° 581
ABIES (Agriculture, alimentation, biologie, environnement et santé)

Spécialité de doctorat : Sciences Agronomiques

Par

Clémence Ravier

Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée :
Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation

Thèse présentée et soutenue à Paris, le 10 février 2017:

Composition du Jury :

Mireille NAVARRETE	Directeur de Recherche, INRA, Avignon	Rapporteur
Walter ROSSING	Professeur, Wageningen University & Research, Pays-bas	Rapporteur
Thierry DORE	Professeur, AgroParisTech, Paris	Président
Christophe DAVID	Directeur Scientifique, ISARA Lyon	Examineur
Flore BARCELLINI	Professeur, CNAM, Paris	Examinatrice
Philippe GATE	Directeur Scientifique, Arvalis-Institut-du-végétal	Examineur
Guy RICHARD	Directeur de Recherche, INRA, Orléans	Examineur
Jean-Marc MEYNARD	Directeur de Recherche, INRA, Grignon	Directeur de thèse

Remerciements

Nous tenons à remercier les partenaires et financeurs qui ont permis la réalisation de cette thèse :

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une convention CIFRE (Conventions Industrielles de Formation par la Recherche) entre Arvalis-Institut du végétal et l'INRA.

Les travaux de recherche ont également obtenu un financement de l'ADEME dans le cadre du projet REACCTIF (REcherche sur l'Atténuation du Changement ClimaTique par l'agrIculture et la Forêt).



Avant propos

Ceci est un manuscrit de thèse, attestant d'un travail scientifique de longue haleine qui m'a aspirée et inspirée pendant un peu plus de trois années. C'est aussi le reflet d'apprentissages. Apprendre, voilà un mot bien adapté pour caractériser ce travail: apprendre à chercher, apprendre à écrire, apprendre à faire vite et bien, apprendre à rebondir, apprendre à gérer les contrariétés, apprendre à apprendre...

Pour apprendre, il faut un tuteur, j'ai eu une paire... Mes premiers remerciements vont, et ce n'est pas sans émotions, à Marie-Hélène Jeuffroy et Jean-Marc Meynard. Travailler avec vous aura été pour moi la découverte de beaucoup d'émotions. Je vous ai admirés (certaines fois plus que d'autres...) vous m'avez parfois rendue fière de moi, parfois fait pleurer, vous m'avez poussée dans mes retranchements, me forçant à aller plus loin, à trouver de nouvelles ressources. Vous avez mis ma persévérance à dure épreuve mais vous n'avez jamais abandonné. Vous vous êtes pris avec moi au jeu de la conception innovante¹. Pendant ces moments privilégiés nous avons partagé sans pudeur, idées, connaissances, concepts, convictions. Nous avons essuyé quelques échecs, nous nous sommes trouvés face à des petites difficultés, mais nous avons aussi eu des moments de grande satisfaction où enfin nous étions accordés. Vous m'avez permis de progresser, de ne pas me satisfaire de mes acquis pour aller jusqu'au bout des choses, vous m'avez fait comprendre et accepter qu'un travail se perfectionne en équipe et surtout vous m'avez démontré que la critique est constructive.

Comment remercier les membres de mon comité de pilotage, qui ont accepté au delà de l'exercice normalement demandé dans ces instances, de participer aux ateliers de conception : Marc Bardinal, Michel Bonnefoy, Phillipe Braun, Pierre Cellier, Marianne Cerf, Jean-Pierre Cohan, Oliver Deudon, Philippe Gate, Laurence Guichard, Eric Masson, Sylvie Recous. Je tiens à remercier ceux qui au -delà du copil m'ont accueillie chez eux et m'ont ouvert à leur contacts pour mes enquêtes. J'ai ainsi pu visiter la Bretagne avec Eric et la région PACA avec Philippe. Merci à Sylvie, qui m'a accordé sa confiance en me donnant l'opportunité de présenter mes travaux au RMT fertilisation et environnement. Merci aussi à Laurence qui m'a donné un créneau pour présenter mes travaux aux étudiants de l'Agro, j'ai beaucoup apprécié l'expérience ! Merci à Marianne pour les échanges sur le diagnostic des usages. J'ai du m'équiper d'un dictionnaire pour décoder certaines de tes remarques, mais aujourd'hui j'utilise ces termes avec aisance. Merci à Philippe Gate, Jean-Pierre Cohan et François Laurent, pour le temps consacré en dehors des copils à mes travaux. Vos encouragements et votre reconnaissance ont toujours eu un effet positif sur mon moral et ma motivation.

Merci à Mireille Navarrette, Walter Rossing, Flore Barcellini, Thierry Doré, Christophe David, Philippe Gate et Guy Richard qui ont accepté de participer à mon jury.

¹ Jeu un peu farfelu qui consiste à chercher comment faire quand on ne sait absolument pas comment s'y prendre et qu'on n'a aucune d'idée d'où on va.

Un grand merci à Ronan Trépos, incarnation même de la patience, tu as rapidement compris que les modèles et moi ça faisait deux et que ça allait être compliqué. Mais jusqu'au bout tu as vraiment assuré !

Un grand merci à Rodolphe Sabatier, qui avec son pragmatisme et sa rapidité d'appropriation du problème m'a apporté une grande bouffée d'air frais inespérée ! Au passage merci à toute l'équipe des JDD, en ce lieu mythique qu'est le hameau de l'étoile des choses se sont jouées dans ma tête, dans mon évolution.

Une thèse c'est aussi un quotidien, dans une équipe, je tiens donc à remercier tous les collègues de l'unité : ceux avec qui la pause était toujours l'opportunité de franche rigolade : Mimi, Alain, Mathieu, Arnaud, Céline ; ceux avec qui j'ai régulièrement échangé : Michel, Quentin, Raymond, Tamara, un grand merci à David Makowski, pour l'initiation aux modèles, pour avoir régulièrement pris le temps de discuter de mon travail mais pas seulement; celui qui m'a beaucoup aidé avec Azodyn : Damien Beillouin ; et enfin, celle avec qui j'ai partagé mon bureau pendant ces 3 années, Lucie Michel. Que de souvenirs dans ces 12m²... pas besoin d'en dire plus ici, tout ça tu le sais et puis c'est un peu tabou aussi !

Pour la réalisation du diagnostic des usages j'ai rencontré, une bonne soixantaine de personnes. Je ne pourrais pas mettre la liste exhaustive de tous ceux qui m'ont accueillie sur leur lieu de travail, sur leur exploitation ou chez eux. Partout où je suis allée j'ai reçu un accueil chaleureux et je ne parle pas seulement des cafés, des gâteaux au chocolat (petit clin d'œil à la femme de Didier qui fait un gâteau au chocolat avec la peau du lait), ou des poulets fermiers (Ah ! Jean-Bernard, tu sais comment t'y prendre avec les femmes !). Dans l'Eure, où j'ai fait mes premiers pas... Merci à Odile, Valéry, le CETA, les conseillers et les agriculteurs que j'ai rencontrés. Un grand Merci à Bertrand Omon et les agriculteurs du groupe, pour m'avoir accueillie chez vous à plusieurs reprises, pour avoir participé au test du prototype, un merci particulier à Eric, Sébastien, Didier, Pierre qui ont pris ce travail très au sérieux. Mes journées dans l'Eure qui ont jalonné ces trois années, ont toujours été des moments agréables où le travail se faisait dans la bonne humeur. Dans les Deux-Sèvres, merci à Eric Baraton et au groupe d'agriculteurs qui a fait le test du prototype. En Bourgogne, merci à Pascale, Julien, les membres du GREN et les agriculteurs qui ont pris le temps de discuter avec moi. En PACA et en Bretagne, merci aux conseillers, aux agriculteurs et aux collègues Arvalis de m'avoir reçue. Je remercie également Carole Rocca, et les conseillers des coopératives du groupe Invivo que j'ai rencontrés, les personnes qui ont répondu à mes sollicitations par email, téléphone ou visio. Merci à Marc Lambert, qui a lui aussi répondu à mes questions, mais surtout nous a prêté quelques N-tester, indispensables pour le test du prototype. Vous avez tous contribué quelque part à ce travail et je vous remercie de vous être ouverts à moi pour me dévoiler tous les secrets de la fertilisation azotée.

La thèse n'aurait pas eu le même goût sans la vie à Grignon, je remercie tous les doctorants : Julie, Ophélie, Charles, Damien, Anaïs, Laure, Karen, Aurore, Marie, Paul-Emile, pour ces soirées animées, déguisées, ciné, parfois à sonorité « doctorants anonymes ». Je remercie ceux avec qui j'ai partagé plus qu'un toit, mes chers colocataires : Gaspard, Anna et Leti. Sans vous, ça aurait été moins sympa !

En dehors de Grignon, il y a une vie aussi, je tiens à remercier mes amis Nadège, Marion, Amaury et Meryl, toujours prêts à tendre une main, une oreille, à donner un bon conseil. Merci pour tout. Je remercie également ma famille, ma sœur, mes nièces, Gaël pour leurs encouragements, leur présence. Un merci particulier à mes parents, pas seulement pour avoir montré votre intérêt à mes travaux, pour avoir relu quelques morceaux, mais aussi pour avoir été là, dans les moments difficiles comme dans les bons... Pour m'avoir soutenue, encouragée, accompagnée.

Il reste une personne toute spéciale à remercier : Maxime, tu n'y connaissais rien à l'azote quand nous nous sommes rencontrés, aujourd'hui tu es un spécialiste... Merci pour ta patience : m'écouter parler de ma thèse aussi souvent, aussi longtemps n'a pas du être tous les jours facile ! Mais ça y est c'est fini, et maintenant c'est juste toi et moi...

Table des matières

Introduction.....	14
Problématique.....	19
1. Construction et renforcement d'un paradigme de raisonnement de la fertilisation azotée autour de la méthode du bilan.....	20
1.1. L'histoire des engrais azotés dans l'agriculture française.....	20
1.2. La méthode du bilan pour raisonner la fertilisation du blé: de l'émergence au consensus généralisé	21
1.2.1. Première formalisation : Hébert (1969).....	21
1.2.2. Première vulgarisation : ITCF (1978).....	22
1.2.3. Standardisation : COMIFER (2013).....	22
1.3. Le fractionnement de la dose totale	25
1.3.1. L'origine du fractionnement.....	25
1.3.2. Les outils de diagnostic pour piloter le troisième apport.....	26
2. Quel cadre théorique pour concevoir de nouvelles méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée?	28
2.1. La théorie C-K	28
2.2. La question de l'intégration des usages dans la conception.....	29
3. Comment organiser la démarche de conception innovante?	32
3.1. Diagnostic des usages des méthodes et outils existants.....	32
3.1.1. Articulation entre diagnostic des usages et conception	32
3.1.2. Les situations d'usage.....	33
3.2. Conception participative d'un prototype d'outil de fertilisation	34
3.2.1. Les ateliers KCP pour la conception innovante collective	34
3.2.2. Des connaissances sous-valorisées par le paradigme de fertilisation actuel, qui pourront être mobilisées pour stimuler la créativité	36
3.2.3. La production de connaissances nouvelles induite par la conception innovante.....	38
3.2.4. Le prototypage assisté par modèle.....	38
3.3. Test d'usage du prototype.....	40
3.3.1. Prise en main du prototype	41
3.3.2. Débriefing sur l'usage du prototype	41
4. Organisation générale du manuscrit de thèse :	42

Chapitre I - Diagnostic des usages : Quelles difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan ?45

1. Introduction	48
2. Material and Methods.....	49
2.1. Analysis of the reports of the Regional Groups of Experts on Nitrate	50
2.2. Interviews with users on the way existing methods and tools are used	50
3. Results and discussion.....	51
3.1. Controversies about the target yield: “Expected yield” or “Desired yield”?.....	51
3.1.1. Debates about the standard rule.....	51
3.1.2. Divergent perception of the target yield	52
3.1.3. Is a method based on the target yield concept suitable for estimating optimal N fertilizer rates?	53
3.2. Controversies around the measurement of the residual soil mineral N at the end of winter	55
3.2.1. Uncertainties and doubts about the measurement, interpretation and extrapolation of the residual soil mineral N at the end of winter.....	55
3.2.2. The $R_{i_{meas}}$: an old-fashioned way of implementing the balance-sheet method?.....	57
3.3. Controversies between the regulatory standardization of the method and adaptation to the diversity of agricultural conditions.....	58
3.3.1. Debates on the equation to estimate N fertilizer rates	58
3.3.2. Debates on local tools.....	58
3.3.3. The paradox between standardization and adaptation to uses	59
4. Conclusion.....	60

Chapitre II - Démarche pour la conception innovante d'une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée qui intègre les usages.....65

1. Introduction	68
2. Approach to the design of an innovative fertilization method	69
2.1. Diagnosis of uses of existing methods and tools	69
2.2. The innovative design process: from a concept to a prototype for a new method.....	71
2.2.1. Collective workshop based on an exploratory conceptual axis	71
2.2.2. Generation of new knowledge	72
2.2.3. Model-based prototyping.....	72
2.3. Testing of a prototype of the method under design	73
2.3.1. Setting up a test with users	73

2.3.2. Collective debriefing	74
2.4. Feedback to the workshop team	74
3. Results	74
3.1. Diagnosis of uses of the method, to identify the exploratory conceptual axis and new assessment criteria	74
3.2. Design workshops for collective exploration	77
3.2.1. Refinement of the concept to develop the underlying principle of the new method.....	77
3.2.2. Generation of new knowledge required for the new concept explored	77
3.2.3. Methods for estimating soil N supply	78
3.2.4. Proposed frequency of plant monitoring	79
3.2.5. Model-based prototyping to incorporate uncertainty about the weather into decision rules	80
3.3. Testing the prototype method for determining fertilizer applications in the work conditions of the users	82
3.3.1. Changes in practices triggered by implementation of the prototype	82
3.3.2. Problematic situations requiring improvements to the prototype	83
3.3.3. Unexpected uses of the method suggested by users	83
4. Discussion	85
4.1. A fertilization method establishing a new paradigm	85
4.2. Prospective uses of the method	85
4.3. An innovative design process taking users and situations of use into account	86
4.4. Innovative ways of using models and theories	87
5. Conclusion	88

Chapitre III - Production de connaissances actionnables : Etablissement d'une trajectoire seuil de nutrition azotée.....93

1. Introduction	96
2. Materials and Methods	97
2.1. Experimental data	97
2.2. Identification of experimental treatments displaying yield loss	99
2.3. Method for comparing the range of NNI paths according to yield loss.....	100
2.4. Analysis of grain protein content and nitrogen use efficiency with I_{thresh}	101
2.4.1. Grain protein content	101
2.4.2. Nitrogen use efficiency.....	102
3. Results	102
3.1. Experimental results.....	102

3.2. Identifying the most accurate NNI path for distinguishing between treatments “with yield loss” and those “without yield loss”	103
3.2.1. Accuracy of I_{thresh}	103
3.2.2. Effectiveness of I_{thresh}	104
3.3. Effect of I_{thresh} on grain protein content and nitrogen use efficiency	106
4. Discussion.....	107
4.1. Highly productive intensively managed wheat crops can tolerate N deficiencies	107
4.2. The ability to tolerate N deficiency depends on the time at which the deficiency occurs	108
4.3. The concept of NNI path is a new form of actionable knowledge	109
5. Conclusion.....	110

Chapitre IV - Construction d'un prototype d'outil : Production de règles de décision à l'aide d'un model et de la théorie de la viabilité.....115

1. Introduction	118
2. Materials and methods.....	119
2.1. The model	119
2.2. Simulation of various fertilization strategies	120
2.3. Viability analysis.....	122
2.4. Simulations and analysis	123
2.5. Comparison with current recommendations	123
3. Results	124
3.1. Existence of a robust fertilization strategy for a given state.....	125
3.2. Existence of a robust fertilization strategy for a given state-control pair	127
3.3. Decision rules	129
3.4. Comparison between current recommendations and the NNI-based method.....	130
3.4.1. Comparison of fertilization strategies	130
3.4.1. Comparison of performances	131
4. Discussion.....	134
4.1. Change in practices.....	134
4.2. Updating the Azodyn model to include the minimum NNI path.....	134
4.3. Adapting recommendations in practice.....	135
4.4. Optimal weather conditions for maximizing NUE	135
4.5. Extrapolation to other agronomic situations	135
4.6. Using the viability theory framework to build decision rules with Azodyn.....	136
5. Conclusion.....	137

Chapitre V - Production de connaissances actionnables : Estimation de l'INN tout au long du cycle au moyen de la mesure de la teneur en chlorophylle des feuilles.....143

1. Introduction	146
2. Materials and Methods	147
2.1. Literature review	147
2.2. Experimental data	148
2.3. Set of models to be fitted to our database.....	150
2.4. Comparison of models.....	151
2.4.1. Goodness-of-fit and prediction accuracy	151
2.4.2. Selection procedure	151
3. Results	152
3.1. Literature review	152
3.2. Model selection	156
3.2.1. Model quality.....	156
3.2.2. Model likelihood.....	156
3.3. Growth stage effect.....	159
4. Discussion.....	161
4.1. Multimodel selection procedure	161
4.2. CMR or nCMR for predicting NNI	161
5. Conclusion.....	162

Discussion & Perspectives167

1. Un monopole de la méthode du bilan, qui structure les activités mais n'intègre pas les évolutions de contexte.....	169
2. Un renouvellement du paradigme du raisonnement de la fertilisation azotée	172
2.1. Objectifs et principes.....	172
2.2. Les indicateurs et la manière de les utiliser.....	174
2.3. La fonction d'apprentissage.....	175
3. Trois étapes qui s'articulent et se complètent pour intégrer le point de vue des utilisateurs dans la conception.	176
3.1. Combiner diagnostic des usages et atelier de conception.....	176
3.1.1. Le diagnostic des usages : un outil pour la conception innovante.....	176
3.1.2. Identifier des usages innovants avec le diagnostic des usages	177
3.2. Elaborer un prototype de nouvelle méthode en combinant ateliers de conception, modélisation et usage.....	178

3.3. Questionner la pertinence du prototype dans les pratiques agricoles	181
3.4. Formalisation d'une démarche d'ingénierie, pour la mise en œuvre de la méthode dans des situations agronomiques diverses.	182
3.5. Une production de connaissances originales directement liée à la conception.	184
4. Quels enseignements pour la réglementation ?	185
 Conclusion générale.....	188
 Références.....	190
 Annexe – Le guide d'entretien.....	204

Liste des acronymes

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

BDD : Bande Double Densité

BTI : Bulletin Technique d'Information

CAU / ANR : Coefficient apparent d'utilisation de l'engrais azoté / apparent nitrogen recovery

COMIFER : Comité Français d'étude et de développement de la fertilisation raisonnée.

CORPEN : à l'origine son action est limitée aux nitrates et aux phosphates « Comité d'orientation pour la réduction de la pollution des eaux par les nitrates et les phosphates ». En 1992 son action s'étend aux produits phytosanitaires et il est renommé en 1998 « Comité d'orientation pour des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement »

CO₂ : dioxyde de carbone

DN : Directive Nitrate

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, l'Agriculture et de la Forêt

DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'aménagement et du Logement

GEMAS : Groupement d'Etudes Méthodologiques et d'Analyses des Sols

GREN / Nitrate group : Groupe régional d'expertise nitrates

ICDC : indicateur proposé par Jeuffroy & Bouchard (1999) permettant de caractériser une carence en azote temporaire par le produit de son l'intensité de la carence (IC) et de la durée de la carence (DC).

INN / NNI : Indice de nutrition azoté (sans unité) / nitrogen nutrition index (unitless)

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

ITCF : Institut Technique des Céréales et des Fourrages

KCP : méthode d'organisation d'atelier de conception proposé par l'équipe de chercheur de la chaire Théorie et Méthode de la Conception Innovante du centre de gestion scientifique de MinesParisTech.

N : Azote / Nitrogen

TP / GPC : teneur en protéine / grain protein content

N₂O : protoxyde d'azote

NO₃⁻ : ion nitrate

NH₃ : ammoniac

N₂ : diazote

NO : monoxyde d'azote

MEEDDTL : Ministère de l'Ecologie du Développement durable des Transports et du logement

PPF : Plan Prévisionnel de Fumure

ROC : Receiver-Operating Characteristic

RSH : Reliquat sortie hiver. Analyse de sol mesurant la quantité d'azote minérale présente dans le sol à la sortie de l'hiver, permettant de renseigner le terme Ri de l'équation du bilan prévisionnel.

SPIEA : Syndicat Professionnel de l'Industrie des Engrais Azotés

Introduction

La gestion des engrais azotés est un enjeu majeur de l'activité agricole, à la fois sur le plan économique et sur le plan environnemental.

L'azote est un élément nutritif essentiel pour la plante. En tant que composant de la chlorophylle, il joue un rôle crucial dans la photosynthèse. C'est l'élément nutritif le plus limitant pour la croissance du blé : par exemple, en agriculture biologique, c'est le facteur limitant majeur, le principal responsable de niveaux de production plus faibles et moins réguliers qu'en agriculture conventionnelle (David et al., 2004). Dans les systèmes conventionnels, de manière quasiment systématique, des engrais azotés sont apportés en complément des fournitures du sol pour atteindre les niveaux de rendement et de qualité visés (Boiffin et al., 1981 ; Orloff et al., 2012). Au cours des 45 dernières années, la hausse de la production agricole s'est accompagnée d'une multiplication par 8 des quantités d'engrais azoté apportées (Pellerin et al., 2014). Depuis la découverte du procédé Haber-Bosch, la circulation d'azote réactif a doublé à l'échelle planétaire, amplifiant la cascade de l'azote (Sutton et al., 2011). On retrouve des composés azotés d'origine agricole aussi bien dans l'eau, avec des concentrations en ions nitrates (NO_3^-) parfois supérieures à la norme autorisée (Sogreah-MEEDDTL, 2011), que dans l'air, avec des émissions de gaz sous différentes formes NH_3 , N_2O , N_2 , NO (Cellier et al., 2013). La fertilisation azotée contribue au changement climatique via l'émission de protoxyde d'azote (N_2O), puissant gaz à effet de serre (Pellerin et al., 2013), mais aussi de CO_2 , lors de la synthèse de l'ammoniac à partir d'énergie fossile (Vert & Portet, 2012).

En 1980, le rapport Hénin déclenche une prise de conscience collective des enjeux environnementaux liés à l'activité agricole. Il rend compte d'un lien entre problèmes de qualité de l'eau et utilisation des engrais azotés. Il débouche sur la mise en place, conjointement par le ministère de l'agriculture et le ministère de l'environnement, d'une mission « Eau-Nitrates » et d'un comité d'orientation : le Comité « Eau-Nitrates », qui deviendra le CORPEN (Comité d'ORientation pour des Pratiques agricoles respectueuses de l'ENvironnement), dont l'objectif est de coordonner une expertise nationale sur les pratiques agricoles susceptibles de réduire la pollution de l'eau par les nitrates, afin de les vulgariser. Dans les années 90, la méthode du bilan constitue une voie privilégiée pour répondre à ces nouvelles préoccupations environnementales. Elle est au cœur de l'opération Ferti-Mieux, lancée en 1991 à la demande du ministère de l'agriculture, qui promeut auprès des agriculteurs des pratiques de fertilisation à même de réduire les risques de pollution des eaux par les nitrates (Lanquetuit & Sebillotte, 1997). Son utilisation est recommandée pour la gestion de la fertilisation azotée dans le code des bonnes pratiques agricoles, attaché à la Directive Nitrate (Beaudoin et al., 2005). Dans le «Recueil des bases de préconisations de la fertilisation azotée des cultures» du CORPEN (Carlotti et al., 1992), qui vise à synthétiser l'ensemble des préconisations de l'époque en matière de fertilisation azotée, la méthode du bilan est présentée comme la meilleure, et absolument nécessaire, pour fixer les

doses d'engrais. Un énorme investissement est fait pour la diffuser dans tout le secteur agricole français et massifier son usage sur l'ensemble du territoire. D'abord vulgarisée par l'Institut Technique des Céréales et des Fourrages en 1978 (ITCF, 1978), qui investit dans des centaines d'essais pour la valider (Thévenet, 2000), la méthode du bilan devient consensuelle au cours des années 80 dans le cadre du «Comité Français d'étude et de Développement de la Fertilisation Raisonnée» (COMIFER). Via le «guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales», le COMIFER diffuse régulièrement les références, validées scientifiquement, pour mettre en œuvre la méthode du bilan dans quasiment toutes les situations culturales possibles. Ce consensus autour de la méthode du bilan, renforcé par la généricité de son formalisme oriente largement les programmes de recherche, qui se structurent autour des postes du bilan (Lemaire & Nicolardot, 1997). De fait, l'amélioration du raisonnement de la fertilisation azotée se construit en premier lieu sur le perfectionnement de l'estimation des différents postes de l'équation du bilan. Les principales évolutions portent sur l'affinement de l'estimation des postes de fournitures du sol (Recous et al., 1993 ; Recous, 1995 ; Valé, 2006 ; Morvan, 2016), sur la contribution des effluents organiques (Institut de l'Elevage, 2001, Houot et al., 2014) et sur la prédiction des besoins à partir d'un coefficient de besoin par unité de production (COMIFER, 2013), avec une déclinaison variétale chez certaines espèces (Arvalis, 2015). Aujourd'hui, l'utilisation du bilan prévisionnel pour calculer les doses d'engrais est devenue quasiment obligatoire : si la méthode du bilan était passée relativement inaperçue lors de sa première présentation dans le Bulletin Technique d'Information de 1969 (Hébert, 1969), elle est promue, 46 ans plus tard, au rang d'outil réglementaire pour la mise en œuvre de la Directive Nitrate dans les zones vulnérables (Ministère de l'Ecologie, 2015).

La standardisation de l'utilisation de la méthode du bilan passe d'abord par le développement d'outils de calcul qui se perfectionnent au fil des améliorations incrémentales proposées par la recherche. Par exemple, le logiciel Azobil (Machet et al., 1990), basé sur un formalisme proche de celui diffusé par le COMIFER, évolue avec les connaissances sur la dynamique de l'azote du sol et les pertes gazeuses pour devenir Azofert (Machet et al., 2008), en intégrant les flux bruts de minéralisation et d'organisation de l'azote. Ensuite, l'adaptation de la méthode sur le terrain à l'ensemble des situations agronomiques rencontrées constitue également un facteur important de déploiement et de standardisation. Dans les situations où elle ne donnait *a priori* pas satisfaction, des travaux sont menés pour adapter sa mise en œuvre. Par exemple, la méthode suppose une mesure du reliquat d'azote minéral du sol en sortie hiver. Or, l'analyse de sol n'est pas toujours possible : par exemple dans les sols à forte charge en cailloux, où les racines s'enfoncent plus profondément que la tarière (Meynard et al., 1997a). Devant la difficulté à estimer indépendamment chacun des postes de fourniture du sol, des travaux de modélisation d'une fourniture globalisée sont menés en Aunis (Plas, 1992), Lorraine (Limaux et al., 1993) ou en Champagne Berrichonne (Le Gall, 1997). Ces travaux aboutiront à un nouveau formalisme de l'équation du bilan, basé sur un terme globalisé d'estimation des fournitures

en azote du sol à partir de témoins non fertilisés (Meynard et al., 1997a).

Aujourd'hui le paradigme de la fertilisation azotée, construit sur et par la méthode du bilan, repose finalement sur deux principes fondamentaux :

- 1) L'estimation, de manière indépendante, des différents termes de l'équation du bilan, relatifs à la fourniture en azote du sol et aux besoins de la culture (Meynard et al., 1997a).
- 2) Des règles de fractionnement de l'engrais permettant d'éviter au maximum les risques de carence (Meynard & Girardin, 1992).

La mise en œuvre de ces principes fondamentaux s'est accompagnée de la production d'outils de diagnostic de l'état de nutrition permettant d'éviter d'éventuelles carences en azote pendant la montaison (Laurent & Castillon, 1997). Ces outils innovants sont basés sur des indicateurs de nutrition azotée des plantes (i.e. la teneur en nitrate du jus obtenu par pression de la base de tige, la teneur en chlorophylle des feuilles). Ils permettent de détecter, de manière simple et efficace, l'installation d'une carence en azote, et ainsi de décider du déclenchement d'un apport (Taureau et al., 1995 ; Justes et al., 1997a). Une partie de la dose totale, calculée *a priori* par la méthode du bilan, est mise en réserve avant de démarrer la fertilisation, cette dose sera appliquée seulement si on détecte un risque de carence durant la montaison (Hébrard, 1999). Sur le blé, ces outils visent en particulier à améliorer le fractionnement de la dose d'engrais en vue de favoriser des apports tardifs, profitables à l'obtention de teneurs en protéines plus élevées (Coïc, 1956 ; Hébert, 1969). Les nouvelles technologies basées sur des capteurs embarqués, comme le N-sensor® (Link et al., 2003) ou des images satellites avec Farmstar® (Coquil et al., 2005) confortent l'organisation d'une complémentarité, initiée par JUBIL®, entre le bilan prévisionnel et des indicateurs basés sur la plante aisément accessibles, utilisés pour caler les apports tardifs. Ces technologies de proxi- ou télé-détection offrent aussi une nouvelle dimension au raisonnement de la fertilisation azotée avec la possibilité d'affiner la modulation de la dose d'engrais à l'échelle intra-parcellaire (Samborski et al., 2008)

La méthode du bilan et les outils de raisonnement qui s'appuient sur elle ont sans conteste permis des progrès importants (Sebillotte, 1985, Arvalis, 2016): réduction des situations problématiques très excédentaires en azote, accueil de certaines évolutions des connaissances scientifiques, ou encore amélioration des niveaux de la production, tout en s'adaptant aux contraintes réglementaires. Cependant, malgré tous les efforts du monde agricole pour rationaliser le raisonnement de la fertilisation, on ne peut que constater que le bon état écologique des eaux, fixé par la Commission Européenne, n'est pas atteint : les teneurs en nitrates dépassent la norme, les coefficients d'utilisation des engrais sont faibles (Delcour et al., 2013) et, en France, 87% des émissions de N₂O sont imputées à l'agriculture (Pellerin et al., 2014). Cet échec renvoie, entre autres, à la difficulté de prendre en charge, avec le modèle du bilan, l'évolution de la hiérarchisation des objectifs concernant la gestion de l'azote. Une telle difficulté avait été pointée du doigt dès les années 90 par Jeuffroy et Meynard

(1997) : « à la recherche généralisée de l'augmentation du rendement,[...], se substitue progressivement une diversification des objectifs de production.[...] La gestion de l'azote [...] devient un exercice complexe visant à maîtriser la qualité des produits [...], éviter les pollutions, limiter les coûts et atteindre un objectif de rendement qui n'est souvent plus le maximum permis par les potentialités du milieu ». La méthode du bilan est-elle adaptée pour gérer les arbitrages entre obtenir des teneurs en protéines élevées, et éviter les effets négatifs sur l'environnement ? Sur quels termes de l'équation se font les compromis, nécessairement différents selon les situations ? Le bilan permet-il d'éviter les stratégies d'assurance, qui entraînent des surconsommations d'intrants, et des risques accrus de pertes vers l'environnement (Meynard & Girardin, 1992 ; Buckley & Carney, 2013) ? Comment tient-il compte des variations de prix des céréales et de l'engrais (Laurent & Makowski, 2007) ? En quoi la méthode du bilan permet-elle de maximiser l'efficacité de l'engrais ?

Ceci revient à s'interroger sur l'existence d'un hiatus, d'un manque de cohérence, entre le modèle scientifique et le cadre de contraintes dans lequel les agriculteurs prennent leurs décisions. Des enquêtes commanditées par le COMIFER dans les années 80 mettaient déjà en avant que la méthode était complexe à mettre en œuvre pour un agriculteur, certains termes étant difficiles à estimer, avec des références parfois mal adaptées à leur manière de raisonner (Jeuffroy et al., 1987 ; Cerf & Meynard, 1988). Dans leur analyse des pratiques de fertilisation en Champagne Berrichonne, Felix & Reau (1995) insistent sur la difficulté d'appliquer la méthode du bilan pour la gestion de la fertilisation azotée à l'échelle d'une exploitation. Ils mettent aussi en garde contre les risques de généralisation des recommandations autour de l'apport protéique qui n'est pas forcément l'objectif de tous et qui est conditionné par la mise en œuvre de règles de fractionnement qui ne correspondent pas aux pratiques courantes. Meynard & Girardin (1992) mettaient également en avant la difficulté des agriculteurs à décider de leurs doses d'engrais dans une situation d'incertitude.

Le consensus scientifique autour de la méthode du bilan a permis d'arriver à un mode de raisonnement scientifiquement rigoureux et précis (Carlotti et al., 1992). Mais ces différents éléments appellent à s'interroger sur l'intérêt qu'il y aurait à renouveler le paradigme du raisonnement de la fertilisation pour répondre aux enjeux actuels et futurs :

- 1) En ouvrant la réflexion sur de nouveaux champs de connaissances. Des connaissances actuellement disponibles, sur les carences temporaires (Jeuffroy et al., 2013) ou sur les sources de variation du coefficient d'utilisation de l'engrais (Limaux et al., 1999), ne sont pas valorisées par le formalisme de raisonnement de la fertilisation proposé il y a plus de 40 ans par Hébert (1969) et Rémy & Hébert (1977).
- 2) En prenant en compte les modes de raisonnement des utilisateurs pour proposer des méthodes et outils adaptés aux conditions de mise en œuvre.

Ce travail de thèse vise à proposer, en s'appuyant sur un panel de connaissances plus large que le bilan et en intégrant son usage dès les premières étapes de sa conception, une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée innovante, en vue de franchir un pas supplémentaire dans l'adaptation aux évolutions des contextes socio-économique et environnemental. Le cas emblématique du blé, culture sur laquelle la méthode du bilan a initialement été conçue, a été retenu pour conduire cette recherche.

Problématique

Lorsque l'on aborde la question de la fertilisation azotée du blé en France, on ne manque pas de remarquer que la thématique a fait l'objet de très nombreux travaux de recherche en agronomie, et d'énormes investissements pour diffuser les bases de préconisation. On constate aussi que ces démarches ont largement été orientées autour de la méthode du bilan, et finalement, si les connaissances ont évolué, les principes de raisonnement, eux, n'ont pas vraiment changé. Ces principes de raisonnement résultent de l'état des connaissances et du contexte technico-économique des années 60 et 70, mais on ne s'interroge plus sur leur pertinence dans le contexte actuel. Bien que des réflexions aient été amorcées dans les années 90, il apparaît aujourd'hui essentiel de questionner les principes de base du raisonnement de la fertilisation azotée du blé, et de se demander s'ils ne doivent pas être remis en cause de manière plus ou moins profonde, pour tenir compte des évolutions des contextes scientifique, économique et environnemental. Nous faisons l'hypothèse qu'en remettant à plat la diversité des connaissances acquises autour de la fertilisation azotée, aussi bien les connaissances construites dans le cadre du modèle actuel, que les connaissances qui n'y ont pas trouvé leur place, on aura les moyens de proposer des nouveaux concepts, dont l'exploration pourrait aboutir à des méthodes alternatives de raisonnement de la fertilisation azotée. Par ailleurs, intégrer les usages de la méthode de fertilisation dès le début de sa conception apparaît indispensable pour proposer une méthode pertinente pour les agriculteurs et les conseillers, ses utilisateurs potentiels. Enfin, nous supposons que, pour sortir du paradigme sous-jacent à la méthode du bilan, il est nécessaire de mettre en œuvre une méthode de conception qui ouvre largement le champ des possibles.

Le cœur de ce travail est la conception innovante d'une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée du blé, qui valorise au mieux les connaissances disponibles, réponde à la multiplicité des enjeux autour de l'azote, et soit facile d'usage.

Dans cette partie, après avoir présenté la méthode du bilan et le paradigme de raisonnement de la fertilisation azotée qui y est lié, je présenterai le cadre théorique de la démarche de conception innovante, puis les 3 étapes autour desquelles la conception innovante d'une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée s'est construite: le diagnostic des usages, la conception participative couplée au prototypage assisté par modèle, et le test d'un prototype de méthode en situation d'usage.

1. Construction et renforcement d'un paradigme de raisonnement de la fertilisation azotée autour de la méthode du bilan

1.1. L'histoire des engrais azotés dans l'agriculture française

Dans un article des Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, « séances an 2000 », Gilles Thévenet, alors Directeur Scientifique de l'ITCF et président du COMIFER, décrit le développement, « de l'âge de pierre à l'âge de raison », de la fertilisation azotée dans le paysage agricole français. Jusqu'en 1850, les engrais minéraux ne sont pas utilisés, et on raisonne de manière empirique la gestion des engrais de ferme. Pendant le siècle qui suit, on peaufine l'analyse et la fabrication des engrais, mais la fertilisation minérale n'est pas une pratique répandue. De 1950 jusqu'au choc pétrolier de 1973, la consommation d'engrais (N,P,K) augmente de manière quasi linéaire, avec une croissance moyenne de 200 000 tonnes d'engrais par an. Avant les années 70, on se préoccupe peu des problématiques environnementales : en 1974, Yves Coïc, chercheur de l'INRA très investi sur le raisonnement de la fertilisation, va jusqu'à démontrer que les engrais azotés minéraux ont un effet négligeable sur la teneur en nitrate des eaux. A cette époque, l'objectif visé est principalement l'accroissement de la production agricole, et en France, la fertilisation azotée contribue largement au doublement du rendement moyen du blé en 20 ans (on passe d'une moyenne nationale de 16 q ha⁻¹ dans les années 50 à presque 35 q ha⁻¹ en 1973). Ce sont les firmes d'engrais, qui disposent alors de services R&D et/ou de services agronomiques, qui vont généraliser l'emploi des engrais. Le SPIEA (Syndicat Professionnel de l'Industrie des Engrais Azotés) contribuera fortement, dans les années 60-70, à l'élaboration des courbes de réponse qui sont la base du conseil pour la fertilisation azotée, ainsi qu'à la diffusion de modèles de calcul empirique. Dans ce contexte, la première présentation de la méthode du bilan (Hébert, 1969) qui vise à rationaliser les apports d'engrais, passe presque inaperçue (Thévenet, 2000). La fertilisation azotée connaît ensuite une phase de transition : sous le coup du choc pétrolier et du renchérissement des prix des engrais, cette pratique est remise en cause, et les apports souvent jugés surabondants ou mal équilibrés. C'est aussi l'époque de l'émergence des problématiques environnementales liées à l'azote (Hénin, 1980). L'ITCF, qui vulgarisera la méthode du bilan en 1978, conduit alors des centaines d'essais pour la valider (Thévenet, 2000). Le COMIFER est créé en 1980 comme lieu d'échanges et de concertation entre tous les acteurs concernés pour clarifier les débats autour de la fertilisation azotée. Emerge alors le concept de « fertilisation raisonnée » : la fertilisation azotée est apportée en complément des fournitures du sol pour satisfaire les besoins de la plante en vue d'obtenir les objectifs de production visés, tant quantitatifs que qualitatifs. Le respect de cet équilibre est supposé éviter les pertes vers l'environnement (COMIFER, 2013).

1.2. La méthode du bilan pour raisonner la fertilisation du blé: de l'émergence au consensus généralisé

1.2.1. Première formalisation : Hébert (1969)

Dans sa première parution dans le BTI de 1969, Hébert présente la méthode du bilan sous un formalisme simple :

$$X = Pf + Rf - Ri - Mr - Mn \quad \text{Eq. (1)}$$

Avec :

X, la dose d'engrais azoté prévisionnelle.

Pf, les besoins du couvert, définis comme le produit d'un besoin par unité de production, estimé à 3 kg par quintal pour le blé (Coïc, 1956), et d'un objectif de production. Hébert (1969) annonce une ambiguïté autour de ce terme : *«Fixer a priori un besoin revient à fixer un objectif de rendement. Y-a-t-il un inconvénient à viser les maxima indiqués par les références locales ? Doit-on considérer, au contraire, qu'une moyenne «améliorée» limite les risques de chute du rendement par excès d'azote ? Il s'agit là d'un problème qui touche au niveau de technicité de l'agriculteur»*. Il ne tranche pas sur la meilleure manière de fixer l'objectif de rendement et préfère insister sur le bon sens des agriculteurs : *«L'agriculteur doit bien se persuader que l'azote ne permet de réaliser que ce que les autres techniques ont préparé. Une quantité notable d'azote non consommée, par suite d'un accident climatique par exemple, ne saurait faire conclure qu'une dose moindre était prévisible et raisonnable au moment où elle fut décidée. Inversement, l'agriculteur n'a aucune raison de ne pas viser des rendements très élevés lorsque, au moment de l'apport, les données agronomiques, considérées dans la perspective du risque climatique, sont très favorables»*.

Rf, l'azote minéral du sol à la fermeture du bilan, cette quantité *« paraît être le minimum constamment maintenu dans le sol par l'activité microbienne »*. Hébert souligne qu'il est *« raisonnable de la compter dans le bilan, car elle préexistait au printemps »*. Même lorsque les récoltes sont très élevées, il reste un peu d'azote minéral dans le sol, une quantité plus élevée signifiant une fertilisation excessive.

Ri, l'azote minéral du sol à l'ouverture du bilan (le reliquat sortie hiver), correspond à la quantité d'azote minéral que l'on peut mesurer après la période de drainage et avant la reprise de minéralisation du sol, et le début des apports d'engrais. Hébert préconise l'analyse de sol pour estimer ce terme : *« Il est nécessaire de mesurer le reliquat à la fin de l'hiver »*.

Mr, l'azote issu de la minéralisation des résidus végétaux issus du précédent cultural, est estimé de manière empirique, et nécessite l'établissement de références concernant la quantité d'azote qui servira à la culture à fertiliser selon le précédent cultural et le mode de gestion des résidus (enfouissement ou non).

Mn, l'azote issu de la minéralisation nette de l'azote humifié du sol, dépend du type de sol, du climat de l'année et de l'histoire culturale de la parcelle. Le recours à un témoin non fertilisé est un moyen

d'estimer l'azote minéralisé. Des essais en station expérimentale sont requis pour en fixer une valeur approximative par situation type, ajoute Hébert.

La qualité du calcul de la dose à apporter dépend de la précision de l'estimation des différents postes.

1.2.2. Première vulgarisation : ITCF (1978)

Dans la brochure « La fertilisation azotée du blé », publiée par l'ITCF en janvier 1978, le formalisme proposé par Hébert a évolué. L'écriture proposée est alors :

$$X = Pf + Rf - Ri - Mh - Mhp - Ma \quad \text{Eq. (2)}$$

Ce qui change :

Pour le terme **Pf**, il est proposé une règle de calcul de l'objectif de rendement : « *Pour calculer le rendement espéré du blé, prendre la moyenne des deux meilleurs rendements en blé depuis 5 ans, sur la parcelle ou sur une parcelle identique de l'exploitation* ». Les besoins par unité de production restent 3 kg N q⁻¹.

Pour le terme **Ri** (le reliquat sortie hiver), deux alternatives sont proposées : réaliser une analyse de sol ou estimer le reliquat à partir de l'azote présent dans le sol à l'automne (qui dépend de la gestion du précédent) et du lessivage hivernal (qui dépend du type de sol et des quantités de pluie).

Le terme **Mh** est en fait un regroupement des termes Mr et Mn proposé par Hébert (Eq (1)). Des tables de références, issues d'expérimentations, sont proposées pour estimer Mh en fonction du type de précédent, de la gestion des pailles et de la teneur en calcaire du sol.

Mhp et **Ma** sont de nouveaux termes qui visent à prendre en compte les arrière-effets des retournements de prairies (Mhp) et des apports d'engrais organiques (Ma) sur la fourniture en azote du sol. Ces termes sont ajoutés pour adapter la méthode du bilan aux exploitations avec élevage.

L'équation du bilan s'accompagne également des premières règles de fractionnement de la dose totale. L'ITCF recommande de réaliser un deuxième apport, non pas calé sur une date, mais sur un stade de la culture : le stade épi 1cm. L'ITCF aborde brièvement le fractionnement en 3 apports pour éviter des apports supérieur à 100 kg ha⁻¹ mais aussi pour favoriser la teneur en protéine (ITCF, 1978).

1.2.3. Standardisation : COMIFER (2013)

Aujourd'hui l'écriture « officielle », présentée dans la brochure du COMIFER, compte 19 termes, certaines simplifications étant communément admises. Ainsi, l'équation du bilan, à mettre en œuvre pour le calcul de la dose d'engrais prévisionnel s'écrit :

$$X = Pf + Rf - Ri - Mr - Mn - Mhp - Xa - MrCI - Nirr - A - Pi + L \quad \text{Eq. (3)}$$

Ce qui évolue :

Le terme **Pf**, qui désigne toujours les besoins de la culture, est estimé à partir d'un besoin par unité de production, décliné par variété, réparti en 3 catégories : b=2.8 ; b = 3 ; b=3.2. Ce système permet d'assurer des objectifs couplés de rendement et de teneur en protéine en fonction des différents

niveaux d'exigence des variétés. Plus une variété est productive, moins ses grains sont riches en azote, et donc plus son besoin unitaire est faible. Inversement une variété sélectionnée pour une haute teneur en protéines aura des besoins unitaires plus élevés. L'objectif de rendement est quant à lui normé : *« l'objectif de rendement sera calculé comme la moyenne des rendements réalisés sur l'exploitation pour la culture ou la prairie considérée et, si possible, pour des conditions comparables de sol au cours des cinq dernières années en excluant la valeur maximale et la valeur minimale »* (Arrêté du 19 décembre 2011, Ministère de l'Ecologie, 2015). On remarque le changement de ton entre les premières tentatives de définition (moyenne améliorée pour Hébert, moyenne des deux meilleurs pour l'ITCF), on est ici sur un calcul pragmatique de moyenne réduite.

Il est toujours recommandé de privilégier l'analyse de sol pour estimer le reliquat sortie hiver **Ri**. Dans certaines régions, il est devenu réglementaire sur les exploitations en zone vulnérable. En parallèle, les outils modélisant **Ri** (sur la base des propositions de 1978) se sont développés.

Des travaux scientifiques ont permis d'affiner l'estimation de **Mr**, l'azote minéralisé par les résidus (Recous et al., 1993 ; Recous, 1995).

La recherche a également investi dans l'amélioration de l'estimation de **Mn**, la minéralisation de l'azote du sol (Meynard et al., 1997). Le COMIFER propose un calcul qui prend en compte des caractéristiques de sol (%N total, %N organique, Profondeur, densité, % argile et calcaire), un coefficient « effet du système de culture » et la vitesse de minéralisation (qui est fonction du taux de minéralisation de l'azote organique humifié (Km) et de la température (Jours Normalisés) (COMIFER, 2013). Les progrès scientifiques sur ce poste ont abouti à des modèles dynamiques d'estimation de l'azote minéralisé du sol (Brisson et al., 1998 ; Jeuffroy & Recous, 1999). Aujourd'hui des travaux sont toujours en cours pour améliorer la modélisation de ce poste (Morvan, 2016).

La prise en compte de l'effet des apports d'engrais organique avant l'ouverture du bilan a été inclus dans le terme **Mr** ; en revanche **Xa**, prend en compte les fournitures d'azote des engrais organiques appliqués sur la culture. Le fait d'octroyer une valeur fertilisante aux effluents d'élevage sera également facteur d'évolution de la méthode du bilan (Morvan et al., 1997). Avec le développement des engrais organiques et l'utilisation de boues de stations d'épuration, de composts urbains ou de vinasses de sucrerie, **Xa** devient **Xpro** pour Produits Résiduaux Organiques. Le principe de calcul de leur valeur fertilisante reste le même, c'est-à-dire à partir d'une analyse de la teneur en matière sèche, en carbone, en azote total et en azote minéral (COMIFER, 2013).

Plusieurs termes se sont ajoutés à l'écriture proposée par l'ITCF en 1978 :

MrCi la minéralisation des résidus de culture intermédiaire. Cet ajout rend compte de l'évolution des pratiques agricoles, qui tendent à éviter les sols nus, surtout pendant la période automnale, à fort risque de lessivage. Ces pratiques ont largement été diffusées via la réglementation et les codes de bonnes pratiques agricoles.

Les dépôts atmosphériques (A) et l'azote contenu dans l'eau d'irrigation (N_{irr}), sont ajoutés pour prendre en compte des quantités d'azote d'autres sources que l'azote du sol ou des engrais.

Le terme P_i , est également ajouté pour prendre en compte de l'azote déjà absorbé par le couvert avant l'ouverture.

Et finalement, L , un facteur de lixiviation qui rend compte des éventuelles pertes d'azote par lixiviation lorsque les précipitations sont importantes entre la date d'ouverture du bilan et la date du premier apport. Des abaques de la quantité de nitrate lixivié, en fonction de la lame drainante, sont construites avec le modèle LIXIM (Mary et al., 1999) pour déterminer la valeur de L qui permettra d'ajuster la valeur de R_i dans le calcul de la dose totale.

A cette écriture, déjà bien alourdie, peuvent éventuellement s'ajouter d'autres termes dont la simplification est communément admise : I_x pour l'organisation microbienne et G_x pour les pertes par voie gazeuse sont ajoutés (Recous et al., 1997), G_s un facteur de compensation des pertes du sol par voie gazeuse, et les apports d'azote atmosphérique par la fixation symbiotique (F_s) et non symbiotique (F_{ns}).

En parallèle, des travaux d'adaptation du modèle à la diversité des situations agronomiques conduiront à des évolutions du formalisme de l'écriture initialement proposée :

$$X = \frac{Pf - P0}{CAU} - Xa \quad \text{Eq. (4)}$$

Avec $P0$, la quantité d'azote absorbé par le peuplement en l'absence d'apport d'engrais, et CAU , le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais (Meynard et al., 1997). Cette écriture est une alternative au formalisme de la méthode du bilan, qui repose sur une estimation indépendante des différents postes de fournitures en azote du sol. Elle est issue des réflexions et travaux menés dans les années 90, en Aunis (Plas, 1992), Champagne Berrichonne (Le Gall, 1997) et Lorraine (Limaux, 1994) sur la modélisation globalisée des fournitures en azote du sol. Dans ces régions où la mesure d'un reliquat n'était ni techniquement faisable, ni pertinente (forte charge en cailloux, profondeur d'enracinement supérieure à la profondeur de prélèvement de sol), l'impossibilité d'estimer précisément chacun des termes de fourniture a conduit à des propositions concrètes concernant l'utilisation de réseaux de témoins non fertilisés pour pallier cette difficulté (Meynard et al, 1997).

Pour diffuser et massifier le calcul des doses d'engrais à la parcelle, des outils de calcul automatiques seront aussi développés. Par exemple : Azobil (INRA) puis Azofert® (INRA et Laboratoire Départemental d'Analyses et de Recherche, LDAR), Mes p@rcelles (Chambres d'Agriculture), FertiWeb (Arvalis Institut du végétal), Epiclès (Invivo). Tous ces logiciels reprennent le formalisme du bilan comme établi dans la brochure du COMIFER, avec un paramétrage issu en partie des références du COMIFER et en partie d'essais conduits par leurs promoteurs.

1.3. Le fractionnement de la dose totale

1.3.1. L'origine du fractionnement

En 1969, Hébert aborde, quoique rapidement, la question du fractionnement des engrais. A cette époque les engrais azotés sont généralement apportés au tallage, avec un seul apport. Même si Hébert, estime que cela peut permettre d'atteindre les résultats souhaités, il suggère un intérêt à fractionner l'apport entre le tallage et le début de la montaison. Il se montre sceptique sur les apports plus tardifs, dont la valorisation est « *extrêmement variable suivant les terres* ». Il indique cependant que les apports plus tardifs peuvent améliorer le poids de 1000 grains et la teneur en azote du grain (jusqu'à 30%). Mais, à l'époque, rappelons que l'objectif premier est l'obtention de hauts rendements: atteindre des niveaux de teneur en protéine élevés n'était pas nécessairement utile. Avant lui, Coïc (1956) a déjà mis en avant l'intérêt du fractionnement de manière plus marquée. Il montre qu'un fractionnement de la dose entre le tallage (mars) et la floraison (mai) permet d'atteindre le rendement le plus élevé et le taux de protéines le plus fort. Il insiste sur l'intérêt de répartir l'engrais sur la période de croissance végétative, afin que le couvert ait de l'azote à sa disposition lorsque ses besoins sont importants (c'est-à-dire lorsqu'il a une forte croissance) et que les fournitures en azote du sol sont insuffisantes. Le fractionnement des apports sur blé permet de coller à la dynamique de l'azote dans le sol et de besoins en azote des plantes (Meynard, 1985a) : avant la reprise de végétation, à la fin de l'hiver, les besoins très faibles du blé sont satisfaits par la minéralisation automnale ; à la reprise de végétation, les besoins restent modérés mais l'azote du sol peut avoir été lessivé et la minéralisation reste faible, un apport « tallage » est conseillé pour stimuler la production de talles ; c'est au cours de la montaison que les besoins du blé sont les plus importants, à ce moment du cycle de croissance se joue la montée à épi, un apport au stade « épi 1cm » est donc déterminant sur les composantes du rendement.

En 1978, l'ITCF initie le fractionnement calé sur des dates calendaires et des stades de la culture et commence à vulgariser la conduite de la fertilisation azotée en 3 apports (ITCF, 1978). A ce moment-là, les apports recommandés au tallage (1^{er} apport) sont encore relativement élevés (jusqu'à 100 kg/ha sur les blés clairs – pour les faire taller), le deuxième apport, indispensable pour assurer l'alimentation du blé, doit impérativement être réalisé au stade épi 1cm, « stade clé de la nutrition azotée ». Les références acquises sur les besoins du blé jusqu'au début de la montaison (Meynard, 1985b), ainsi que la démonstration de la moins bonne efficacité des apports précoces (Plas, 1992, Limaux, 1994), conduisent à une baisse progressive des recommandations concernant les apports « tallage ». Sur le terrain, la diminution de la dose apportée au premier apport se heurte à un problème technique : cela nécessite un réglage du matériel qui est vécu comme une réelle contrainte par les agriculteurs (Com.pers. I.Felix). C'est lorsque le fractionnement en 3 apports sera maîtrisé que les choses évolueront : il permet de diviser la dose totale en 3 doses, réduisant ainsi la dose du premier apport sans nécessité de réglage du matériel entre les apports. Le fractionnement en 3 apports permet l'obtention de teneurs en protéines des grains plus élevées (ITCF, 1978). Dès lors, la recommandation

est d'apporter 40 à 60 kg N ha⁻¹ après l'apparition de la ligule de la dernière feuille, soit environ 6 semaines après l'apport à « épi 1cm ». Cependant, ceci ne rentrera dans les pratiques que plus tard, le résultat de cette technique étant à l'époque « très incertain » (ITCF, 1978).

1.3.2. Les outils de diagnostic pour piloter le troisième apport

Si la réalisation d'un troisième apport permet de diminuer le premier, les recommandations de la fin des années 70 soulignent que la valorisation de ce dernier apport est plus aléatoire (ITCF, 1978), les conditions climatiques en fin de cycle étant moins souvent favorables (moins de jours de pluie, sol plus sec). Le diagnostic pour piloter ce troisième apport permet de limiter l'incertitude liée au calcul par le bilan, notamment sur l'estimation a priori de l'objectif de rendement. Ce dernier apport n'est réalisé que lorsqu'il est utile, c'est-à-dire lorsqu'il permet effectivement d'améliorer le rendement et la teneur en protéine. Des outils de pilotage seront développés pour estimer l'état de nutrition du couvert par le biais d'indicateurs simples à mesurer, corrélés à l'INN (Encadré 1). La méthode JUBIL® par exemple (dont le nom est une concaténation de JUs de bas de tige et méthode du BILan), conçue par l'INRA et l'ITCF, repose sur une mesure de teneur en nitrate dans le jus de bas des tiges pour déterminer l'utilité du 3^{ème} apport courant montaison (Justes, 1993). Les travaux de Papastylianou et al. (1982) montrent une corrélation entre la concentration critique en nitrate mesuré dans le jus de bas de tige et la production de biomasse sèche maximale. Ils observent que les meilleurs rendements sont obtenus lorsque la concentration en nitrate du jus de bas de tige reste au-dessus de la concentration critique durant la croissance végétative. La thèse d'Eric Justes (1993) consistera à affiner cette corrélation jusqu'à la production d'un outil opérationnel (i.e. qui permette d'utiliser cet indicateur pour déclencher le dernier apport d'engrais quand les conditions sont favorables à la maximisation de l'efficacité d'utilisation de l'azote). Le principe de la méthode JUBIL® repose d'abord sur le calcul de la dose prévisionnelle avec la méthode du bilan. La dose totale est ensuite minorée de 40 kg N ha⁻¹, le reste est fractionné en 2 apports. Puis, pendant la montaison, l'état de nutrition azotée du blé est contrôlé par une mesure du jus de bas de tige. Le troisième apport est déclenché si un état de carence en azote (INN < 1) est détecté. La participation de l'ITCF dans ces travaux permettra la commercialisation de la mallette JUBIL® et la vulgarisation de la méthode auprès du secteur agricole (Hébrard, 1999). Sur le même principe de détection d'un état de carence, d'autres outils de pilotage se développent ensuite, basés sur une estimation indirecte de la teneur en chlorophylle des feuilles, mesurée par transmittance (Reeves et al., 1993) ou réflectance (Raun et al., 2001). Aujourd'hui, avec le développement des nouvelles technologies basées sur des capteurs embarqués comme le N-sensor® (Link et al., 2003) ou des images satellites avec Farmstar® (Coquil et al., 2005), les outils basés sur des indicateurs de nutrition azotée sont encore plus aisément accessibles.

Encadré 1. L'indice de nutrition azotée (INN)

L'INN est le ratio entre la teneur en azote dans les parties aériennes de la plante (%Nobs) et la teneur en azote critique (%Nc) (Fig.1 ; Eq.(5)). La teneur %Nc correspond à la concentration minimale permettant la production de biomasse aérienne maximale (Lemaire et al., 1997). L'INN indique donc si le niveau d'azote contenu dans la plante est supérieur ou inférieur au niveau permettant la biomasse maximale (Lemaire & Gastal, 1997). Il permet de décrire les carences et de caractériser leur effet sur la formation des grains (Justes et al., 1997b ; Jeuffroy & Bouchard, 1999). Il est pertinent pour identifier les situations dans lesquelles une carence en azote induit une réduction de production par rapport à un potentiel (Lemaire & Meynard, 1997). L'INN à floraison est un indicateur du nombre de grains, très corrélé au rendement (Jeuffroy & Bouchard, 1999), et de la teneur en protéine (Justes et al., 1997b). Comme le décrivent Meynard et al. (1997b), l'INN est un bon indicateur de la nutrition azotée parce qu'il est spécifique (i.e. il ne varie qu'avec la nutrition azotée) et sensible (i.e. il réagit au changement de nutrition azotée, particulièrement dans des situations de carences fortes, prolongées). Cependant, il est lourd à mesurer, puisqu'il nécessite de réaliser simultanément une pesée de la biomasse et une analyse de teneur en azote des plantes (Prost & Jeuffroy, 2007). Pour s'appuyer sur un tel indicateur dans le raisonnement de la fertilisation, il faut soit développer des méthodes qui permettent d'avoir ces informations rapidement (Mistele & Schmidhatler, 2008 ; Eitel et al., 2014) soit s'appuyer sur des indicateurs corrélés à l'INN et facilement mesurables (Cartelat et al., 2005 ; Prost & Jeuffroy, 2007).

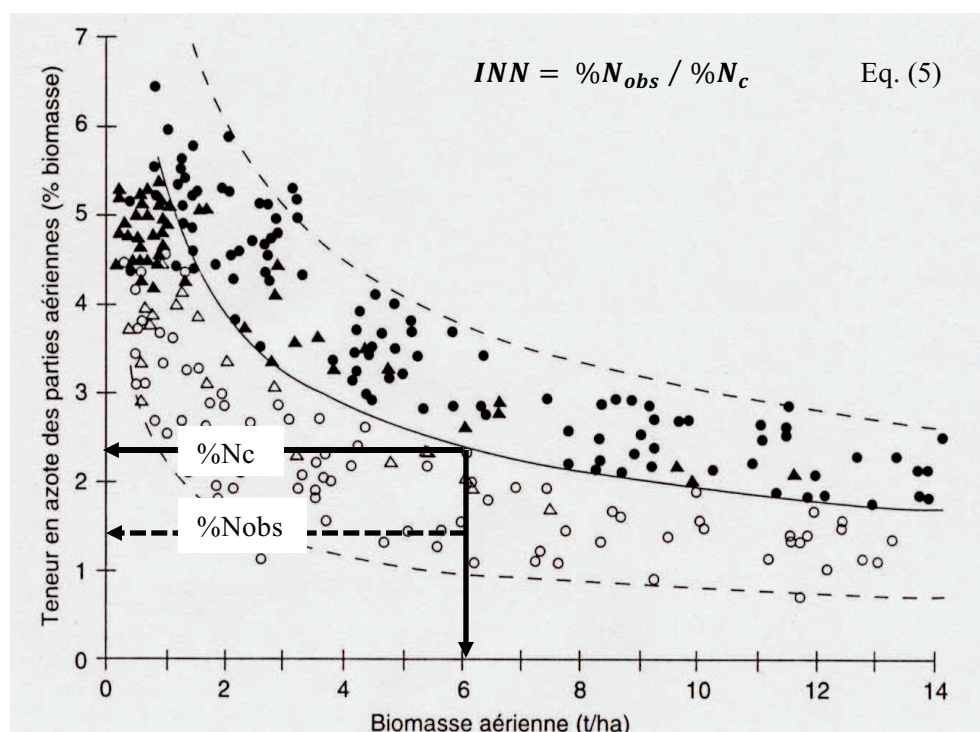


Fig. 1. Graphique de la concentration en azote en fonction de la biomasse pour des traitements expérimentaux où N a été (symbole vide) ou non (symbole plein) limitant pour la croissance (Justes et al., 1994). Le trait plein correspond à la courbe de %N critique, au dessus la courbe %Nmax et en dessous %Nmin (Justes et al., 1997a)

2. Quel cadre théorique pour concevoir de nouvelles méthodes de raisonnement de la fertilisation azotée?

On distingue généralement deux régimes de conception, la conception réglée et la conception innovante (Le Masson et al., 2006). En conception réglée, on vise à améliorer des produits ou technologies existantes sans changer les objectifs de conception, ni l'identité des objets conçus (Elmqvist & Segrestin, 2009). Les critères que doit respecter l'objet conçu ne changent pas et peuvent donc être clairement définis à l'avance (Agogué et al., 2013). Les compétences nécessaires pour innover et les processus de validation (prototypes, expérimentations, tests, indicateurs) n'ont pas besoin d'être changés non plus et sont identifiables dès le début du processus de conception. Le raffinement progressif de la méthode du bilan pour améliorer le raisonnement de la fertilisation azotée illustre très bien un cas de conception réglée dans le domaine agricole (Meynard et al., 2012 ; Pellerin et al., 2014). Mais, dès lors que les cadres de la conception sont mis en débat, la conception réglée n'est plus adaptée. Les représentations passées et établies des objets et de leurs organisations sont déstabilisées (Agogué et al., 2013), il n'est alors plus possible de spécifier à l'avance les compétences à mobiliser, ni les méthodes de validation. Il faut alors changer de régime de conception pour aller vers la conception innovante (Hatchuel & Weil, 2009 ; Prost et al., 2016). L'expression « conception innovante » désigne un processus d'exploration visant à satisfaire des attentes complètement nouvelles (Agogué & Hooge, 2014). Elle peut se décrire comme un processus de co-évolution simultanée d'un concept à développer et de connaissances à mobiliser (Elmqvist & Segrestin, 2009). La conception innovante demande non seulement de la créativité, mais aussi une grande capacité et une organisation pour faire évoluer, au cours du processus de conception, au fur et à mesure que le concept de l'innovation se précise, les objectifs visés, ainsi que les champs de savoirs et les collaborations mobilisés (Le Masson et al., 2006).

2.1. La théorie C-K

La conception peut se voir comme un processus de résolution de problème dans lequel on choisirait la solution qui satisfait le mieux nos critères de sélection. Mais la conception innovante implique généralement plus que la seule identification d'une solution existante : il y a une génération d'objets nouveaux, dont le bien fondé sera garanti par des connaissances nouvelles à produire (Hatchuel & Weil, 2009). La théorie C-K a été proposée pour modéliser la logique de génération de ces nouveaux objets dans les démarches de conception innovante (Hooge et al., 2012). Elle rend compte des changements d'identité des objets et des expansions des connaissances produites lors du processus de conception (Hatchuel & Weil, 2009). Cette théorie suggère que l'innovation émerge de l'expansion conjointe de l'espace des concepts (C) et de celui des connaissances (K) (Hatchuel & Weil, 2002 ; Le Masson et al., 2006).

Pour favoriser le processus d'innovation, les auteurs de la théorie C-K proposent de partir de l'exploration d'un concept initial (concept projecteur). Dans les règles de construction théorique d'un diagramme C-K, il est défini comme un concept éloigné du paradigme actuel, pouvant faire l'objet d'une démarche de conception dédiée (Agogué et al., 2013). Ce concept doit avoir un potentiel suffisant pour lancer l'exploration d'une innovation. Une de ses caractéristiques est qu'il est « indécidable » dans l'espace K: il n'est ni vrai ni faux par rapport aux connaissances existantes (Hatchuel et al., 2009). Sa formulation est incomplète, voire même avec des propriétés souhaitées pour l'objet à concevoir ambiguës, et elle doit permettre d'opérer une dichotomie entre ce qui est connu et ce qui ne l'est que partiellement ou pas du tout (Hatchuel & Weil, 2009). L'objectif du processus de conception est de transformer une telle proposition « indécidable » en propositions vraies dans K (Giller et al., 2010). La conception est conduite en proposant des attributs non connus ou des propriétés inhabituelles dans l'espace C, qui déstabilisent l'identité des objets et appellent à explorer l'espace K.

L'exploration démarre lorsque des partitions du concept projecteur sont générées dans l'espace C (Hooge et al., 2012). L'expansion conjointe des espaces C et K se fait via 4 opérateurs (Encadré.2).

Proposer des attributs qui ne font pas partie des connaissances existantes est un mécanisme-clé pour stimuler l'expansion conjointe des espaces C et K. Ce sont par ces allers-retours entre et dans les deux espaces qu'émergent de nouveaux objets, appelés à devenir des innovations. En comparaison des méthodes d'exploration de type brainstorming qui reposent sur une stimulation de la créativité, la théorie C-K contrôle et structure les partitions et les divergences faites sur le concept initial pour stimuler des explorations inattendues (Hatchuel et al., 2009 ; Agogué et al., 2013). Dans l'espace C, l'expansion a une structure « en arbre » où chaque branche ne peut se développer indépendamment du concept à partir duquel la partition est faite (Giller et al., 2010). Par contre, dans l'espace K, les nouvelles propositions peuvent être indépendantes les unes des autres, rien n'oblige à ce qu'elles soient directement connectées.

2.2. La question de l'intégration des usages dans la conception

Dans le cadre de la conception d'outils d'aide à la décision en agriculture, la question d'une anticipation de l'intégration des usages dans la conception se pose de manière particulièrement aiguë (Cerf & Meynard, 2006 ; Prost et al., 2012 ; Cerf et al., 2012). Il s'agit de mobiliser conjointement des savoirs scientifiques et techniques, et des connaissances sur l'organisation de l'activité d'utilisateurs, pour concevoir des prototypes pertinents, qui pourront s'insérer facilement dans cette organisation et permettre de la faire évoluer de manière à mieux répondre à des objectifs non atteints (Prost et al., 2016). Prendre en compte les usages d'une méthode de fertilisation dans sa conception permet :

- d'identifier les situations dans lesquelles la méthode de fertilisation devra apporter des solutions à des problèmes non résolus, là où les méthodes actuelles ne le font pas (Cerf et al., 2012) ;
- de capter certaines spécifications de la méthode à concevoir qui augmenteront la capacité des utilisateurs à l'utiliser dans leurs situations d'actions (Lecomte et al., 2010) ;
- de mettre en lumière des indicateurs pertinents pour les utilisateurs, qui permettront de mieux instrumenter la mise en œuvre de la nouvelle méthode (Toffolini et al., 2016) ;
- de contribuer à la définition progressive des objectifs et des modalités d'évaluation de la méthode conçue (Meynard et al., 2012).

En nous appuyant sur les propositions méthodologiques de Cerf et al. (2012) pour la conception participative d'outils d'aide à la décision en agriculture, nous proposons de suivre une démarche de conception innovante qui intègre les usages. Elle repose sur 3 grandes étapes : 1) un diagnostic des usages sur les méthodes et outils existants ; 2) une phase d'exploration de nouveaux concepts, organisée lors d'ateliers de conception participatifs, de production de connaissances nouvelles et de la modélisant, débouchant sur la proposition d'un prototype de l'outil ; 3) un test d'usage du prototype.

Notre démarche de conception innovante entremêle trois dimensions (Cerf et al., 2012): de nouveaux concepts à développer, des connaissances à mobiliser dans ce processus de conception, ainsi que des connaissances nouvelles à produire pour spécifier les concepts explorés et les situations d'usage des innovations dérivées de ces concepts. Introduire les usages dans la démarche de conception ne change pas les hypothèses de base de la théorie C-K sur l'expansion des espaces concepts et connaissances (Hatchuel & Weil, 2009), cependant cela suggère que, dans l'espace des connaissances, se développeront des connaissances en lien avec l'usage et pour l'action. Ainsi, les connaissances dont nous aurons besoin au cours du processus seront d'une autre nature que les connaissances habituellement mobilisées pour la conception en agronomie, puisqu'elles renverront au besoin d'adaptation du concept aux modes de raisonnement et aux modalités d'action des utilisateurs.

Encadré 2. Opérateurs C-K

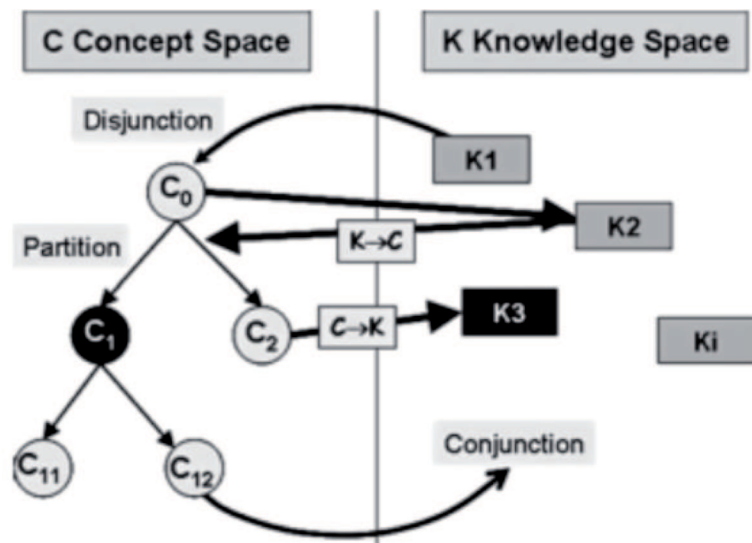


Fig.2. Représentation du formalisme C-K et des opérateurs (Hatchuel & Weil, 2009)

Pour l'opérateur $C \rightarrow C$, on distingue deux types de partition: 1) restrictives, qui visent à spécifier et préciser ce que sera l'objet conçu. Ce type de partition réduit l'espace des possibilités, et elles sont généralement utilisées lorsque le processus d'exploration cherche à faire une conjonction vers un concept qui soit vrai dans K ; 2) expansives, qui débouchent sur la proposition de nouveaux attributs dans C (Agogué et al., 2013). Ce type de partition vise à explorer l'espace des possibles en générant plusieurs variantes d'attributs possibles au concept initial.

Les partitions expansives conduisent à se demander : a-t-on les connaissances nécessaires pour répondre à cette question ? Le traitement de la question logique fait alors appel à l'opérateur $K \rightarrow K$: Il s'agit de la K-validation d'un concept. Lorsqu'une partition est faite dans C, K doit être développé afin de valider le statut logique de cette proposition dans K (Hatchuel & Weil, 2009). Soit les connaissances nécessaires sont disponibles dans K, soit il faut les produire.

$K \rightarrow C$ est un opérateur de disjonction qui permet la formulation d'un concept (Hatchuel & Weil, 2002). Par cet opérateur, on peut ajouter une propriété de l'espace K comme nouvel attribut d'un concept dans l'espace C (Agogué et al., 2013). On parle de disjonction lorsque tous les termes de la proposition appartiennent à des propositions de K mais que la proposition n'a pas de statut logique dans K (sinon elle serait une connaissance) (Hatchuel & Weil, 2002).

$C \rightarrow K$ est un opérateur de conjonction qui transforme un concept en connaissance (Hatchuel & Weil, 2002). Cet opérateur vise à ajouter ou à soustraire des propriétés de l'espace K à des concepts de l'espace C afin de parvenir à des propositions avec un statut logique dans K (Agogué et al., 2013).

C'est-à-dire que le concept obtenu par conjonction comporte un ensemble de propriétés qui lui permettent d'acquérir un statut logique dans K (Hatchuel & Weil, 2002). Lorsqu'il y a conjonction, la conception s'arrête et quand il n'y a pas conjonction, il y a développement de nouvelles connaissances (Agogué et al., 2013).

3. Comment organiser la démarche de conception innovante?

Ainsi que nous l'avons précisé dans le paragraphe précédent, la démarche qui sera suivie dans cette thèse repose sur 3 étapes : 1) un diagnostic des usages des méthodes et outils existants ; 2) une phase d'exploration de nouveaux concepts, organisée lors d'ateliers de conception participatifs, de production de connaissances nouvelles et de la modélisation, débouchant sur la proposition d'un prototype de la nouvelle méthode de fertilisation; 3) un test d'usage du prototype par des agriculteurs et des conseillers agricoles. Ces étapes seront successivement abordées dans les § 3.1., 3.2. et 3.3.

3.1. Diagnostic des usages des méthodes et outils existants

Le diagnostic des usages est une démarche, proposée par Cerf et Meynard (2006) et Cerf et al. (2012), ayant pour but de prendre en compte les utilisateurs pour orienter la conception. Les éléments tirés du diagnostic apportent des connaissances directement en lien avec les savoirs, les activités et les pratiques des utilisateurs (Lecomte et al., 2010). Ils sont source d'inspiration pour l'élaboration de nouveaux concepts :

- En identifiant les situations problématiques dans lesquelles les outils actuels ne donnent pas satisfaction (Cerf et al., 2012) : non utilisation, lourdeur de mise en œuvre, sources d'erreurs ou manque de confiance ;
- En mettant en évidence, par la comparaison des usages de différents outils actuels, les caractéristiques spécifiques qui en facilitent l'usage ;
- En identifiant des usages déviants des outils actuels, c'est-à-dire non prévus par leurs concepteurs, souvent nés d'une adaptation à des contraintes spécifiques, et qui révèlent l'existence d'un besoin (Cerf et Meynard, 2006).

3.1.1. Articulation entre diagnostic des usages et conception

Les résultats du diagnostic peuvent être directement mobilisés pour intégrer les usages dans la conception (Cerf & Meynard, 2006). Dès lors que le diagnostic permet de décrire des comportements face aux outils disponibles, ceux-ci peuvent être pris en compte, dès les premières étapes de la conception d'un nouvel outil, pour clarifier les besoins des futurs utilisateurs (Lecomte et al., 2010). L'identification des situations dans lesquelles les outils actuels n'apportent pas les solutions adéquates, met en avant les questions et les problèmes auxquels le nouvel outil devra répondre (Cerf et al., 2012). Il y a souvent un écart entre les principes scientifiques sur lesquels reposent les outils, et la manière dont les utilisateurs raisonnent (Mc Cown, 2001 ; Cerf & Meynard, 2006 ; Prost et al., 2012). Un moyen de réduire ces écarts est de réinterroger en conception les principes scientifiques qui induisent, directement ou indirectement des difficultés de mise en œuvre dans la pratique.

Le diagnostic permet ainsi de préciser certains attributs de l'outil à concevoir (Cerf et al., 2012). Pour sortir des réflexes de conception habituels, et explorer des concepts qui ne l'auraient pas été spontanément, le diagnostic doit permettre de formuler les concepts projecteurs à même d'aiguillonner

l'imagination : par exemple, en attribuant des propriétés surprenantes qui stimulent la créativité (Hatchuel & Weil, 2009 ; Agogué et al., 2013).

3.1.2. Les situations d'usage

L'analyse des pratiques agricoles et des systèmes de conseil a d  j montré les difficultés de l'usage du bilan prévisionnel en tant qu'outil d'aide à la décision (Jeuffroy et al., 1987 ; Cerf & Meynard, 1988 ; Felix & Reau, 1995). Mais ces études n'avaient pas l'objectif de déclencher un processus de conception innovante. Elles visaient à identifier des difficultés pour proposer des pistes d'amélioration des méthodes et outils existants (quels sont les termes qui posent problèmes aux utilisateurs ? Jeuffroy et al., 1987) ou du conseil à formuler (sur quels termes est-il important d'accompagner les utilisateurs ? Felix & Reau, 1995). Plus les situations d'usages étudiées sont diversifiées, plus le diagnostic est riche pour en tirer des enseignements pour la conception (Cerf & Meynard, 2006). Pour aller plus loin que les analyses précédentes et faire émerger, du diagnostic des usages, des concepts projecteurs, nous proposons de diversifier les situations d'usages analysées : au-delà des agriculteurs et des conseillers agricoles, les prescripteurs d'outils et les pouvoirs publics sont aussi des utilisateurs à prendre en compte dans le diagnostic des usages, puisqu'ils ont des r  les clés dans la diffusion du modèle de raisonnement de la fertilisation azotée.

Le diagnostic des usages doit permettre de décrire la manière dont les acteurs utilisent les outils ou méthodes actuellement disponibles pour alimenter leurs processus décisionnels concernant le raisonnement de la fertilisation azotée. Le diagnostic repose sur le recueil de trois types de données : 1) les problèmes que souhaitent traiter les acteurs, 2) les fonctions qu'ils attendent des outils et méthodes, et 3) les modes opératoires liés à l'utilisation des outils ou méthodes (Cerf & Meynard, 2006). Nous nous inspirerons des travaux sur le modèle d'action (Sebillotte & Soler, 1988) pour conduire l'enquête sur ce dernier aspect. Les entretiens de type semi-directif sont plus adaptés, car moins fermés que les enquêtes par questionnaire ou les entretiens directifs (Blanchet, 1991). De plus, en s'inspirant des méthodes d'explicitation des pratiques, l'entretien semi-directif permet d'utiliser la relance pour affiner la description des moyens mis en œuvre pour raisonner la fertilisation (Blanchet, 1991 ; Vermersch, 2011). L'affinement des hypothèses peut faire évoluer les questions, le guide contient des suggestions de questions permettant de maîtriser le déroulement de l'entretien (Blanchet, 1992). Le guide d'entretien (détaillé en Annexe) est structuré par des thématiques (Encadré 3) qui permettent de cadrer la description du modèle de raisonnement de la fertilisation azotée.

En parallèle de la description des modes de raisonnement, les fonctions du diagnostic imposent une description détaillée de l'usage prescrit. Effectivement, pour mettre en avant des usages déviants ou des décalages conceptuels, il est nécessaire d'avoir un modèle de référence auquel se comparer (Cerf & Meynard, 2006). Concernant la fertilisation azotée, nous avons vu que le cadre de raisonnement était largement structuré, d'une part, par le COMIFER et, d'autre part, par la réglementation. L'analyse des documents publiés par le COMIFER et les pouvoirs publics permettra de décrire le

modèle de raisonnement de la fertilisation azotée, ainsi que l'usage prescrit de la méthode du bilan. La prise en compte, dans le diagnostic, des informations issues de documents (de type : arrêtés préfectoraux, actes de colloques, littérature technique...) diversifie les sources d'information (origine et type de données) mobilisées pour l'analyse de l'usage, permettant de contre-vérifier des arguments (Vanloqueren & Baret, 2008).

Encadré 3. Les 5 thématiques abordées pour décrire la gestion de la fertilisation azotée en entretiens semi-directifs.

- Les moyens techniques mobilisés (outils de calcul, mesures, indicateurs sol et plante, données météorologiques, outil de pilotage) ;
- La capacité à prendre en compte les variabilités de type : aléa climatique, hétérogénéité des sols (à l'échelle de la parcelle et de l'exploitation agricole), effet année ;
- L'échelle de raisonnement (gestion en lots de parcelle, à la sole de blé, à la parcelle) ;
- Les contraintes qui conditionnent la gestion de l'azote (niveau de priorité des interventions de fertilisation azotée, les objectifs poursuivis) ;
- Les autres pratiques de l'itinéraire technique cultural qui sont liées à la gestion de l'azote.

3.2. Conception participative d'un prototype d'outil de fertilisation

3.2.1. Les ateliers KCP pour la conception innovante collective

La méthode KCP (pour Connaissances (K) – Concepts (C) – Proposition (P)) vise à organiser la mise en œuvre d'une démarche de conception innovante, appuyée sur la théorie C-K. Hatchuel et al. (2009) caractérisent cette exploration collective d'innovation par 4 dimensions. Ainsi, la méthode KCP :

- Explore finement le potentiel d'innovation pour un concept ;
- Suppose et supporte les acteurs dans un processus en rupture avec les règles habituelles ;
- Permet de mobiliser, d'acquérir et de produire des connaissances ;
- Assure l'adhésion collective aux nouvelles règles construites.

Cette méthode est particulièrement adaptée aux situations où l'on cherche à explorer des solutions innovantes en rupture avec l'existant. Elmquist & Segrestin (2009) confirment qu'elle permet de gérer des tâches différentes des processus de conception classiques : 1) identifier des connaissances manquantes, 2) régénérer les critères d'évaluation, et 3) construire des nouvelles stratégies de conception innovante (Le Masson et al., 2007). Une sortie centrale des ateliers KCP est l'identification, par le collectif d'acteurs, de « trous » de connaissances, c'est-à-dire de connaissances dont ils auraient besoin mais qui n'existent pas. La méthode KCP s'inscrit dans le régime de conception innovante, mais les connaissances nouvelles identifiées par ce processus pourront ensuite être produites dans un régime de conception réglée qui résultera du développement des capacités du concepteur (Elmquist & Segrestin, 2009).

Initialement issue des sciences de gestion et adaptée à des cas de conception industrielle, la méthode KCP a également déjà été appliquée dans des contextes d'innovation agricole (Berthet et al., 2016). La méthode KCP consiste à organiser des ateliers de conception participative regroupant une diversité d'acteurs, ayant des compétences différentes. Plus les compétences seront transversales et diversifiées, plus le processus d'exploration aura de chance d'être riche (Agogué et al., 2013). Le processus de conception est structuré en 3 phases :

La phase K est complètement dédiée au partage de connaissances dans le but d'ouvrir de nouvelles perspectives (Hatchuel et al., 2009). Cette phase doit nécessairement être multi-disciplinaire, elle repose sur le partage de connaissances détenues par différents acteurs (Elmquist & Segrestin, 2009).

La phase C est dédiée à l'exploration de concepts projecteurs (Hatchuel et al., 2009). Ce ne sont pas des propositions fermées mais plutôt des moyens de diriger l'exploration vers et dans l'inconnu (Hatchuel & Weil, 2009). La stimulation de la créativité est organisée selon des règles strictes (Elmquist & Segrestin, 2009) : les participants explorent en petits groupes un concept projecteur et les différents résultats sont présentés pour stimuler la créativité du collectif.

La phase P consiste à synthétiser les propositions issues des phases précédentes de façon à faire ressortir la stratégie de conception à envisager (Hatchuel et al., 2009). L'objectif est de construire une vision collective du problème et de clarifier les solutions, les projets de recherche, les nouveaux prototypes et les nouveaux partenariats à mettre en place. Cette phase prépare le collectif en lui apportant une vision globale des étapes de la démarche d'innovation à mettre en place, avec une clarification des contributions de chacun (Elmquist & Segrestin, 2009).

La mise en place d'un atelier KCP demande une préparation préalable (Berthet et al., 2016). Celle-ci concerne d'abord l'identification des participants à l'atelier. Contrairement à d'autres formes d'ateliers participatifs, le déroulement des ateliers KCP est très lié aux compétences des animateurs. Agogué et al. (2013) soulignent que, pour assurer la réussite d'un atelier KCP, il est nécessaire d'y associer au moins un acteur ayant une bonne expertise en conception innovante, surtout pour assurer l'animation de l'atelier. Berthet et al. (2016), qui comparent trois méthodes de conception innovante, mettent en avant que l'animateur joue un rôle crucial dans la réussite d'un atelier participatif, puisqu'il doit être capable d'identifier le potentiel d'exploration des propositions des participants durant les ateliers. Les auteurs soulignent que cela est d'autant plus vrai pour les ateliers KCP, où ils ont une marge de manœuvre dans l'interprétation des résultats. La préparation doit également porter sur l'élaboration de concepts projecteurs susceptibles de stimuler l'innovation, dans des directions jusque-là inexplorées (Berthet et al., 2016). Enfin, un travail sur les connaissances qui permettront d'alimenter la phase K est indispensable. Il faut sélectionner les connaissances qui permettront de déclencher des partitions expansives dans C et préparer leur présentation dans l'atelier (Hatchuel et al., 2009).

3.2.2. Des connaissances sous-valorisées par le paradigme de fertilisation actuel, qui pourront être mobilisées pour stimuler la créativité

Dans les ateliers KCP, le concept projecteur et une partie de son potentiel de stimulation de la conception innovante, permettant de débloquer les effets de fixation autour des concepts connus, sont liés à des connaissances existantes non mobilisées dans les processus de conception habituels (Le Masson et al., 2006 ; Le Masson et al., 2011). Certaines connaissances scientifiques existantes, non valorisées dans le paradigme actuel, peuvent être utilisées pour déclencher le processus d'exploration d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée. Ces connaissances ont fait l'objet de travaux de recherche scientifiques, mais leurs formalismes n'étaient pas en adéquation avec le paradigme actuel, lié à la méthode du bilan.

i. La relation entre efficacité d'utilisation des engrais et vitesse de croissance

La part d'engrais non utilisée par les plantes peut avoir des destins divers : lixiviation vers les eaux superficielles ou souterraines, émissions gazeuses vers l'air (volatilisation d'ammoniac, dénitrification sous forme N_2 ou N_2O), accumulation dans le stock de matière organique du sol ou organisation microbienne (Billen et al., 2013 ; Recous et al., 1997). Si une partie de ces pertes est inévitable (Recous et al., 1997), améliorer l'efficacité d'utilisation de l'engrais serait un moyen de protéger l'environnement contre les risques de fuites diverses (Delgado et al., 2001). Il est reconnu qu'un des enjeux de la maximisation de l'efficacité d'utilisation des engrais repose sur une meilleure synchronisation des apports avec les besoins instantanés de la plante (Campbell et al., 1995 ; Ladha et al., 2005). Limaux et al. (1999, 2001) ont mis en évidence une relation positive entre l'efficacité d'utilisation des engrais et la vitesse de croissance du peuplement végétal au moment de l'apport. Les apports tardifs sont ainsi mieux valorisés que les apports précoces au tallage. L'explication est que, plus la vitesse de croissance de la culture est élevée, plus la plante est compétitive par rapport aux autres devenir de l'azote (Limaux et al., 1999 ; Recous & Machet, 1999 ; Recous et al., 1997 ; Plas, 1992 ; Hébert, 1976). Pour limiter les risques d'apporter de l'engrais à un moment où la vitesse de croissance de la plante est faible, Limaux et al. (2001) recommandent de retarder les apports le plus possible. Dans cette perspective, l'indicateur « jaunissement de la bande double densité » (Limaux et al., 2001) permet d'accompagner le déclenchement du premier apport d'engrais azoté, au moment où l'azote du sol devient limitant. L'idée est qu'un couvert semé à double densité épuisera plus rapidement le stock d'azote disponible qu'un couvert semé à densité normale. Le principe est donc d'attendre l'entrée en carence d'une bande semée à double densité (BDD), qui s'observe visuellement par un jaunissement de celle-ci, pour déclencher l'apport sur la parcelle semée à densité normale. Le déclenchement de l'apport, calé sur l'observation de l'entrée en carence de la bande double densité, retarde les dates d'apport habituellement pratiquées, sans pour autant diminuer le rendement, voire même en améliorant les teneurs en protéine des grains (Limaux, 2002). Cette méthode prometteuse a été diffusée dans le cadre des opérations Ferti-Mieux pour mettre en œuvre des pratiques à même de réduire les pollutions des eaux. Cependant, beaucoup d'agriculteurs et de conseillers pensent que, si

l'engrais azoté n'est pas apporté suffisamment tôt, dès que la croissance végétative reprend, il y a un risque de perte de rendement, ce qui a conduit à une remise en cause de la fiabilité et du développement de cet outil. L'expérience montre que, sur le terrain, les apports sont souvent anticipés, par rapport à la décoloration de la bande double-densité (Limaux et al., 2001). Mais, dans les situations où la BDD est utilisée pour décider du déclenchement du 1^{er} apport, celui-ci a été retardé de parfois plus d'un mois dans certaines régions (Bouchard et al., 2006). Après ces travaux, il n'y a pas eu d'autre développement d'outil visant le décalage du premier apport en vue de mieux le positionner par rapport à la vitesse de croissance de la plante.

Ces travaux questionnent l'opportunité de proposer un nouvel outil d'aide à la décision permettant d'améliorer l'efficacité d'utilisation des engrais, notamment en début de cycle. Cet outil devra fournir un indicateur pertinent du point de vue des agriculteurs pour les rassurer dans la démarche de changement des pratiques de fertilisation azotée.

ii. La notion de carence tolérable

Le paradigme actuel de la fertilisation azotée repose sur le principe que de hauts rendements ne peuvent être atteints que si la nutrition minérale azotée est non limitante à tout moment du cycle (Hébert, 1976). Or, des travaux récents ont montré que certaines carences sont tolérables sans affecter le rendement des cultures, alors que d'autres sont effectivement préjudiciables (Jeuffroy & Bouchard, 1999, sur le blé; Colnenne et al., 2002, sur le colza). Le fait d'accepter des périodes de carence, quand celles-ci ne sont pas préjudiciables au rendement et à la qualité des grains, pourrait être un moyen d'améliorer l'efficacité de l'engrais : on pourrait réduire les doses d'engrais apportées (Meynard et al., 2002), et attendre que la vitesse de croissance soit élevée pour réaliser les apports (Limaux et al., 1999). Les travaux sur les carences en azote ont permis d'affiner le paramétrage des modèles de culture (Sadras & Lemaire, 2014; Lemaire & Gastal, 2009; David et al., 2004). Certains travaux ont amorcé la caractérisation de ces carences: par exemple Demotes-Mainard & Jeuffroy (2004) ont mis en avant qu'une carence faible avant floraison (jusqu'à un INN = 0.8) n'avait pas d'effet sur le nombre de grains par m². Jeuffroy & Bouchard (1999) indiquent que les plus grosses pertes de nombre de grains/m² sont observées pour des carences qui ne sont pas levées avant floraison. Par ailleurs, Jeuffroy & Bouchard (1999) montrent que l'effet des carences sur le blé dépend de la période du cycle durant laquelle elles interviennent, de leur intensité et de leur durée. Ainsi, ces auteurs caractérisent les carences avec un indicateur simple qui est le produit de l'intensité de la carence par sa durée, l'intensité de la carence étant caractérisée par l'INN minimum observé sur la période de carence, la durée de la carence calculée par la somme des degrés-jours entre la date d'entrée en carence et la date de sortie de la carence. Cet indicateur apparaît alors bien corrélé à la perte de nombre de grains observée (Jeuffroy et Bouchard, 1999).

3.2.3. La production de connaissances nouvelles induite par la conception innovante

La conception innovante conduit à identifier de nouvelles connaissances à produire (Hatchuel & Weil, 2009). Concernant l'activité de conception sur les thématiques agricoles, cela implique de renouveler et de diversifier les savoir-faire mobilisés, en s'ouvrant à de nouveaux champs de connaissances liés à la problématique. Par exemple, pour la conception de nouveaux systèmes agricoles, Meynard et al. (2012) proposent d'ouvrir la conception en agronomie aux champs de l'écologie, de l'analyse du risque ou encore de l'ergonomie. La combinaison de compétences diverses et transversales enrichit l'exploration, ce qui conduit souvent à identifier un besoin de nouvelles connaissances pour l'approfondissement du concept (Agogué et al., 2013). Une fois ces « trous » de connaissances identifiés, la production de nouvelles connaissances peut reposer sur (i) un travail bibliographique, (ii) la mobilisation de savoirs d'experts, ou (iii) un travail de recherche dédié. La nature des connaissances à produire étant inféodée à l'exploration faite, on ne peut pas prédire à l'avance la manière de s'y prendre. En lien avec l'intégration des usages dans la conception, les connaissances à produire auront un lien avec l'action et l'usage, ce qui pourra influencer leur nature. Selon la définition proposée par Geertsema et al. (2016), une connaissance actionnable, c'est-à-dire une connaissance pertinente pour décider ou mettre en œuvre une action, est dépendante du contexte dans lequel elle est produite et des objectifs poursuivis par les acteurs. La production par les chercheurs de connaissances actionnables repose sur un partenariat avec les acteurs concernés : il s'agit alors d'aboutir à l'élaboration de connaissances scientifiques, basées sur des faits et des théories scientifiques, pertinentes pour résoudre des problèmes spécifiques en lien avec les enjeux des acteurs.

3.2.4. Le prototypage assisté par modèle

L'utilisation de modèles de fonctionnement de cultures est une approche souvent privilégiée par les agronomes dans les démarches de conception (Bergez et al, 2010 ; Meynard et al., 2012). Cependant, il y a peu d'exemples qui montrent comment la modélisation peut être mobilisée dans des démarches de conception innovante qui intègrent les utilisateurs. Les démarches de conception de systèmes agricoles qui couplent prototypage et modélisation mettent en avant l'intérêt des modèles pour ne pas limiter le nombre de propositions explorées (Meynard et al., 2012 ; Rossing et al., 1997). En créant un « monde virtuel » dans lequel on peut mettre en œuvre et tester les effets de règles de décision, la modélisation est aussi un outil pertinent pour comprendre et explorer une situation problématique (Woodward et al., 2008). Utilisée dans des boucles d'amélioration, la modélisation permet d'évaluer rapidement les performances de propositions initiales et de simuler des changements dans ces propositions, visant à mieux respecter les critères attendus (i.e. production, marge, coût, travail, environnement...) (Meynard et al., 2012). La modélisation permet donc de présélectionner les propositions les plus pertinentes pour atteindre les objectifs souhaités et de les affiner avant de les tester de manière expérimentale. Dans le cadre de la conception innovante d'une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée, où les procédures de raisonnement sont appelées à une

profonde remise en cause, la modélisation permettra d'évaluer les effets potentiels des choix de conception sur l'efficacité d'utilisation de l'azote et les performances de la culture.

Dans un article de revue de la littérature sur l'utilisation des modèles dans les démarches de conception innovante de systèmes agricoles, Woodward et al. (2008) rappellent l'importance de prendre en compte dans la construction de règle de décision l'incertitude, notamment météorologique, et la variabilité de l'aversion au risque dans la prise de décision. Les modèles permettant de comparer des comportements dynamiques au regard de la variabilité climatique devraient améliorer la prise de décision (Romera et al., 2004). La valorisation des engrais azotés est très intimement liée aux conditions météorologiques, au moment de l'apport et dans les jours qui suivent. Cependant, la qualité de la prédiction météorologique, à la fois réelle et perçue par les agriculteurs est toujours un obstacle (Kusunose & Mahmood, 20016). Cela implique de gérer l'incertitude sur les conditions météorologiques dans la démarche de prototypage assistée par modèle pour proposer des règles de décision (RDD) ou des outils d'aide à la décision (OAD) robustes vis-à-vis de cette incertitude (Woodward et al., 2008). Cependant, la majorité des RDD et des OAD imposent de manière implicite un choix de niveau de risque, ce qui est le cas pour la méthode du bilan (Meynard, 1998), alors qu'il serait plus pertinent de laisser la possibilité aux utilisateurs de pouvoir comparer les effets de différentes alternatives et d'estimer le risque associée à chacune (Woodward et al., 2008). Dans la méthode du bilan, l'agriculteur n'a pas le choix d'une autre pondération du risque que celle proposé par l'agronome (Meynard, 1998). Or plusieurs études passées convergent sur l'idée que selon l'aversion au risque des agriculteurs, les stratégies optimum peuvent être complètement différentes (Woodward et al., 2008 ; Cacho et al., 1999 ; Rossing et al., 1994 ; Meynard, 1998). La modélisation des effets de stratégies de fertilisation sous différentes séries météorologiques est un moyen d'interpréter la robustesse des règles de décision au regard de l'incertitude météorologique, tout en ayant la possibilité de laisser à l'agriculteur le choix du niveau de risque.

Les modèles ont également un rôle de médiation entre les connaissances scientifiques et le développement (Meynard et al., 2012). Certains modèles permettent de formaliser des connaissances expertes et de les articuler avec des connaissances scientifiques (Sterk et al., 2007). Modéliser l'articulation entre les différents types de connaissances est un moyen de faciliter leur mobilisation conjointe dans le processus de conception. Les modèles peuvent ainsi être mobilisés pour vérifier la pertinence des règles de décision construites par des modes de raisonnement scientifiques par rapport aux raisonnements des utilisateurs.

Finalement, dans la conception collective, les modèles ont souvent pour rôle de faciliter le dialogue et le partage (McCown, 2002). Par exemple, Reau et al. (2012) montrent qu'animer les ateliers de conception de systèmes de culture en disposant des performances atteignables de nouvelles pratiques agricoles est un vecteur de communication entre les chercheurs et les utilisateurs. La simulation à partir de modèles numériques est un moyen d'animation des ateliers de la conception : simuler l'effet

des alternatives proposées (au cours d'un atelier, ou entre deux ateliers) permet de discuter collectivement la pertinence de ces alternatives. Ce rôle est également important dans des ateliers de conception de scénarios territoriaux, par exemple dans des aires d'alimentation de captage d'eau potable (Chantre et al., 2016).

3.3. Test d'usage du prototype

La démarche la plus fréquente pour développer un outil d'aide à la décision, est de le concevoir (travail qui est en général réalisé par d'autres personnes que les utilisateurs finaux), puis de le tester de manière expérimentale pour en évaluer les performances, et enfin, une fois l'outil stabilisé, de le diffuser auprès des agriculteurs. La méthode du bilan illustre bien les modalités classiques de transfert d'un modèle scientifique vers les utilisateurs. La diffusion de la méthode du bilan s'est opérée selon une approche descendante (« top-down »), à partir d'une définition du modèle issue de la recherche, puis une appropriation par les instituts techniques, et finalement des collaborations entre recherche, instituts techniques et développement pour expérimenter, paramétrer et stabiliser la méthode par rapport aux performances souhaitées. L'adaptation du modèle aux contraintes des utilisateurs s'est faite dans un second temps, et très progressivement, sous la forme de propositions de simplification locale du calcul, d'estimation de références locales pour certains postes, de proposition d'alternatives à la mesure du reliquat d'azote minéral de fin d'hiver, ou d'adjonction d'indicateurs de nutrition de la plante pour ajuster la dose en fin de cycle.

Cependant, cette démarche classique a souvent conduit à produire des outils peu utilisés (McCown, 2001, Prost et al., 2012). Ainsi, Toffolini et al. (2016), comparant les indicateurs conçus par des agronomes et les indicateurs que les agriculteurs utilisent pour concevoir de nouveaux systèmes de culture, invitent les agronomes à repenser les caractéristiques que devront avoir les nouveaux indicateurs qu'ils concevront. Comme le montrent Cerf et al. (2006), les usages des outils d'aide à la décision produits par la recherche peuvent différer notablement de ceux anticipés par les concepteurs. Cerf & Meynard (2006) proposent de mieux caractériser ces usages, en reconnaissant aux utilisateurs un statut dans le processus même de conception. Les travaux des ergonomes montrent en effet que la conception se poursuit dans l'usage (Béguin, 2003 ; Prost, 2008). En ce sens, la mise en situation d'un prototype d'outil d'aide à la décision est un moyen pertinent d'intégrer les utilisateurs dans le processus de conception. Le prototype peut alors être modifié, plus ou moins profondément, pour s'insérer facilement et être utile dans telle ou telle situation d'usage (Cerf et al., 2012). En agronomie, la co-construction et le test de prototype existent déjà, notamment sur la thématique de la conception de systèmes de culture (Vereijken, 1997 ; Mischler et al., 2009). Mais peu de travaux mettent en avant le rôle du test en situation d'usage dans la démarche de conception. On s'appuiera ici essentiellement sur les travaux de Cerf et al. (2012) et Prost (2008) qui proposent et expérimentent le test d'usage sur deux cas d'outils d'aide à la décision (l'un pour une meilleure maîtrise des traitements phytosanitaires contre le sclérotinia du colza, et l'autre pour affiner l'évaluation variétale du blé en fonction des

situations agronomiques). Le test d'usage comprend deux étapes indissociables : 1) la prise en main d'un prototype et sa mise en mouvement dans une situation d'usage ; 2) un débriefing sur l'utilisation du prototype.

3.3.1. Prise en main du prototype

La prise en main d'un prototype est une mise en mouvement d'un objet en conception qui permet aux utilisateurs de se projeter dans une situation qui pourrait être leur activité future (Prost, 2008). Cette mise en situation repose sur le fait que l'utilisateur, prenant des décisions relatives à sa propre situation, pourra formuler des propositions aux concepteurs, basées sur sa propre expérience de l'outil et sur la capacité de l'outil à résoudre les problèmes qu'il souhaitait pouvoir résoudre (Cerf et al., 2012). L'idée d'un test individuel dans sa propre situation d'usage est essentielle pour espérer un retour enrichissant pour améliorer et développer un prototype pertinent du point de vue des futurs utilisateurs (Prost, 2008). Pour le concepteur, c'est aussi une mise à l'épreuve des choix de conception (ibid.). Pour ce qui concerne les outils d'aide à la décision en agriculture : les agriculteurs ne sont pas les seuls usagers : Cerf & Meynard (2006) rappellent qu'il est essentiel d'intégrer les conseillers agricoles dans le test d'usage. Ces derniers utilisent en effet les outils, différemment des agriculteurs, puisqu'ils visent la production d'un conseil plus ou moins générique adapté aux situations rencontrées localement.

Suivant la méthodologie proposée par Cerf et al. (2012), le test débute par une présentation en collectif du principe de fonctionnement du prototype. La démarche qui a conduit à proposer ce prototype et les connaissances scientifiques mobilisées sont alors expliquées aux utilisateurs potentiels. Ce premier temps est aussi indispensable pour expliquer aux testeurs les enjeux du test qui reposent sur les processus cognitifs, opérationnels et fonctionnels qu'ils mettront en œuvre avec le prototype. Dans la mise en place d'un test d'un prototype en conception, la question de la plasticité (Prost, 2008) ou de la flexibilité (Cerf et al., 2012) du prototype se pose rapidement : Il s'agit de trouver le bon compromis entre un prototype suffisamment avancé pour que les utilisateurs puissent de l'approprier aisément s'il répond à leurs besoins, et un prototype suffisamment ouvert pour laisser place à la créativité des utilisateurs et ainsi révéler des usages non anticipés par le concepteur. Cerf et al (2012) insistent sur le fait que, dès lors que le suivi individuel tout au long du test n'est pas possible, il convient également de demander aux testeurs de noter ce qu'ils ont fait, les problèmes qu'ils ont rencontrés ou les erreurs commises. C'est à partir des éléments enregistrés et des souvenirs des utilisateurs que les discussions seront alimentées pendant le débriefing.

3.3.2. Débriefing sur l'usage du prototype

Il s'agit de permettre aux testeurs de décrire ce qu'ils ont fait avec le prototype. L'objectif d'un débriefing est de revenir, de préférence collectivement, sur les différentes manières dont a été utilisé le prototype, sur l'information qu'il a apportée et sur sa pertinence, les difficultés de mise en œuvre rencontrées et ses avantages (Cerf et al., 2012). Ce retour sur l'activité qui a eu lieu durant la phase de

prise en main est un moyen de provoquer la réflexivité (Pastré, 2005). D'après les retours d'expérience de Cerf et al. (2012) et de Prost (2008), c'est une phase essentielle pour créer un échange entre concepteur et utilisateurs, et permettre l'explicitation et le partage des différences de point de vue. Le débriefing vise à revenir sur ce que les testeurs ont fait avec l'outil et ce qu'ils auraient aimé pouvoir faire (Cerf et al., 2012). Ainsi, le concepteur peut mieux prendre en compte la manière dont les utilisateurs raisonnent leurs décisions et leurs actions pour l'amélioration de l'outil en conception. Les débriefings s'avèrent aussi des situations favorables pour construire conjointement des outils et leurs usages, ce sont des environnements d'apprentissage (Prost, 2008). Les utilisateurs discutent la manière dont l'utilisation du prototype a déjà fait évoluer leur compréhension du problème.

4. Organisation générale du manuscrit de thèse :

Comme annoncé au début du § 3, le travail de thèse s'est organisé autour de 3 étapes : 1) un diagnostic des usages des méthodes et outils existants ; 2) une exploration de nouveaux concepts, organisée lors d'ateliers de conception participatifs, de production de connaissances nouvelles et de la modélisation, débouchant sur la proposition d'un prototype de la nouvelle méthode de fertilisation; 3) un test d'usage du prototype par des agriculteurs et des conseillers agricoles. L'étape 2 est de loin celle qui a pris le plus de temps, et a nécessité de nombreux aller-retour entre conception et production de connaissances. Un plan en 3 chapitres, organisé strictement selon ces 3 étapes, aurait, selon nous, eu deux inconvénients : d'une part, un très grand déséquilibre entre les chapitres; d'autre part, une difficulté à montrer la cohérence d'une démarche d'ensemble, qui aurait été entrecoupée par de longs paragraphes sur l'acquisition des connaissances nouvelles nécessaires à la conception. C'est pourquoi nous avons choisi de présenter, après un diagnostic des usages (chapitre 1 des résultats) qui permet de resserrer le cadre de la conception, l'ensemble de la démarche de conception, incluant l'articulation entre conception et production des nouvelles connaissances nécessaires. Ce chapitre 2 des résultats vise à donner au lecteur une vision d'ensemble du travail réalisé. Nous détaillons ensuite, dans les 3 chapitres suivants, les connaissances produites en cours de conception et la mise au point du prototype (figure 3).

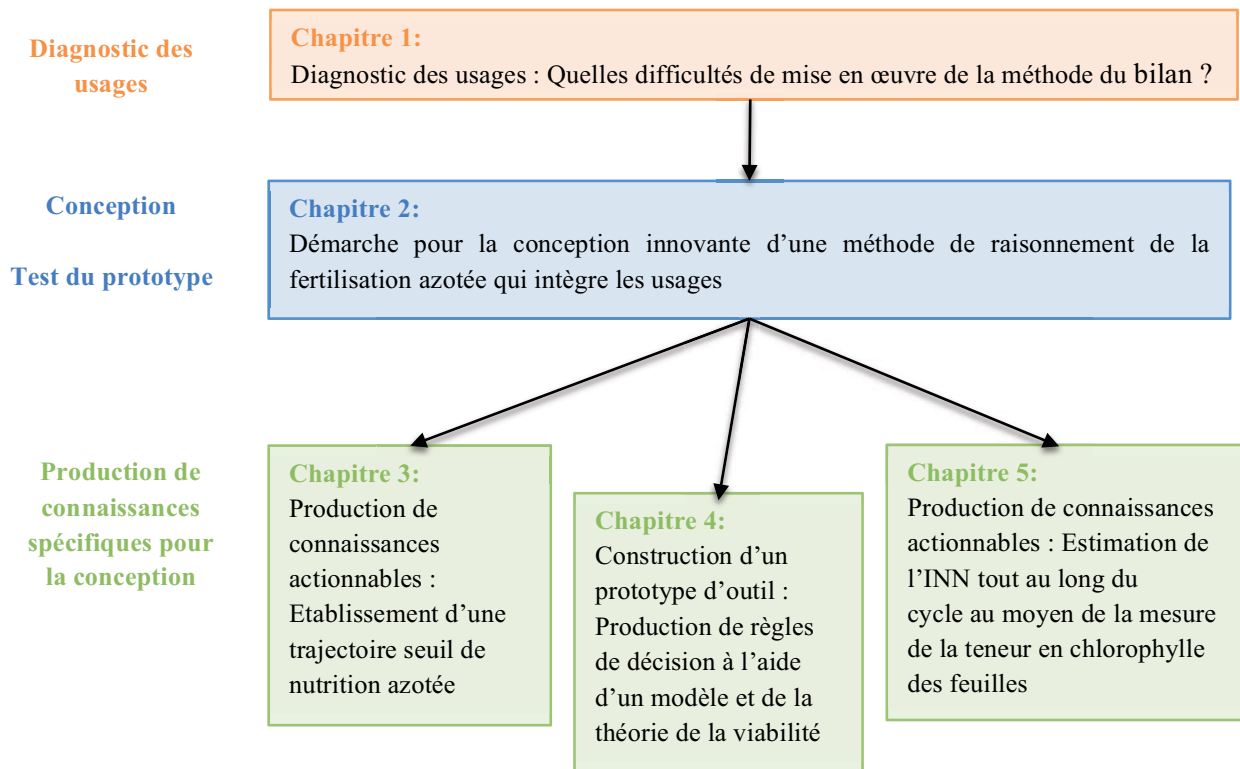


Fig. 3. Organisation des chapitres du manuscrit

Le chapitre 1 présente le diagnostic des usages de la méthode du bilan. Il porte sur l'analyse des controverses autour de la mise en œuvre réglementaire de cet outil, croisée avec des enquêtes auprès d'utilisateurs, dans le but de mettre en évidence les difficultés de mise en œuvre des méthodes et outils existants. Il vise à dresser les limites du paradigme dominant de raisonnement de la fertilisation, identifiant les situations d'usage dans lesquelles le modèle actuel pose problème à ses utilisateurs et les questions auxquelles il ne permet pas de répondre.

Le chapitre 2 présente la démarche de conception dans son ensemble, basée sur l'exploration des concepts projecteurs issus du diagnostic des usages. Les réflexions collectives autour de ces concepts qui ont eu lieu dans les ateliers de conception, structurés selon les principes des ateliers KCP, ont ouvert le champ des connaissances, en intégrant des connaissances existantes qui n'étaient pas valorisées dans le paradigme actuel de la fertilisation, et en faisant émerger de nouvelles connaissances à produire. A l'issue des ateliers, pour passer des idées générées collectivement à un prototype d'outil d'aide à la décision innovant, nous avons identifié des nouvelles connaissances à produire, dont la production sera détaillée dans les chapitres suivants. Le prototype de méthode de fertilisation mis au point est présenté. Ce chapitre se termine par le test de ce prototype, en situation, avec deux groupes d'agriculteurs.

Le chapitre 3 est dédié à un point central de la production de connaissances pour la conception : la définition d'une trajectoire d'indice de nutrition azotée minimum, intégrant des carences temporaires

non préjudiciables pour le rendement et la teneur en protéine. Jusque-là, les effets des carences ont été étudiés en vue de les quantifier dans des modèles. Dans ce chapitre, il s'agit de produire des connaissances sur les effets des carences, adaptées aux spécificités de la méthode de fertilisation en cours de conception. Ce travail sur la trajectoire d'INN illustre bien la différence de nature des connaissances produites dans la conception innovante, par rapport à celles habituellement produites par les agronomes, dans le paradigme de « comprendre ce qui existe » (Simon, 1969).

Le chapitre 4 présente l'utilisation du modèle de culture Azodyn pour construire, sur la base du concept issu des ateliers de conception, les règles de décisions nécessaires à la mise en œuvre du prototype de la méthode. Ce chapitre illustre le passage d'une connaissance théorique sur la trajectoire d'INN à un prototype opérationnel de méthode de fertilisation. Nous montrons comment la conception a conduit à un usage original du modèle Azodyn, en mobilisant la théorie de la viabilité pour proposer des règles de décision robustes au regard de l'incertitude sur les conditions météorologiques en cours de campagne.

Le chapitre 5 est consacré à une analyse de la corrélation entre l'INN et un outil de diagnostic basé sur la teneur en chlorophylle des feuilles. Pour les besoins du test d'usage, il était en effet nécessaire de trouver un moyen simple d'estimer l'état de nutrition azotée de la culture tout au long de la période située entre sortie hiver et floraison, avec un outil existant. Nous avons donc analysé la stabilité de la relation entre l'indice de nutrition azotée (indicateur privilégié pour suivre les carences) et des estimations indirectes de teneur en chlorophylle par un chlorophyll-meter. Malgré de nombreux travaux existants sur cette question, aucun ne répondait à notre objectif, et nous avons dû conduire une nouvelle analyse de comparaison de modèle de prédiction de l'INN pour proposer des règles d'interprétation d'une mesure de teneur en chlorophylle réalisée à n'importe quel moment de la période végétative du blé.

Dans la dernière partie de ce manuscrit, nous reviendrons d'abord sur la manière dont la méthode du bilan est ancrée dans le secteur agricole. Nous apporterons la vision d'un agronome sur les effets de fixation autour de la méthode du bilan, qui sont révélateurs d'un effet de verrouillage dans le raisonnement de la fertilisation azotée. Nous discuterons ensuite du changement de paradigme à proprement parler, en revenant de manière transversale sur les différences entre le raisonnement actuel et la manière de gérer la fertilisation azotée que nous proposons. Pour prendre du recul sur la démarche dans son ensemble, nous prendrons le temps de quelques paragraphes pour revenir sur l'originalité de la démarche de conception et les enseignements théoriques et méthodologiques que l'on peut tirer de notre expérience. Etant donné le cadre réglementaire dans lequel se positionne la gestion de la fertilisation azotée, nous discuterons, avant de conclure, le choix d'une réglementation d'obligation de moyens pour atteindre les objectifs environnementaux souhaités.

Chapitre I - Diagnostic des usages : Quelles difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan ?

Résultant d'un travail réalisé sur la première année du projet, ce chapitre vise à caractériser l'usage fait des outils et méthodes de raisonnement actuels et à mettre en avant les limites du paradigme actuel. L'enjeu est de tirer, de l'analyse des comportements des utilisateurs face aux outils et méthodes, des enseignements pour la conception d'une méthode alternative. Pour ce diagnostic, nous avons mobilisé deux dispositifs de recueil des informations : les documents officiels des « Groupes Régionaux d'Expertise Nitrate » (GREN) et des enquêtes avec des utilisateurs des méthodes et outils de raisonnement de la fertilisation azotée. Nous verrons que dans le cas du raisonnement de la fertilisation azotée, le recours à la méthode du bilan fait consensus, laissant peu de place à d'autres usages des méthodes et outils pour raisonner. Par contre, le diagnostic a montré de fortes controverses autour de la mise en œuvre de la méthode. Dans les trois quarts des GREN, il y a eu des débats concernant la fixation de l'objectif de rendement. L'analyse des pratiques nous montre qu'il est plutôt fixé comme un rendement désiré que comme une moyenne, mettant en avant qu'il n'y a pas de compréhension commune derrière le concept d'objectif de rendement. Bien que l'analyse de sol soit mise en avant par les scientifiques, dans la pratique, l'incertitude perçue autour de la procédure d'échantillonnage et les interprétations arbitraires qui peuvent en découler nous montrent que ce principe est finalement une source de doutes qui fragilise la fiabilité de l'estimation de la dose totale. Pour presque la moitié des conseillers agricoles interviewés et dans au moins 7 GREN ont retrouvé une controverse sur la mise en œuvre réglementaire de la méthode du bilan et les conséquences sur la perte d'alternatives, adaptées à des spécificités locales. Ce diagnostic des usages nous montre finalement que malgré la rigueur scientifique de la méthode et un consensus scientifique fort, la manière dont elle est mise en œuvre peut induire des sources d'erreurs dans le calcul des doses d'engrais. Malgré 40 ans de progrès, des points essentiels de la méthode sont toujours des obstacles à sa mise en œuvre. En partant de ces principes qui révèlent des difficultés d'usage nous proposons de formuler des concepts projecteurs qui nous permettront de démarrer le processus d'exploration de concepts innovant, en rupture avec le modèle actuel.

Ce travail a fait l'objet d'un article scientifique publié en 2016 dans la revue NJAS – Wageningen Journal of Life Sciences, 79, 31–40. doi:10.1016/j.njas.2016.10.001

Mismatch between a science-based decision tool and its use: the case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France.

Clémence Ravier ^{1,3*}, Marie-Hélène Jeuffroy ¹, Jean-Marc Meynard ²

¹ UMR211 Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

² UMR1048 SAD-APT, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

³ Arvalis-Institut-du-Végétal, Station expérimentale de la Jaillière, 44370 La Chapelle Saint-Sauveur, France

*Corresponding author: Clémence Ravier

Postal address: Campus de Grignon, Batiment EGER, UMR Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France

Email address: clemence.ravier@grignon.inra.fr

Abstract: For several decades in France, the balance-sheet method has been recommended and widely used to calculate N fertilizer rates. However, despite the scientific consensus on this method and its adoption as a regulatory tool, high N losses are still frequently occurring, suggesting limits in the implementation of this method. We assumed this consensus might hide discrepancies between some scientific concepts and the ways farmers use methods and tools. We combined a systematic analysis of official reports delivered by groups of experts (Nitrate Groups) from the 20 French regions concerned by the fifth reform of the Nitrate Directive, and interviews with experts, advisors and farmers. We identified principles of the method that reveal discrepancies between the theoretical model and its use, highlighting the gap between scientific concepts and their possible implementation. Here we show three frequent controversies that create uncertainties in calculating N fertilizer rates with the model. 75% of the Nitrate Groups debated about the estimation of the target yield, showing that there is no common understanding of the concept. In practice, farmers tend to fix the target yield as the value they desire more than the average value that can be reached in their fields. Although scientists emphasized the importance of measuring soil mineral content at the end of winter, sampling and uncertain extrapolation of the measurement lead to doubts and uncertainties, weakening the reliability of the N rates estimation. 45% of the interviewed advisors and seven Nitrate Groups put forward limits due to the regulatory implementation of the balance-sheet method, such as the reduced exploration of alternatives adapted to local specificities, or the prevention of an agronomical approach by an administrative one. These controversies among stakeholders showed that despite the rigor of the method and the scientific consensus on it, its implementation creates uncertainties, doubts and errors in the calculated N rates. Despite 40 years of agronomical and technological progress, major points of the method are still obstacles for its use. Considering these discrepancies between the model and its use, we suggest that, instead of persisting in improving incrementally each term of the balance-sheet method, we should switch to the innovative design of a completely new fertilizer calculation method, where users are taken into account from the beginning of the design process.

Key words: N fertilization. Target yield. Soil mineral nitrogen. European Nitrate Directive. Nutrient management. Diagnosis of uses.

1. Introduction

To improve farmer practices, part of an agronomist's activity is focused on the production of models and decision support systems [1]. However, there is often a contrast between the scientific principles of these models and tools and the ways users think or act [2-4]. Reducing the gap between scientific knowledge and practice is a challenge for the design and implementation of decision support systems, particularly when their use becomes mandatory through regulations [5].

In France, there has been consensus, for several decades, on the use of the balance-sheet method to calculate N fertilizer rates (Table 1), with the aim of reducing nitrate losses from agricultural activities toward groundwater. The balance-sheet method is one of the oldest agronomic science-based decision tools, and has been subject to intense and continuous effort to improve it over the years. The French National Institute for Agronomical Research developed this method about 40 years ago [6, 7] to rationalize N fertilizer management, which was, until then, mainly empirical. The model is based on a target yield to estimate crop N requirements and aims at adjusting N fertilizer rate to soil supply to meet these requirements [8]. Soil N supply is estimated through the assessment of soil mineral N content at the end of winter and it takes into account the net mineralization of soil organic matter and applied organic compounds. The use of the model is supposed to reduce N losses to the environment by avoiding fertilizer surpluses [9]. Technical institutes and advisory services have disseminated the method to farmers since 1978 [10]. Since its creation in 1980, the Comifer [French Committee for the Study and Development of Fertilization] has updated the “guidelines for local nitrogen fertilization instructions” to enhance its broad dissemination (Table 1). There have been many efforts to adapt the method and facilitate its use in various situations. For instance, studies carried out in Poitou-Charentes [11] and Lorraine [12] led to modifying the model and providing innovative ways of estimating some terms of the equation, especially the soil mineral N content at the end of winter ([8], see Table 1, Eq. (2)). The balance-sheet method is a rigorous model provided by scientists and accepted by consensus in the entire French agricultural sector. So far, making a provisional nutrient budget at the plot scale, based on the balance-sheet, has been part of the code of good agricultural practices in vulnerable zones in order to decrease nitrate leaching to groundwater: the latest reform of the Nitrate Directive in France put the balance-sheet method to the forefront of regulatory tools to guide and control calculation of N rates.

Our study was based on the hypothesis that, despite the consensus on the balance-sheet method, its implementation may limit the accuracy of the calculation of N rates. As suggested by Lecomte et al [13] and Cerf et al [1], studying the way existing methods and tools are used in various situations (it is what they call the “diagnosis of uses”) is helpful in identifying what should be modified to make

decision support tools more effective from the user's point of view. In this article, we provide the results of such a diagnosis carried out on the use of the balance-sheet method. On the basis of complementary sources of information, we explored the diversity of use and perception on this agronomic model. We emphasize that existing controversies concerning its parameterization and its use reveal weaknesses in the implementation of the method by users, leading to sources of uncertainty in the calculation of the N fertilizer rates.

Table 1. Operational presentation of the balance-sheet equation for winter wheat and a variant, the efficiency equation, without organic fertilizer (extract from the Comifer's guidelines [8])

	(1) Balance-sheet equation for wheat	(2) Efficiency equation
Equation	$X = (Pf - Pi) - (Mh + Mh_p + Mr + Mr_{ci} + Ri + N_{irr} - L - Rf)$ (1)	$X = (Pf - P0) / ANR$ (2)
Signification of the terms	X: N mineral fertilizer Pf: Total Plant N uptake (Pf = target yield (y) × N requirement per unit of production (b)) Pi: Plant N uptake before the end of winter (opening of the balance-sheet) Mh : Net mineralization of soil humus Mh_p : Net mineralization from grassland ploughing Mr : Net mineralization of crop residues Mr_{ci} : Net mineralization of catch crop residues Ri : N soil content at the end of winter (opening of the balance-sheet) N_{irr} : N from irrigation water L : Leached Nitrate after the opening of the balance-sheet Rf : N soil content at harvest (closure of the balance-sheet)	P0: N uptake of a crop without N fertilizer applied ANR: Apparent Nitrogen Recovery of N fertilizer
Practical recommendations for the measurement of the terms of the equation	Ri is measured (in February); the other terms are estimated from simple models whose inputs are available for farmers at the field level.	P0 and ANR are estimated from simple models whose inputs are available for farmers at the field level. These models are parameterized based on networks of non-fertilized plots [7].
Hypothesis of the equation	2 hypotheses [5]: (i) Atmospheric inputs (non-symbiotic fixation of atmospheric N and atmospheric N deposition) balance gaseous losses (from the soil and from fertilizer). (ii) Soil supply is an addition of different terms that can be estimated independently from each others.	Atmospheric inputs (non-symbiotic fixation of atmospheric N and atmospheric N deposition) balance gaseous losses (from the soil and from fertilizer)

2. Material and Methods

To investigate discrepancies between the model and the way it is implemented, the diagnosis of its use was based on complementary sources: a systematic analysis of official reports of the Nitrate Groups that aimed at standardizing the implementation of the method at a regional scale, and interviews with users of the method. Just as Vanloqueren and Baret [14] combined different sources to study technology adoption, we used complementary sources to crosscheck qualitative data from different sources and to enhance discrepancies between the science-based model and its use.

2.1. Analysis of the reports of the Regional Groups of Experts on Nitrate

From 2012, the balance-sheet method has become a regulatory tool to implement the Nitrate Directive in French territory, which required standardizing the method at a regional scale. This work was led by “Regional Groups of Experts on Nitrate” (Nitrate Groups), created in each of the twenty French regions concerned by the reform of the Nitrate Directive. Each group, bringing together various stakeholders representative of agricultural institutions, was missioned to define the equation of the balance-sheet to be used to calculate N rates over the entire region, and to agree on regional technical references for the equation parameters.

We analyzed reports of Nitrate Groups meetings as well as other deliverables, including prefectural decrees published in 2012 and updated in 2013. All documents were available through decentralized State services. We performed a systematic analysis of all the documents produced by the 20 Nitrate Groups. This analysis offered a large overview of how the model is used in different regions of France. For each group, we reported the proposals made for the equation and each term required for its parameterization on winter wheat. We decided to focus on this crop because the balance-sheet method was first developed and disseminated for winter wheat, and this is the most cultivated arable crop in France. Reports were a relevant source of information because, to produce the regional rules to calculate N rates, each stakeholder justified his choice of parameterization and way of calculating N rates. We thus identified the subjects of debates between experts and then compared the nature of debates between the 20 Nitrate Groups. We highlighted the subjects that regularly gave rise to debates and analyzed the controversies they reveal.

In addition to studying reports, we collected feedbacks from 21 experts from different Nitrate Groups and national representatives of cooperatives, technical institutes and research and education institutes. The members of regional groups interviewed were selected on the basis of the reports analysis. For instance, we interviewed experts from groups with lively debates and where discussions were closed by an exclusion of some ways of implementing the balance-sheet (i.e. Aquitaine, Bourgogne). We also focused on Nitrate Groups that provided alternative approaches, such as in the Provence group, where the implementation of the balance-sheet method is quite different from the national recommendations, or in Pays-de-la-Loire, where they placed the emphasis on models to estimate the soil mineral content at the end of winter, or in Lorraine, where they enhanced the efficiency equation and derived tools to estimate total N rates (Table 1, Eq.2).

2.2. Interviews with users on the way existing methods and tools are used

Interviews with farmers and advisors focused on the way the method is used to make decisions or recommendations [1]. These interviews focused on the users’ points of view to confirm that controversies are indicative of discrepancies between theory and uses. We held 42 semi-directed interviews with 25 farmers and 17 advisors in 5 regions chosen to explore diverse climatic and agricultural contexts. We used the “snowball sampling” method [15] to interview predominantly

stakeholders involved and interested in N fertilizer management rather than a statistically representative sample of stakeholders. First, advisors were chosen as belonging to the various organizations embodied in the Nitrate Groups. Then they were asked to recommend farmers who used the balance-sheet method to calculate their N fertilizer rates, and relevant stakeholders in their region regarding the issue considered. We focused the interviews on the management of N fertilizer on winter wheat and explored the way users dealt with the method. We first described N fertilization management or advice for wheat fields with common questions to all interviews. Then, the semi-directed interview framework made in-depth questions possible, with the aim of making explicit the criteria used to decide N fertilizer application as well as knowledge and resources useful to adapt and improve N fertilization from year to year. Interviews were transcribed, and we extracted the way actors implemented the balance-sheet method and set up its parameterization, and their difficulties and doubts concerning this implementation.

3. Results and discussion

The analysis of the reports showed that many subjects were sources of debate in the Nitrate Groups: plant requirement per unit of production (parameter b of Eq(1)), plant N uptake during winter (P_i), the method to quantify soil mineralization in spring (M_h), N from irrigation water (N_{irr}), N from organic fertilizer (X_a), the apparent N recovery of fertilizer (ANR) or the increase of the estimated rate when ureic fertilizer was used. Each of these questions was raised in only a small number of Nitrate Groups. The three controversies we focused on referred to difficulties of use highlighted through interviews with users and reinforced with Nitrate Groups reports and interviews. They disclosed a gap between the theoretical implementation of the model and its use. The first two controversies are related to terms of the balance-sheet to which the result is particularly sensitive, namely the target yield (y) and the soil mineral N content at the end of winter (R_i). The third controversy was about the influence of using the balance-sheet as a regulatory tool for the development of alternative fertilization methods and tools. Controversies are presented in light of all different sources.

3.1. Controversies about the target yield: “Expected yield” or “Desired yield”?

A standard rule to estimate the target yield was imposed with the reform of the national action program for the implementation of the Nitrate Directive “*The target yield will be calculated as the average of the yields produced on the farm for the crop considered, if possible for comparable conditions of soil, during the last five years, excluding the two extreme values*” [16]. As a government priority is to control pollution from agricultural activities, it aims to balance the risk of over-fertilization with under-fertilization. This rule is at the center of the controversy.

3.1.1. Debates about the standard rule

For 75% of Nitrate Groups, there was not unanimity on the fact that estimating the target yield with this rule is the most appropriate way to implement the balance-sheet method. Arguments were related

to the risk that its strict application would be detrimental to production, due to: (i) the risk of not achieving the highest yield, thus strengthening the trend of yield stagnation, (ii) the fact that insufficient N nutrition would not make it possible to reach required protein content, and (iii) the failure to benefit from genetic progress (Table 2). These arguments were also broached during interviews with experts from Nitrate Groups and with farmers and advisors (Table 2). During the interview with an expert, all these arguments were summarized in one quote: *“There are many situations in which the strict application of the rule would impact production. When water is a limiting factor, it has an impact on grain filling. However this constraint is not linked to N, it is linked to the climate. If we do not consider this bias when making the median, we will limit the target yield even in years without water stress. An adjustment of the rule is necessary to include an error due to climatic conditions, to other factors than N, and integrate genetic progress and protein in relation to market requirements. Otherwise the risk is that it will decrease N recommendations and, if there is an impact on yield, there will also be one on protein content”*. In some reports from Nitrate Groups, experts suggested shortening the rule or being more flexible so that farmers can estimate more easily their target yield. The difficulty in accessing the past records required to implement this rule was also highlighted by farmers (see “Implementation of the rule” in Table 2). Besides, in one Nitrate Group’s reports, it was noticed that this rule did not always prevent over-fertilization *“If we fix the target yield as the median of observed yields, the actual yield will be lower than the target one, one year out of two. One year out of two, we will have over-estimated fertilization regarding crop requirements”* (Pays-de-la-Loire).

3.1.2. Divergent perception of the target yield

Reports from the Nitrate Groups highlighted that not only was there no consensus as to the legitimacy of the rule but also that there was ambiguity as to the definition of the target yield. This ambiguity was revealed through the debates regarding the choice of default yield values. Indeed, if the five previous yields required for implementing the standard rule are not available, farmers have to refer to a regional value approved by the Nitrate Group. While most groups (13 out of 20) suggested considering regional average yields from the agricultural statistical national database Agreste to provide these references, there were lively discussions, in 7 Nitrate Groups, between stakeholders from authorities, who suggested adopting Agreste references, and agricultural organizations, who considered that references should be established from yields obtained in technical institute experiments (see “Default yield values” in Table 2). References from technical institutes, which benefit from a high level of expertise, were considered close to potential yields, whereas the choice of Agreste references remained within the logic of a target yield based on an average. This ambiguity in the definition of the target yield was clearly expressed by some farmers interviewed. Most farmers fixed the target as the yield they knew they could achieve, because they had reached it once or their neighbor had. For them, the target yield was more a potential yield than an average one (Table 2). During interviews with

advisors and experts from Nitrate Groups, it was emphasized that the target yield is a key point for accessing the estimation of N rates with the balance-sheet method (Table 2). The representation of the link between fertilization and production is induced by the formalism of the method, which suggests a perfect correlation between yields and crop N uptake.

3.1.3. Is a method based on the target yield concept suitable for estimating optimal N fertilizer rates?

Regarding farmers' uses of the balance-sheet method, already in 1988 [17], Cerf and Meynard emphasized that about a quarter of the users of the balance-sheet fixed higher yields than those achieved in previous years. From a broader perspective, it was recognized that farmers tended to overestimate the target yield. There are diverse reasons for this, such as (i) the wish that nitrogen deficiency should never limit yield, even in years favorable to unusually high yields [18], (ii) an insurance against uncertainties regarding year-to-year yield variability [19] or (iii) a response to low yield risk aversion [20, 21]. Difficulties in clearly defining the target yield and rationalizing its estimation have already been highlighted [22]. In France, since Meynard et al. [23] first showed that it was a major source of error in N rate estimation, many paths have been provided to rationalize the estimation of crop N requirements. For instance, Meynard and Limaux [24] or Limaux [12] suggested focusing on targeted grain numbers per square meter or crop growth, which is better correlated to wheat N requirements; it was also proposed to use dynamic simulation models to estimate crop requirements [24, 25, 26]. The current proposal is to make an average. Shanahan et al. [27] argued "averaging yield [...] may result in inadequate N for years when conditions provide better than average yield". This argument was along the same lines as what we found in the Nitrate Group reports. Furthermore Shanahan et al. [27] emphasized that averages did not overcome farmers' difficulties in fixing an accurate and realistic target yield, similar to what we demonstrated with the way farmers fixed their target yield. Forty years after the implementation of the balance-sheet method, despite many proposals to improve the estimation of the target yield, issues have not changed. From the analysis of combined sources of data, it appears that the target yield is still a critical point of the implementation of the model. The different ways the target yield can be defined, depending on stakeholders, make it difficult to achieve simultaneously various objectives (i.e. economic, socio-technical and environmental) with a fertilization method relying on this principle. Since there is no common understanding of the target yield, the concept seems to be an epistemological barrier to improving N fertilization practices and complying with water quality objectives.

Table 2. Extracts from all sources of data (Nitrate Groups' reports, interviews with Nitrate Group members and interviews with farmers and advisors) demonstrating the controversy about the target yield.

	Extracts from reports of Nitrate Groups	Extracts from interviews		
		Nitrate Groups' members	Farmers	Advisors
Yield stagnation	"A target yield estimated with the rule could, in the case of favorable climatic years, prevent the expression of the potential production by N limitation. Gradually, the rule leads to a downward trend in yields and is detrimental to the most productive varieties" (Rhône-Alpes) "They [Nitrate Group members] also point out that if the yields are lower than those obtained with current fertilization practices; it may lead to an irreversible decrease of target and obtained yields, especially after successive unfavorable years" (Centre) "[Using the standard rule] risks creating a downward spiral. If there are five years with low yields, it will have a lower N rate and therefore a low yield and so on" (Champagne-Ardenne)	"We often talk about stagnating yield, and with the standard we are not going to improve the situation" (Bourgogne)	"With the rule, there are risks of stagnating yield" (Normandie) "Today, it happens that targeted yields calculated with the rule are lower than the potentialities of the plot, there is a risk to lower plot potentialities" (Bourgogne)	"Farmers say that fixing yield goals with the five previous yield is going to tend to lower yields, especially in favorable year" (Normandie)
Grain protein	"Experts from economic organization have expressed a desire that especially for cereals, the target yield also takes into account the quality requirements (especially the protein contents) required for both domestic market and export" (Picardie)			
Genetic progress	"The majority of Nitrate Group members maintain that this method annuls the gains of genetic progress" (Centre). "The group emphasizes the imprecision of such a method of calculation which does not take into account either genetic progress or diverse heterogeneities (varieties, plot, crop rotation)" (Auvergne)	"The problem is that it does not take genetic progress into account" (Bourgogne) "The standard limits the expression of genetic progress and for the most productive varieties, the N rate is not sufficient to express the potential" (Bourgogne)	"[With the rule] we do not include genetic progress" (Normandie)	
Implementation of the rule	"The Groups' members suggested shortening the national rules to 3 years" (Normandie) "Be more flexible with 1 year more or less" (Languedoc-Roussillon, Picardie, Poitou-Charentes)	"It is difficult to access the yield for each plot, it would required precise equipment" (Bourgogne)	"In practice it is difficult to have the yield of each plot" (Bourgogne) "My target yield is 8 tons, which is the average for the entire surface in wheat [...] my crop rotations are too long to have the references over 5 years for each plot" (Normandie).	
Default yield values	"Professional bodies argue that the determination of low default values [...] would decrease production potential in the region"; "organizer and water agency consider that these [yields from technical institutes] correspond to yield potentials that are rarely achieved, which leads to the risk of over-fertilization" (Poitou-Charentes) "Several members are nevertheless in disagreement with the use of the values produced by agricultural statistics which are only averages and judged to be 10% lower than the reality" (Centre)	"The values produce by agricultural statistics are lower than those from divers technical institutes and experts. The administration aimed at lowering yield to achieve lower N rates, they do not believe that 8 t.ha-1 is possible in the region, they tend to lower the target yield" (Bourgogne) "Professional organism tend to over estimate by default values, they argued that it should be an expected yield" (Bourgogne)		
Ways farmers fixed the target yield		"There is a true issue concerning the fixation of the target yield, it is no longer an objective, now it is only what we are sure to achieve on the farm [...] the rule is too restrictive" (Bourgogne)	"My yields are around 7 to 8 t.ha⁻¹, 9 for some plots [...], I often use 9 [as target yield], I already did it" (Normandie) "My average yield is about 6 t.ha⁻¹, but I did not take that on my "provisional fertilization plan" I took 8 for the target yield [...] 9 would be exaggerated, but 8.5 is in the average" (Normandie) "My target yield is an average value for a group of plots and it is equivalent to the expected yield, the one of good years" (Provence) "I take 10 t.ha⁻¹ where I know I can do it" (Bourgogne)	"The problem between target and average yield mainly concerns farm with small average yield, they tend to exaggerate target yield. There is a fear to miss yield, putting too much nitrogen do not worry them, however missing the good year is a problem" (Normandie) "Farmers are entrepreneurs, we cannot ask people to reason this logic to target an average result" (Bretagne)
The target yield, a key point to calculate N rate		"The key point access of the balance-sheet method is the target yield" (Pays-de-la-Loire) "Target yield is a key point of access to estimate N rates, if we do not agree on it, the entire file is false" (Bretagne)		"Nitrogen is promptly questioned when expected yields are not achieved" (Normandie)

3.2. Controversies around the measurement of the residual soil mineral N at the end of winter

Within the reinforcement of the regulation, obligatory soil analyses per farm were mandated [16]. The balance-sheet equation requires the value of soil mineral N content at the end of winter (R_i), known to vary considerably among fields and across years. To estimate it in each situation, advantage was given to a soil analysis. However, only 8 Nitrate Groups put forward the measurement of R_i ($R_{i_{\text{meas}}}$) as a compulsory soil analysis for the implementation of the balance-sheet method. From arguments held by the other 12 groups that did not require $R_{i_{\text{meas}}}$, and from interviews, we investigated how technical uncertainties and perceptions of uncertainties about the measurement of the R_i brought doubts about these data.

3.2.1. Uncertainties and doubts about the measurement, interpretation and extrapolation of the residual soil mineral N at the end of winter

Even though soil analysis should give reliable information, it is often perceived as imprecise, for several reasons. First, ensuring the reliability of this measurement requires clarifying the procedure including sampling depth, sample storage conditions, quality and capacity of the laboratory. The necessity of standardizing this procedure was discussed in several Nitrate Group reports. During interviews, experts clearly expressed risks due to sampling procedure (Table 3). The perception of lack of precision of the measurement, because of uncertainties on sampling procedure, led farmers to arbitrary corrections such as using a lower value than the one measured in the soil analysis, in particular conditions corresponding to high ammonium soil content values or very high values of residual soil mineral N. These corrections led to increasing the N rate (Table 3).

Secondly, not only the technical procedure, but also the choice of the sampling zone and the extrapolation of the measurement brought uncertainties about the soil analysis. As fields are often heterogeneous, regarding soil depth or texture, it called into question the relevance of translating a single value to an entire field and thus, the accuracy of the soil analysis (Table 3). In addition, theoretically, the analysis is usable only for the plot where it was carried out, but conducting soil analysis on the entire farm is not feasible for many reasons (e.g. the cost of the analysis which is not motivational, the high number of plots, the arduous procedure involved). Interviews showed that, in practice, farmers extrapolate measurements from one plot to another, yet without a clear procedure. From our sample, some farmers carried out one analysis per previous crop, per couple of previous crops and soil types, or for each soil type, and extrapolated measurement depending on what they considered to be “similar plots” (see “Sampling zone and extrapolation” in Table 3).

Table 3. Extracts from all sources of data demonstrating the controversy on the soil analysis to estimate R_i .

	Extracts from reports of Nitrate Groups	Extracts from interviews		
		Nitrate Groups' members	Farmers	Advisors
Sampling procedure	"In case of a value of ammonium higher than 20 kg.ha ⁻¹ , an agronomical diagnosis must be made to check the relevancy of the measurement" (Normandie)	"We know that results vary between fresh and frozen sampling" (Bourgogne)	"Usually ammonium is fleeting, so should we take it into account? We made our decisions according to the plot" (Normandie) "I carry out many measurements. After, I interpret the result by myself, I tell myself that here the found 100 kg.ha ⁻¹ , but...I am not sure" (Normandie) "I carry out soil analysis but often I wonder if I can rely on the measurement" (Bourgogne)	"In the case of substantial value of R_i higher than 70 kg.ha ⁻¹ , we do not take it, we prefer to take an average, an annual trend" (Normandie) "The problem with this soil analysis is that there are many conditions to fulfill to have a measurement that is reliable, it makes it obsolete" (Bretagne) "Some sampling procedures produce ammonium: By comparing methods, we saw, for similar situations, that in some cases there is ammonium and in others there is not. Consequently we fixed that 10 kg.ha ⁻¹ of ammonium was an artifact due to the sampling method" (Normandie)
Sampling zone and extrapolation		"Regulations go in the wrong direction by imposing this soil analysis, how much measurements are imperative per farm? One. And how many plots per farm? Here, it is forty-five on average. What should I do on the others? I make some empiricism; I extrapolate the measurement with an enormous risk" (Pays-de-Loire)	"I carry out one measurement for a group of fields" (Bourgogne) "I carry out one soil analysis per preceding crop and soil type, then I extrapolate to similar fields" (Provence) "The measurement of R_i is about one per preceding crop [...]. It gives me an idea of the trend. Then I extrapolate the estimated N rate to other plots by adjusting to the soil potential" (Normandie) "I do not measure it for each plot so I look at the references of my area and I see if I am in the range" (Normandie)	"How do I sample in my field to be able to use a model that has been defined at the micro-plot scale? So the problem is with sampling and with representativeness, how do I bring a heterogeneous surface to a single piece of information supposed to be representative?" (Centre)
Regional references and models		"With the model, I calculate my R_i for 250000 ha in one run. I do not need a thousand people to carry out soil sampling" (Pays-de-Loire) "In Poitou-Charentes or Pays-de-La-Loire, soil analysis are carried out on less than 1% of the agricultural land; so basing the Nitrates Directive on these soil analyses is not going to work well" (Pays-de-la-Loire)	"For R_i , if I do not have an analysis, I take local data provided by the Chambre d'Agriculture or those given in the monitoring tool Farmstar®" (Normandie) "[...] for the other plot, I keep the R_i estimated by Epiclès®" (Normandie) "I try to carry out soil analysis per previous crop but the measurement is valuable just on this plot; for the other, I use the regional value" (Provence)	"They carry out the analysis to establish the average, and took the average, is that wrong?" (Normandie)

Alternatives to soil analysis, such as regional references and models, have been developed to estimate R_i and overcome practical issues related to the measurement (Table 3). Farmers did use them (Table 3). However, they sometimes presented limits. For instance, in all regions, agricultural bodies should collect soil analysis and publish regional average values of R_i . Yet, not all regions are already organized and in some, average values result from few samples with a wide range of variation. Table 4 illustrates average values of R_i based on only 8 samples, which could differ by 50 kg N ha⁻¹, discrediting the average. Averages could be an alternative to soil analysis, if the sampling network is wide enough to provide relevant values for all the cropping situations.

Table 4. Extracted from the regional references of R_i for cereal crop (managed without organic manure) distributed by the Chambre d'Agriculture Indre et Loire in 2013.

Preceding crop	Soil type	Average R_i (kg.N.ha ⁻¹)	Extremes (kg N.ha ⁻¹)	Number of measures
Cereals	Silt	25	14-82	21
	Limestone	45	16-66	8
Maize	Silt	34	9-62	12
	Limestone	33	27-91	24

3.2.2. The Ri_{meas} : an old-fashioned way of implementing the balance-sheet method?

We highlighted that soil analysis, which is a scientific method, does not suit some practices or practical constraints. The inability to carry out measurement of Ri for each plot revealed the discrepancy between the theoretical implementation of the model, which suggests one soil analysis per plot, and the practice with measurements carried out only on selected plots and extrapolated to others. Even though technical knowledge and references on sampling procedures did exist, the inherent variability of the soil analysis [28] is a source of doubts and uncertainties that opens the door to arbitrary corrections and errors. However, there is a contrast between the soil analysis that is a precise, scientific and objective measurement, enabling account to be taken of variations in soil mineral content from site to site [29], and the inaccuracy it may have in practice [18]. Again, there is a gap between a scientific concept and what is or can be achieved in practice [5].

Using average regional value was a means to overcome these difficulties. However, as pointed out by Meynard et al. [30], creating these regional references requires precise organization: to be reliable, references should be as exhaustive as possible to cover most situations (combinations of soil types and previous crops) and should gather as many analyses as possible to make the average representative. Yet, only a few regions coordinated a sampling network of Ri measurements, with a homogenized procedure, and organized the collection and publication of results based on a reliable number of measurements.

Modeling Ri seems interesting and a more promising approach to using the balance-sheet method regarding practical constraints. We saw that, in situations without measurement, some farmers used simulations rather than extrapolated measurements (see “Regional references and models” in Table 3). However, only one quarter of the Nitrate Groups suggested using simulated Ri . The slow progress regarding the modeling can partly be explained by the predominance of the soil analysis, promptly recommended by the Comifer “*The appeal to such models can be a solution to estimate the term Ri in situations where the measurement is not easy or in case of missing regional references, preventing the extrapolation of some measurements to the entire cultural situations*” [9].

Finally, while the balance-sheet method had benefited from 40 years of research and effort to improve it, we made poor progress on the estimation of Ri . There are still doubts and uncertainties linked to the soil analysis and uncertain extrapolation of the measurement, weakening the estimation of the N rates. In most regions and for most situations, there are neither locally adapted models nor reliable references. While the soil analysis should theoretically improve the accuracy, in practice it hampers the improvement of N fertilization practices.

3.3. Controversies between the regulatory standardization of the method and adaptation to the diversity of agricultural conditions

3.3.1. Debates on the equation to estimate N fertilizer rates

Within 16 regions, only one equation of the balance-sheet was considered, either Eqs. (1) and (2) (Table 1). The 4 remaining regions outlined the interest of an intra-regional diversity on the way of estimating N rates. One validated both Eqs. (1) and (2) to estimate N rates without visible debate. In the other three regions, there were debates concerning the equations (Table 5). In Centre and Poitou-Charentes, since Plas' studies [11], the efficiency Eq. 2 has been introduced into the recommendation for rendzinas and acid brunisols soils. In Poitou-Charentes, there were lively discussions, which concluded by retaining both ways of estimating N rate (Table 5). As the efficiency equation was historically implemented for specific soil types, supported by existing tools and experimental networks set up to estimate soil N supply (P0), both regions finally retained both equations, the efficiency one being recommended for these soil types.

Concerning the Bourgogne region, the efficiency equation was first accepted for maize only (prefectural decree of 2012), and finally removed from recommendations (prefectural decree of 2013). The interviews carried out with the Nitrate Group members demonstrated that this choice was a source of lively debates, and was perceived as unjustified, as this equation was accepted in nearby regions (Table 5).

3.3.2. Debates on local tools

In some regions, despite the willingness to standardize the implementation of the method based on National recommendations, local tools, derived from the adaptation of the balance-sheet method to local constraints, were retained. Interviews with Nitrate Group members highlighted the case of the “LOR’N” strip from the Lorraine region, which is a simplified tool derived from the efficiency equation relevant to overcome difficulties in estimating N soil supply with soil analysis. Other members mentioned the “Simpl’N” tool in the Provence region, based on formalism quite different from the National recommendation, but relevant regarding practices and adaptation to climate conditions with frequent dry periods. Even though all the actors might not use these alternative tools, it was accepted by the prefectural decree as soon as experts agreed on the underlying method and justified its local relevance (Table 5). Yet, in some regions, standardization led to excluding local tools whatever their usefulness and relevance in practice (Table 5). Interviews with advisors in the Bretagne region provided the example of the “DiscN” tool. This tool, designed by the Chambre d’Agriculture of Bretagne, was intended for livestock farmers and only included the most relevant terms of the balance-sheet method regarding livestock farming: manure applications, target yield, meadow management and Ri. Likewise, the analysis of the report of the Aquitaine region Nitrate Group gave an example of how regulation led to losing a locally adapted diversity of tools. In this region, advisors used to have two frames of references: a classic one, which refines fertilization by

using precisely all the balance-sheet terms, and a “simplified” one, easier to implement and to control (Table 5). The choice of the method was adapted to the level of farmers’ technical skills. However, the ministry refused to keep both frames of references (Table 5). In both cases, the willingness to standardize the estimation of N rates and to match with the science-based model led to excluding alternative ways of calculating N rates, shown to be better adapted to local specificities.

Table 5. Extracts from Nitrate Groups’ reports and interviews with Nitrate Group members demonstrating the controversy on the diversity of equation and tools to implement the balance-sheet method.

	Extracts from the Nitrate Groups reports	Extracts from interviews with Nitrate Groups' members
Regional inequality concerning choice of the equation.	“One member of the group [...] proposed the choice of the efficiency equation used by the Chambre d’Agriculture of Vienne department with ANR to take account of mineral N losses. This proposal was the subject of debates between [Nitrate Group]’ members during which it was emphasized that this method had been calibrated on rendzinas and brunisols soils, but not on other soil types. The majority of the members preferred equation [1] [...]. Finally, the group admitted that the efficiency equation [2] could be used on rendzinas and brunisols soils with the parameterization provided by the Chambre d’Agriculture of Vienne” (Poitou Charente) “The [Nitrate Group] retained the simplified balance-sheet equation [1] following Comifer’s recommendation, which is the most widely disseminated equation. [...] For the specific case of stony soils, the estimation of Ri given by SCAN software is accepted” (Centre)	“For maize fertilization, they [the advisors] preferred the efficiency equation to the classic balance-sheet, however, the problem is that with the balance-sheet, each term is expressed under the process within which we take losses into account. With the efficiency equation, we consider a fraction of the losses but we do not know where they are. By making some calculations to compare both equations, a priori, with the efficiency equation we have a margin of 20 kg that is unjustified” (Bourgogne) “Another debate was about ANR, more for maize than other cereals. We used to apply the efficiency equation on stony soil as in Champagne and Lorraine” (Bourgogne)
Regional inequality concerning tools	“The “simplified frame of references” is the minimum compulsory requirement to calculate the balance of nitrogen fertilization [...] It should enable farmers to be autonomous when drawing up their provisional N plan” (Aquitaine) “The “classic frame of references” can be used to refine the estimation of the calculation of optimal N rates, [...] to give recommendations on the basis of the most accurate and detailed methods and references” (Aquitaine) “After having ask, at a national level [to Ministry], the possibility of keeping two frame of references, it was answered negatively ” (Aquitaine)	“Indeed, [Nitrate Group] work happened in a rather constructive atmosphere, which allowed a consensus to be reached on the way to implement the balance-sheet method in the region. The historical work of the Chambre d’Agriculture to set up the efficiency equation is definitely the explanation for this functioning. Cooperatives do not necessarily use the LOR’N strip but the references are partly similar in their former PPF software” (Lorraine)

3.3.3. The paradox between standardization and adaptation to uses

Regulation led to standardizing the balance-sheet method at the regional level. The estimation of N fertilizer rates has become a formal procedure that should be controllable. The preceding examples showed a tension between the desired standardization and the preservation of a diversity of ways of adapting fertilization to agricultural situations. We have shown that depending on the region and on the constraints, such diversity may be justified. The debate between standardization and diversity involved the different stakeholders of the Nitrate Groups, within which public authorities took sides. The example from the Aquitaine Nitrate Group, where, despite the better adaptation of the ‘simplified’ method to some users, they finally agreed on keeping the frame of references based on the classic balance-sheet, thus illustrating the paradox between standardized formalization and adaptation to use. As shown by Passioura [31], increasing the number of parameters in a model for action, as in the classic method, is not a guarantee of increasing precision. Indeed, the higher complexity of a model, argued by the researchers, may simply not be adapted to practical use [4], and may thus lead to decreasing its accuracy.

Likewise, debates concerning the implementation of the Nitrate Directive in the Netherlands put forward issues related to the standardization of fertilization management method and tools. The example of the MINAS (MiNeral Accounting System) illustrates how regulation has led to excluding

some alternative methods of managing N fertilization [32]. This indicator of nutrient surplus, calculated at farm level, was a “goal-oriented tool” that aimed at supporting farmers’ N management with flexibility regarding their situations and their objectives. Depending on the amount of N removed from the crop, livestock density, import of feed and manure exchange, the tool calculated an N budget at the farm level, as well as estimated the maximum amount of mineral fertilizer allowed for the whole farm. Then the farmer freely distributed this amount among his fields. He was required to respect a rough equilibrium between N fertilizer quantity and crop N output, but the tool did not specify per-field application rates [33]. However, the Nitrate Directive required the field-scale specification of N rates based on a balance between N crop requirements and N supply from soil and fertilizer. MINAS was thus excluded from the regulation and replaced by crop-specific application rates. According to Schröder and Neeteson [33], standard rates might hamper flexibility in adapting N fertilizer strategies to a specific situation.

These examples illustrate the tension between a uniform regulation and the initiative to implement innovative N fertilization management tools [34]. Imposing tools or methods through regulation and staying within the framework of existing regulation tools could limit exploration of alternatives and innovative decision support tools, better adapted to local conditions [35]. To achieve simultaneously environmental and economic objectives, there is a need for innovative design to explore new paradigms [14]. Stakeholders such as farmers, extension services, policy makers and scientists should be encouraged to work together in joint-learning approaches, to move from standardized regulations to individual management systems better adapted to local conditions [36].

4. Conclusion

Despite the science-based rigor of the balance-sheet method and the scientific consensus on it, its implementation creates uncertainties, doubts and errors, underlining its limits for operational use. On the basis of three controversies, we showed a mismatch between theory and use. Until now, efforts to improve the estimation of N rates mainly focused on refining each term of the balance-sheet method (soil N mineralization, N from organic manure...). It would be possible to continue to gradually improve this method, by including new knowledge in the decision support tools. However, we have shown that, despite 40 years of agronomical and technological progress, major points of the method are still obstacles for its use. The target yield is a hindrance to improving N fertilizer management, since there is no common understanding of the concept. The soil analysis to estimate R_i reveals a practical problem, based on doubts on the measurement, and alternatives provided to estimate R_i are poorly spread out. Finally, alternatives to facilitate user appropriation of a method to estimate N rates are now narrowed by the regulation.

Standardization then appears as an obstacle to innovation. We think that it is essential to look beyond the current paradigm and call into question the principles of the method that failed to be appropriated

by users. We suggest reviewing the established knowledge about N fertilization by considering both scientific progress from the past 40 years and knowledge on farmers' ways of making decisions, including feedbacks from the interviews carried out. Issues related to tool appropriation are often explained by the contrast between the models and the ways farmers use them [1, 5]. A method for N fertilizer management based on a top-down diffusion strategy, however rigorous it might be, involves a risk of being poorly adopted. To develop a more effective method that could simultaneously handle environmental and economic objectives, we started a participatory design, revisiting the basic principles of current tools. Both agents from extension services and scientists were gathered in participatory workshops, and designed the principles of a fertilization method based on in-season monitoring of crop N status. To improve nitrogen use efficiency and reduce N rates while maintaining yield, we valued knowledge on non-detrimental N deficiencies [37]. Tolerating a period of N deficiency makes it possible for the crop to absorb the available soil mineral N before applying fertilizer. Doing so, N application starts when soil N is limiting, before N stress becomes prejudicial to crop performance. N rates are then adjusted on instantaneous crop nitrogen nutrition. Thus, neither target yield nor soil analysis are necessary.

Acknowledgements

We thank all the stakeholders who participated in interviews. We thank Arvalis-Institut-du-végétal, and the ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie) for funding. This study was part of the REACCTIF project. We thank Jane Curtis-Williams for reviewing the English.

References

- [1] Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., Meynard, J.-M., 2012. Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 899–910. doi:10.1007/s13593-012-0091-z
- [2] Prost, L., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., 2012. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 581–594. doi:10.1007/s13593-011-0059-4
- [3] Cerf, M., Meynard, J.-M., 2006. Les outils de pilotage des cultures: diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception. *Natures Sciences Sociétés* 14, 19–29. doi:10.1051/nss:2006004
- [4] R.L. McCown, Learning to bridge the gap between science-based decision support and the practice of farming: Evolution in paradigms of model-based research and intervention from design to dialogue. *Aust J Agric Res* 52 (2001), pp 549-57. doi: 10.1071/AR00119
- [5] Bouma, J., van Altvorst, A. C., Eweg, R., P. J. A. M. Smeets, P.J.A.M., van Latesteijn H.C., 2011. C0055 The Role of Knowledge When Studying Innovation and the Associated Wicked Sustainability Problems in Agriculture. *Advances in Agronomy* 113, 285-315
- [6] Hébert, J., 1969. La fumure azotée du blé. *Bulletin Technique d'Information* 244, 755-766.
- [7] Rémy, J.-C., Hébert, J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *CR Acad. Agric. Fr.* 63, 700-710
- [8] Meynard, J.-M., Justes, E., Machet, J.-M., Recous, S., 1997. Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champs. In: INRA (ed) *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes, Les colloques*, Reims, 183-200
- [9] COMIFER, 2013. Calcul de la fertilisation azote. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies.

http://www.comifer.asso.fr/images/stories/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf

- [10] ITCF, 1978. La fertilisation azotée du blé. Institut Technique des Céréales et Fourrages.
- [11] Plas, D., 1992. Adaptation régionale du raisonnement de la fertilisation: Cas du blé tendre en Aunis. Thèse de doctorat, Université Technologique de Compiègne
- [12] Limaux, F., 1999. Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Lorraine.
- [13] Lecomte, C., Prost, L., Cerf, M., Meynard, J.-M., 2010. Basis for designing a tool to evaluate new cultivars. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 667–677. doi:10.1051/agro/2009042
- [14] Vanloqueren, G., Baret, P.V., 2008. Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural “lock-in” case study. *Ecological Economics* 66, 436–446. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.10.007
- [15] Blanchet, A., Gotman, A., 2001. L'enquête et ses méthodes: l'entretien. Collection Sociologie Nathan Université, pp 115.
- [16] Ministry of Ecology, Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. NOR: DEVL1134069A. Version du 24 juin 2015
- [17] Cerf, M., Meynard, J.-M., 1988. Enquête sur la mise en œuvre des méthodes de fertilisation raisonnée. 3ème Forum de la « Fertilisation raisonnée », Nancy, 5-12.
- [18] Goos, R.J., Prunty, L., 1990. Yield variability and the yield goal decision, in: J.L. Havlin (Eds), *Proceedings of the Great Plain Soil Fertility Conference*. Denver, CO, March 6-7, 1990, Kansas, State University, Manhattan, 187-189.
- [19] Samborski, S.M., Tremblay, N., Fallon, E., 2009. Strategies to Make Use of Plant Sensors-Based Diagnostic Information for Nitrogen Recommendations. *Agronomy Journal* 101, 800. doi:10.2134/agronj2008.0162Rx
- [20] Schepers, J.S., Moiser, A.R., 1991. Accounting for nitrogen in nonequilibrium soil-crop systems, in: R.F. Follet R.F., et al (Eds.), *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*, SSA, Madison, WI, 125-138. doi: 10.2136/1991.managingnitrogen.c6
- [21] Buckley, C., Carney, P., 2013. The potential to reduce the risk of diffuse pollution from agriculture while improving economic performance at farm level. *Environmental Science & Policy* 25, 118–126. doi:10.1016/j.envsci.2012.10.002
- [22] Olf, H.-W., Blankenau, K., Brentrup, F., Jasper, J., Link, A., Lammel, J., 2005. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 414–431. doi:10.1002/jpln.200520526
- [23] Meynard, J.-M., Boiffin, J., Caneill, J., Sebillotte, M., 1982. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse II. -Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie* 1(9), 795-806. doi: 10.1051/agro:19820503
- [24] Meynard, J.-M., Limaux, F., 1987. Prévision des rendements et conduite de la fertilisation azotée. Cas du blé d'hiver. *Compte-Rendu de l'Académie d'Agriculture de France* 73 (3), 117-132
- [25] Gate, P., 1998. Blé : des modèles pour prévoir le rendement. *Perspectives agricoles*, 178, 56-58
- [26] Bellocchi, G., Donatelli, M., Monotti, M., Carnevali, G., Corbellini, M., Scudellari, D., 2006. Balance sheet method assessment for nitrogen fertilization in winter wheat: II. alternative strategies using the CropSyst simulation model. *Italian Journal of Agronomy* 1, 343. doi:10.4081/ija.2006.343

- [27] Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J.S., 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 51–62. doi:10.1016/j.compag.2007.06.006
- [28] Franzen, D.W., Cihacek, L.J., Hofman, V.L., 1996. Variability of soil Nitrate and Phosphate under different landscapes. *Precision Agriculture*, 521-529. doi:10.2134/1996.precisionagproc3.c56
- [29] Ferguson, R.B., Gotway, C.A., Hergert, G.W., Peterson, T.A., 1996. Soil Sampling for Site-Specific Nitrogen Management. *Precision Agriculture*, 13-22. doi:10.2134/1996.precisionagproc3.c2
- [30] Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817–829. doi:10.1051/agro:2002064
- [31] Passioura, J.B., 1996. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? *Agronomy Journal* 88, 690. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050002x
- [32] Ondersteijn, C.J.M., Beldman, A.C.G., Daatselaar, C.H.G., Giesen, G.W.J., Huirne, R.B.M., 2002. The Dutch Mineral Accounting System and the European Nitrate Directive: implications for N and P management and farm performance. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 92, 283–296. doi:10.1016/S0167-8809(01)00288-2
- [33] Schröder, J.J., Neeteson, J.J., 2008. Nutrient management regulations in the Netherlands. *Geoderma* 144, 418-425. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.12.010
- [34] Bouma, J., 2008. In: Discussion of Schröder, J.J., Neeteson, J.J., 2008. Nutrient management regulations in The Netherlands (with Discussion). *Geoderma* 144, 418-425. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.12.010
- [35] Sonneveld, M.P.W., Bouma, J., 2003. Methodological considerations for nitrogen policies in the Netherlands including a new role for research. *Environmental Science & Policy* 6, 501–511. doi:10.1016/j.envsci.2003.08.005
- [36] Bouma, J., 2016. The importance of validated ecological indicators for manure regulations in the Netherlands. *Ecological Indicators* 66, 301–305. doi:10.1016/j.ecolind.2016.01.050
- [37] Jeuffroy, M.-H., Bouchard, C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Science* 39, 1385-1393. doi:10.2135/cropsci1999.3951385x

Chapitre II - Démarche pour la conception innovante d'une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée qui intègre les usages

Nous avons vu que la méthode du bilan prédomine en France pour le raisonnement de la fertilisation azotée. Malgré les investissements lourds pour l'améliorer, l'affiner et la diffuser, elle ne permet pas de gérer les arbitrages entre objectif environnementaux et économiques : atteindre des hauts niveaux de production avec des teneurs en protéine élevées tout en minimisant les pertes vers l'environnement est toujours en enjeu d'actualité ! Dans le chapitre précédent, nous montrons que la mise en œuvre de la méthode du bilan révèle des difficultés d'usages, avec des ambiguïtés et des incertitudes sur la manière d'estimer certains termes de l'équation. A partir de ces observations, nous faisons l'hypothèse que pour explorer une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée qui soit pertinente au regard de la diversité des enjeux autour de l'azote et des conditions de mise en œuvre, il faut intégrer les utilisateurs dans le processus de conception dès que possible. Nous avons suivi une démarche de conception innovante qui repose sur trois étapes : 1) un diagnostic des usages, 2) un processus de conception qui combine des ateliers participatifs, la production de nouvelles connaissances et un prototypage assisté par modèle, 3) un test du prototype en situation d'usage. Nous avons vu qu'une des controverses majeures autour de la méthode du bilan concerne l'objectif de rendement. C'est donc à partir de ce constat que nous avons formulé un concept projecteur : « une méthode de raisonnement sans objectif de rendement ». L'exploration de ce concept innovant a conduit à proposer une nouvelle méthode de raisonnement basée sur un suivi régulier de l'état de nutrition azotée de la plante, l'acceptation de carences en azote non préjudiciables et la modélisation de la fourniture en azote du sol sur des pas de temps courts. Les connaissances scientifiques nécessaires à la mise en œuvre de cette méthode ont été produites entre les ateliers. Le modèle Azodyn, couplé à la théorie de la viabilité, a été utilisé pour construire des règles de décision, permettant la mise en œuvre de cette nouvelle méthode. Le prototype ainsi élaboré a été testé par deux groupes d'agriculteurs dans deux régions différentes. Nous montrons que l'articulation et la complémentarité des trois étapes de la démarche ont permis de proposer, assez rapidement, les principes et les bases d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée dans un contexte exclusivement orienté depuis 40 ans sur une même méthode. Finalement, la démarche de conception permet d'intégrer les représentations des utilisateurs avec des nouvelles connaissances qui ont les caractéristiques de connaissances actionnables et par la construction des règles de décision qui propose une manière originale de prendre en compte l'incertitude et l'aversion au risque des utilisateurs.

La démarche d'ensemble a été présentée au 19th Nitrogen Workshop, en Suède en Juin 2016. Ce travail a été soumis dans l'édition spéciale de la revue Nutrient Cycling in Agroecosystmes.

Combining diagnosis of uses with participatory design to develop new methods for managing wheat N fertilization

Clémence Ravier^{1,2*}, Marie-Hélène Jeuffroy¹, Philippe Gate³, Jean-Pierre Cohan², Jean-Marc Meynard⁴

¹UMR211 Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

²Arvalis-Institut-du-Végétal, Station expérimentale de la Jaillière, 44370 La Chapelle Saint-Sauveur, France

³Arvalis-Institut-du-Végétal, 3 rue Joseph & Marie Hackin, 75116 Paris, France

⁴UMR1048 SAD-APT, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

*Corresponding author: Clémence Ravier

Postal address: Campus de Grignon, Batiment EGER, UMR Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France

E-mail address: cr_clemence@hotmail.com

Abstract : In France, a single science-based model has dominated N fertilizer management for 40 years. This model has benefited from scientific and methodological progress, but the minimization of N losses whilst maximizing grain yield and achieving satisfactory grain protein content remains challenging. A mismatch between the science-based method and its implementation has been demonstrated, calling into question its use and effectiveness. We assumed that involving users in the design of new methods for calculating fertilizer requirements as early as possible in this process would make it possible to explore methods of greater relevance in terms of the diversity of N issues and implementation conditions. We used a dialog-based participatory design method as the basis of a process of innovation including: 1) a diagnosis of uses of existing methods and tools, 2) a design process combining participatory workshops, the generation of new knowledge required to explore new concepts and model-based prototyping, and 3) testing of the prototype in the users' conditions. One of the major problems with the current N fertilization method identified by users was the requirement for target yield definition at the beginning of the crop cycle, despite the heavy dependence of this parameter on the weather during the second half of the cycle. From this statement, we established the following exploratory conceptual axis: "a fertilization method without target yield". Design workshops developed a new concept of fertilization methods based on (i) the regular monitoring of crop N nutrition, using an as yet undefined indicator, (ii) the acceptance of periods of N deficiency, with as yet undefined characteristics, and (iii) short-term soil N availability simulated by a crop model. New knowledge was generated for the first two of these points, and the Azodyn model was used to build decision rules for N applications, based on viability theory. The prototype system was then tested by two groups of farmers. We show that by combining diagnosis of uses, participatory design, and model-based prototyping, it is possible to develop an innovative fertilizer method within a context characterized by fixation effects focused on a dominant paradigm.

Key words: Innovative design, decision-support tool, model-based design, winter wheat, prototyping, nitrogen nutrition index.

1. Introduction

At the end of the 1960s, the balance-sheet method for calculating nitrogen fertilizer requirements emerged as a major innovation in agricultural science. Until then, N rates had been estimated empirically from curves of yield response against the total amount of N applied. The balance-sheet method, as described formally by Hébert (1969), was a simple model for calculating total N rate from the difference between crop N requirement and soil N availability. In the 1980s, environmental issues rose to the fore and the balance-sheet method was seen as a promising way to deal with the new constraints imposed on agriculture. Its use thus intensified and increasing numbers of scientific studies looked at ways of improving it. In France today, the balance-sheet method is the standard approach imposed by national regulations to ensure that the European Nitrate Directive (Ministry of Ecology, 2015), which aims at protect or improve water quality, is respected. This method calculates the rate of N fertilizer to be applied, considering each component of soil N supply and plant N requirement separately. For many crops, including winter wheat, the requirements of the plant are estimated from a predefined target yield, at the end of the winter. However, actual yield is highly variable and dependent on weather in the spring. The estimation of soil N supply requires a measurement of soil inorganic N content in the field at the end of winter, and the use of submodels to predict the amount of N derived from the mineralization of soil humus and plant residues during the spring, according to soil type. The growing consensus on the balance-sheet method as the best way to calculate N application rates led to many research programs being set up to improve the balance-sheet equation (Lemaire and Nicolardot, 1997). The calculation of nitrogen fertilizer requirements has thus been based on a consensual model for the last 40 years, with a gradual shift from a constant rule-based design occurring in the absence of reconsideration of the principles and objectives of the method (Meynard *et al.*, 2012). The balance-sheet method is based on rigorous, precise, scientific knowledge, but it remains difficult to minimize N losses whilst maximizing grain yield and achieving satisfactory grain protein content with this approach. Nitrogen compounds are key pollutants of the atmosphere and aquatic environments, with inappropriate or excessive N fertilizer use leading to environmental damage and ecosystem degradation (Sutton *et al.*, 2011). Despite the application of the balance-sheet method to determine nitrogen fertilizer application rates for most fields, excess N from agricultural activities still accounts for large N losses to the environment (Billen *et al.*, 2013). Ravier *et al.* (2016) showed that the estimation of some terms for the balance-sheet method remained uncertain in agricultural conditions, despite 40 years of research and progress. This uncertainty may lead to misuse of the balance-sheet method, with farmers increasing fertilizer application rates to limit production risks. We suggest that this mismatch between a science-based method and its uses limits the possibilities for improving N fertilizer management with a view to maximizing yield and protein content whilst limiting N losses. We thought that real improvement might require a reconsideration of the current model, to design a method for managing fertilizer adapted to the situations in which the

users work. Indeed, Cerf *et al.* (2012) demonstrated that taking situations of use into account makes it possible to design more appropriate decision support tools. They showed that determining the uses of existing tools and the testing of a prototype in realistic situations were relevant to capture differences in the representation of the problem between designers and users.

We describe here an original three-step approach to the design of a completely new fertilization method: 1) diagnosis of uses of existing tools and methods for managing N fertilization, 2) an innovative design process combining participatory workshops, the generation of new knowledge required for the exploration of new concepts and model-based prototyping, and 3) testing of the prototype in the situations in which the users work, to highlight the improvements required to render the method more relevant to users. This study was performed on intensively managed winter wheat, the main arable crop in France.

2. Approach to the design of an innovative fertilization method

The steps in the design approach are summarized in figure 1.

2.1. Diagnosis of uses of existing methods and tools

This diagnosis is an analysis, in the situations in which the users work, of the uses of existing tools for managing N fertilizer applications (Cerf *et al.*, 2012). It highlights sources of uncertainty in the management of N fertilizer application linked to the implementation of existing methods and tools. Difficulties encountered by users, often neglected in the design of tools in agriculture, are made explicit, to identify what needs to be improved in new tools to overcome these difficulties. This process also ensures that specifications for fertilizer decision tools that might make it easier for users to adopt and use these tools are taken into account right from the start of the design process (Newman *et al.*, 1999; Lecomte *et al.*, 2010). We captured the diversity of ways in which existing tools are used, by involving diverse users (i.e. farmers, advisors, extension services, authorities) and considering contrasting working situations (i.e. climate and soil types, farm types, monitoring tools, advisory networks). As described by Ravier *et al.* (2016), the diagnosis combined:

1) Interviews with users concerning the ways in which they managed N fertilization, and parameterized and implemented the balance-sheet method. Interviews were carried out in various regions of France, with farmers, technical advisors and representatives of technical institutes and cooperatives. We described the practical use of existing tools and the way these tools were used to guide decisions and advice concerning N fertilizer use.

2) An original analysis of official reports defining the standard use of the balance-sheet method at the regional scale. These reports traced out debates between the representatives of regional institutions trying to homogenize the implementation of the balance-sheet method as a regulatory tool. These

debates highlighted controversies about the current paradigm of fertilizer management, and revealed a major mismatch between the science-based model and its use.

Based on these diverse sources of information, we identified unexpected uses of the method diverging from its theoretical purpose, new assessment criteria not included in the current model but apparently useful for decision-making, and users' needs for future methods and tools based on the things the existing methods and tools cannot do. The formulation of these new assessment criteria and needs was the starting point for the design step.

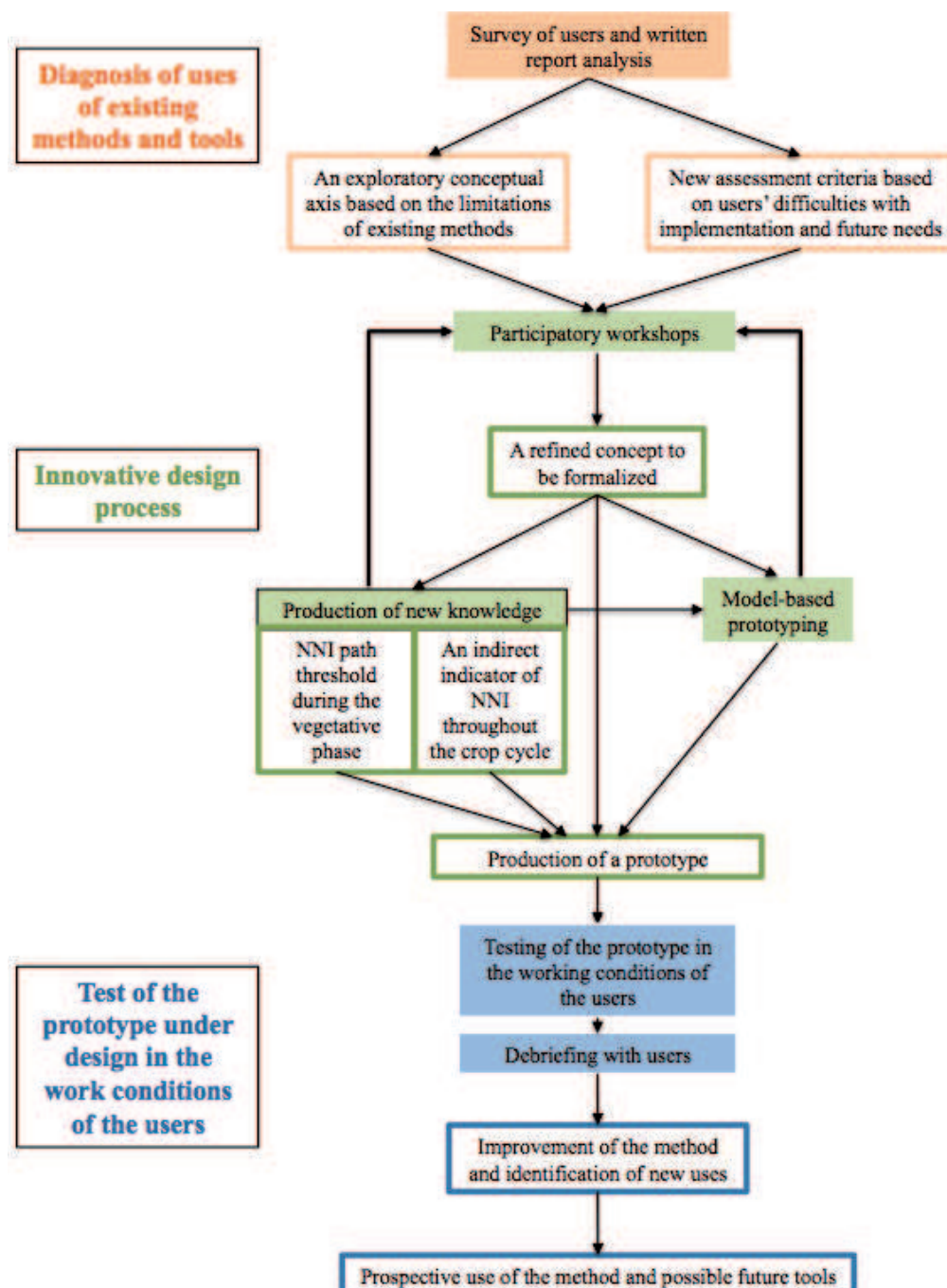


Fig. 1. Approach to design a new method for managing N fertilizer, combining a diagnosis of uses of existing methods, an innovative design process, and prototype testing in the situations in which the users work

2.2. The innovative design process: from a concept to a prototype for a new method

2.2.1. Collective workshop based on an exploratory conceptual axis

Participatory workshops were held, to lay the foundations for a new method for determining N fertilizer requirements, and to develop the initial concept into a prototype method. We used “KCP workshops”, developed on the basis of C-K design theory (Hatchuel and Weil, 2009), for the collective exploration of areas of innovation (Elmqvist and Segrestin, 2009). These workshops combine a knowledge phase (K), a concept phase (C) and a proposal phase (P), to enhance innovative design (Berthet *et al.*, 2016). We ran two participatory workshops, each with its own objectives regarding the design process. The same 13 experts from research and development organizations attended these two workshops. The participants had diverse skills, relating to specific processes regarding the nitrogen cycle in agriculture, such as soil NO₃ dynamics, gaseous N emissions, crop N deficiencies, plant N requirements, the implementation of weather data in agricultural tools, or on the design process in agriculture (Table 1). The first workshop, held in 2014, combined (i) a knowledge phase (K), during which we shared existing knowledge about N in agriculture, including existing knowledge not incorporated into the available methods and tools, in particular, and (ii) a concept phase (C) in which we explored new concepts for N fertilization management methods. As in design sciences, participatory workshops were organized around an exploratory conceptual axis, with knowledge relevant to this exploration (Hatchuel *et al.*, 2009; Hooge *et al.*, 2016). The concept and the new assessment criteria, established from a diagnosis of uses, were presented at the start of the first workshop, to encourage creativity and to unlock the participants’ imagination for the exploration of new concepts extending beyond the usual paradigm of N fertilizer management (Agogué *et al.*, 2013; Berthet *et al.*, 2016). During the C-phase, the concept was refined, through crosstalk between the K- and C-spaces, with new attributes emerging from expansion of the K-space (Hatchuel and Weil, 2009). Some assessment criteria were enhanced, others not initially considered emerged, and gaps in knowledge that needed to be filled for the exploration of new concepts were identified (Le Masson *et al.*, 2011). Some of this knowledge was generated during the interval between the two workshops and was presented at the start of the second workshop, as a basis for the development of a prototype method. The second workshop, held one year after the first, focused on the development of a prototype (P). The results from the K-C phases, including the knowledge obtained after the first workshop, were summarized and presented, to further explorations aiming to produce a prototype dealing with specific concerns linked to users’ needs.

Table 1. Characteristics of the participants of the workshop with their specific areas of expertise

Institute	Field of expertise
INRA ¹	N dynamics in the soil
INRA	Gaseous N emission
INRA	Innovation in agronomy – design of decision support tools
INRA	Integrating uses into design approaches
Arvalis ² (Scientific Director)	Crop nutrition – N deficiency in wheat
Arvalis - National Representative	Crop nutrition – N fertilizer type – N volatilization
Arvalis – Regional Representative	Regional conditions: oceanic climate & predominance of livestock farming (organic N)
Arvalis – Regional Representative	Regional conditions: intensive cereal production
Arvalis – Regional Representative	Regional conditions: dry Mediterranean climate/ diagnostic tool for fertilization practices
Arvalis	Responsible for the weather database, with expertise in climatic forecasting
ADEME ³	Energy in agriculture
INRA *	N deficiencies in crop growth and production / * presentation: N deficiencies in wheat crops
INRA *	Multidisciplinary approach to design in agriculture / * Running of the workshop
INRA and Arvalis*	Presentation of the results for the diagnosis of uses

¹National Institute for Agronomic Research; ²Arvalis, the French arable crop R&D institute; ³French Environment & Energy Management Institute

* Participants with a specific role in the workshop (authors of the paper)

2.2.2. Generation of new knowledge

The first workshop highlighted the need for specific work on N deficiencies. One of the key principles underlying the current paradigm is the maintenance of non-limiting N nutrition throughout the crop cycle. This requirement leads to frequent overfertilization, resulting in an increase in the risk of N losses to the environment. Recent studies have shown that some periods of N deficiency can occur without damage to the grain yield of wheat crops, whereas others decrease this yield (Jeuffroy and Bouchard, 1999). However, the precise patterns of N deficiency during the crop cycle that can be tolerated remained unknown. We used experimental data from previous studies to determine minimum NNI thresholds at various points in crop development, tracing out a path of minimal NNI requirements during the spring period. Provided NNI remains above this path, N deficiency has no detrimental impact on crop production. The data used were collected in several years, at different sites subject to different policies concerning N fertilizer application, and successive NNI values were measured during the crop cycle at growth stages Z30, Z32, Z39 and Z60 on Zadoks' scale. We adapted the receiver operating characteristics curve methodology (Makowski *et al.*, 2005) to identify the minimum NNI path most accurately distinguishing between treatments with and without yield loss (Ravier *et al.*, submitted). We also analyzed the effect of this minimum NNI path on grain protein content (GPC) and on nitrogen use efficiency (NUE).

2.2.3. Model-based prototyping

We used the Azodyn soil-crop model to develop a prototype based on the minimum NNI path. Azodyn predicts the consequences of N fertilizer management strategies (rates and splitting) for daily crop growth, yield, grain protein content and N losses to the environment, taking soil characteristics and

weather conditions into account (Jeuffroy and Recous, 1999; Meynard *et al.*, 2002). It can easily be adapted to diverse agronomical situation (David *et al.*, 2004), and relies on a small number of easily obtainable input data, making it particularly relevant for the construction of decision rules, as shown by McCown (2001). Simulations were performed to investigate the possibilities for managing N fertilizer applications such that N deficiencies strictly respect the minimum NNI path, with the aim of avoiding N losses. The possible dates of N application were chosen such that N was applied only if weather conditions were optimal for N valorization, with an interval of at least two weeks between successive N fertilizer applications, as it has been reported that fertilizer N is taken up within 15 days (Recous and Machet, 1999). Simulations were performed for 20 series of weather data. The parameters of the model were set so as to correspond to specific soil and cropping practices representative of the two regions identified for the testing of uses. We then analyzed simulated NNI dynamics, using viability theory (Aubin, 1991). For each N rate applied on one date, for a given level of crop NNI, we assessed the probability of (1) avoiding a loss of more than 20 kg N ha⁻¹ to the environment over the crop cycle, (2) maintaining crop NNI above the minimum NNI path threshold regardless of subsequent weather conditions. We thus built robust decision rules for managing N fertilizer application that respected both constraints (1) and (2), in the face of uncertainty about the weather (Sabatier *et al.*, 2015).

2.3. Testing of a prototype of the method under design

We assessed the suitability of the method for application in the real-life conditions in which the users work. This step included the testing of the prototype, followed by a collective debriefing to ascertain the users' reactions to the method. According to Cerf *et al.* (2012), prototype testing should determine whether the method resolves the problems identified during the diagnosis phase, and the way in which it is used to make decisions. We collected information about: 1) changes in practices triggered by the implementation of the prototype, 2) problematic situations for which improvements to the prototype are required, and 3) unexpected uses of the method suggested by users.

2.3.1. Setting up a test with users

Two groups of farmers and their advisors, from two regions with contrasting climates and soil types, tested the prototype for managing fertilizer applications on wheat during the 2016 growing season. One of these groups was located in Normandy, in North-West France. The farmers of this group had low-input practices, and had previously been interviewed during the use diagnosis process. The other group was located in New Aquitaine in South-West France and had high-input practices. This group was involved only in the testing phase. In both areas, farmers were asked to use the prototype to determine the amount of N fertilizer to apply on a test strip within a wheat field of their choice. Advisors were asked to use the prototype to provide farmers with decision support during the growing season. In January and February 2016, we organized meetings with the two groups to present the prototype and the knowledge it contains, including the underlying principles of the method. We

provided the material necessary for implementation of the method, and we asked the participants to record individual information about N fertilizer management on the test strip and on the rest of the field. During the growing season, we regularly contacted the advisors, to confirm the recommendation, and to provide the decision rules, which were finalized during the growth.

2.3.2. Collective debriefing

We organized two phases of debriefing, to collect the information required to improve the prototype. First, each farmer was asked to discuss how he or she had used the prototype, based on detailed information collected during the growing season. Other farmers were invited to react, and advisors helped to ensure that all the important information was collected. A collective discussion was then organized, focusing on differences between farmers, and differences between what they had done and what they would usually do. Advisors were asked to participate in these debriefings, to provide their own feedback concerning the method. The exchanges at these meetings included discussions of the strengths and weaknesses of the method relative to other methods, limitations relating to work organization or specific constraints, and the possibility of extending the use of the method at farm level.

2.4. Feedback to the workshop team

A final meeting was held with the participants of the two workshops, for a collective discussion about the future development of the method and of tools based on the method. The aim was to obtain feedback about the prototype to guide future improvements and to discuss its possible uses. We organized the debate around a presentation of the perspectives for future use of the method by the technical institute involved in the design process and an agricultural advisor involved in user testing. The discussions were based on a comparison of the possible uses presented.

3. Results

3.1. Diagnosis of uses of the method, to identify the exploratory conceptual axis and new assessment criteria

New principles and assessment criteria were identified from the difficulties encountered with the implementation of existing methods and tools (Table 2). The diagnosis of uses confirmed the hypothesis that difficulties with use limit the possibilities of improving practices to meet environmental and economic objectives simultaneously (Ravier *et al.*, 2016). Regarding the calculation of total fertilizer application rate, the understanding of the concept of target yield appeared to differ between agronomists, who defined it as the average reachable yield in a given situation, and farmers, who tended to fix it as the yield they wished to attain, which was often higher than the average. Scientists stressed the need to estimate soil mineral content at the end of winter by soil analysis, but sampling errors and uncertainty on extrapolations have been shown to undermine the reliability of this approach (Ravier *et al.*, 2016).

Growth stages have classically been used as the major criteria for splitting rules. However, the high frequency of drought periods in spring in recent years has increased drought risk aversion in farmers and has tended to favor earlier N applications, for which N use efficiency is known to be lower: *“For several years, we’ve had droughts during springtime. So, if they announce rain, I rush to apply N fertilizer just before the rain, even if the right growth stage hasn’t been reached yet”* (Farmer in Burgundy). Eleven of the fourteen technical advisors interviewed mentioned that farmers tend to apply N fertilizer too early: *“Farmers do not take risk regarding weather conditions, N fertilizers are applied as soon as weather conditions are favorable, even if this decreases the efficiency of N application”* (Advisor, Normandy). It is difficult for farmers to achieve a trade-off between applying fertilizer early, to avoid applications in dry conditions, and delaying fertilizer application, to coincide with high crop N demand but at the risk of conditions being too dry, both of which have an effect on the NUE. Farmers also wanted to be able to assess the efficiency of their fertilization strategies themselves, to improve the adjustment of these strategies both during the growth season and from year to year. Finally, the new method should maintain yields at the levels achieved with the current method and should ensure that grain protein content meets market requirements. The use diagnosis led to the formulation of new principles and assessment criteria for the innovative method for determining fertilizer applications (Table 2). One of the key new concepts considered in the design workshop was that of “a fertilization method without target yield”.

Table 2. New principles for the new fertilization method and assessment criteria emerging from the diagnosis of uses, which focused on the principles of the balance-sheet method and identified problems with its implementation

Principles of the current balance sheet method	Difficulties of implementation	New principle for the new fertilization method	Assessment criteria
Fixing a target yield at the end of winter	No consensus understanding of the concept	A fertilization method without a target yield	High yield and satisfactory protein content
Estimating soil N mineral content at the end of winter by soil analysis	Lack of reliability due to different interpretations and sampling rules	A fertilization method without soil N analysis	First N application when soil N supply becomes limiting, as revealed by crop characteristics
Timing of application schedule based on calendar dates and crop growth stages	Frequent drought periods around recommended application dates in recent years	A fertilization method that takes uncertainty about the weather into account	Timing of application chosen to maximize NUE
Non-limiting nutrition (NNI $\geq$ 0.9) throughout the crop cycle	Difficulties avoiding excess N application	A fertilization method tolerating periods of N deficiency	Only if not detrimental to yield, making it possible to achieve a satisfactory protein content and NUE

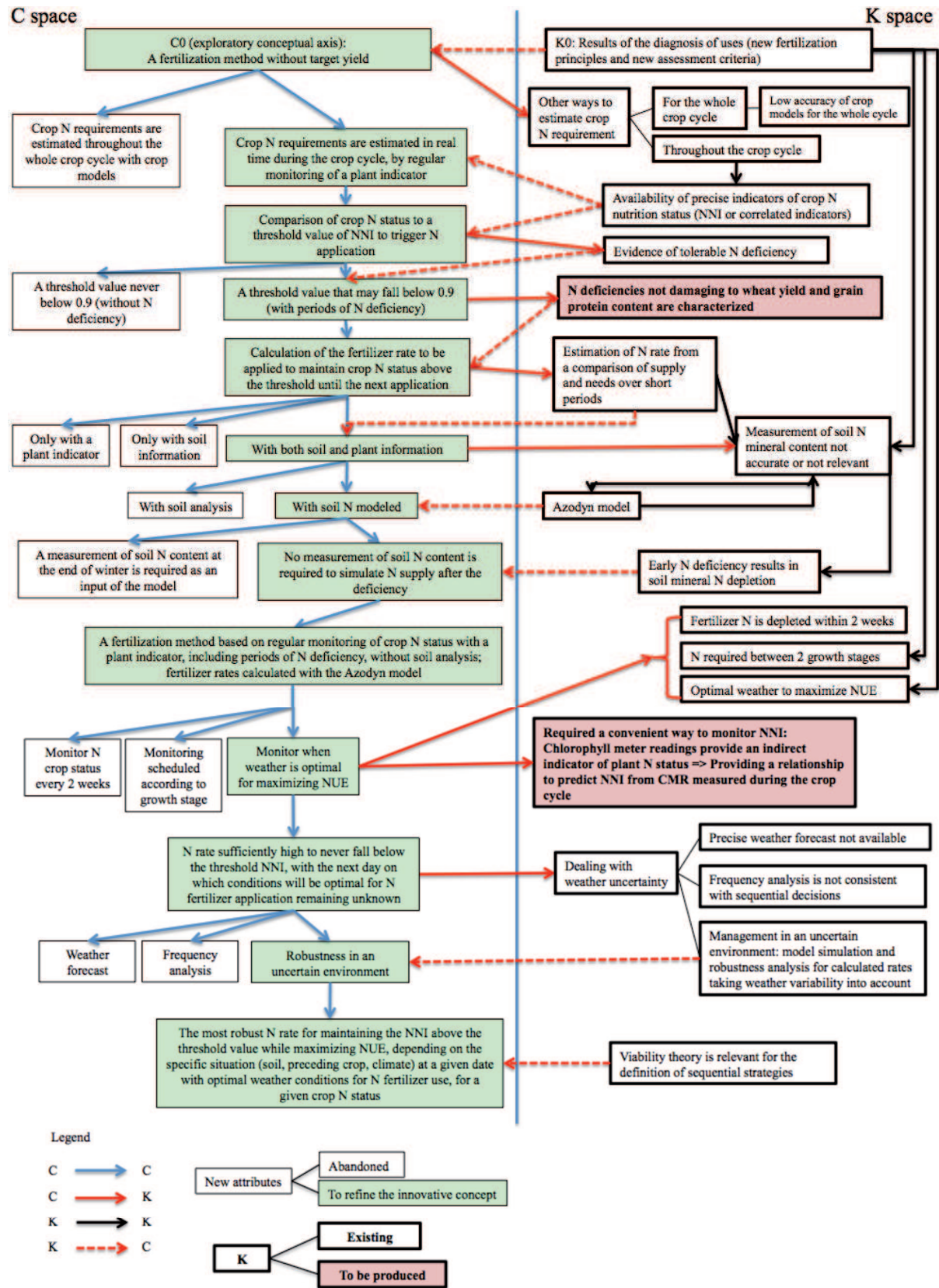


Fig. 2. The representation, suggested by the formalism of the C-K theory, of the progress of the exploration of the concept “a fertilization method without target yield” during workshops

3.2. Design workshops for collective exploration

3.2.1. Refinement of the concept to develop the underlying principle of the new method

At the first workshop, we presented the results of the diagnosis of uses, focusing on new objectives and assessment criteria that could enhance the design step. We then started the exploration with an exploratory conceptual axis antagonistic to that underlying the current method: “a fertilization method without target yield”. The short presentation of existing knowledge at the beginning of the workshop stimulated creativity and, as expected according to C-K theory, led to discussions addressing both knowledge and concepts and mutually enriching both these domains (Fig. 2). The introduction of this new concept called into question the way in which crop N requirement is assessed according to current knowledge. It was suggested that this concept could be split into two: estimating the N requirement of the whole crop cycle with crop models, or estimating N requirement in real time during the crop cycle through the regular monitoring of a plant indicator. The low prediction accuracy of models at the scale of the whole crop cycle was cited as a major limitation for the splitting of this concept. The nitrogen nutrition index (NNI) is a specific and sensitive plant indicator providing precise information about crop N status in real time (Lemaire *et al.*, 2008). It was therefore suggested that NNI could be used as a relevant plant indicator guiding decisions about N application. The use of this indicator would require the definition of a threshold value of NNI for N fertilizer application. Knowledge about tolerable N deficiencies (Jeuffroy and Bouchard, 1999) was then used to develop a new attribute of the concept: a threshold value of NNI, which may be allowed to fall below 1, corresponding to a fertilization strategy including a period of N deficiency. The underlying principle of the current system that N fertilization should be managed “without N deficiency” was abandoned. We identified a gap in current knowledge: which N deficiencies do and do not have a deleterious impact on wheat yield and grain protein content?

3.2.2. Generation of new knowledge required for the new concept explored

A specific study was carried out on N deficiencies, to identify nitrogen nutrition index (NNI) paths (patterns of change in NNI over the growing season) including N deficiencies that did not have deleterious effects on grain yield and protein content (Ravier *et al.*, submitted). An analysis of experimental data identified non-damaging periods of N deficiency during vegetative growth, from tillering to flowering (Fig. 3). Provided that NNI was maintained above the minimum NNI path from tillering to flowering, there is no risk of yield and losses and decreases in protein quality relative to those potentially achievable in the conditions specific to the year concerned. However, if the NNI falls below this minimum path at any point in the crop cycle, output may be damaged (losses of yield or quality). As suggested by Jeuffroy *et al.* (2013), we found that NNI values largely exceeding 1 were associated with a risk of yield loss and decline in protein N content (Fig. 3). We showed that diverse possible NNI paths would give satisfactory results, provided that NNI did not fall below the minimum NNI path at any point in the growth cycle (Fig. 3). Acceptable NNI paths have never been

characterized in detail before and our analysis demonstrates that wheat crops can tolerate intense N deficiency before flowering. This represents a fundamental shift from the current paradigm for intensive wheat production, based on the maintenance of conditions in which N is not limiting.

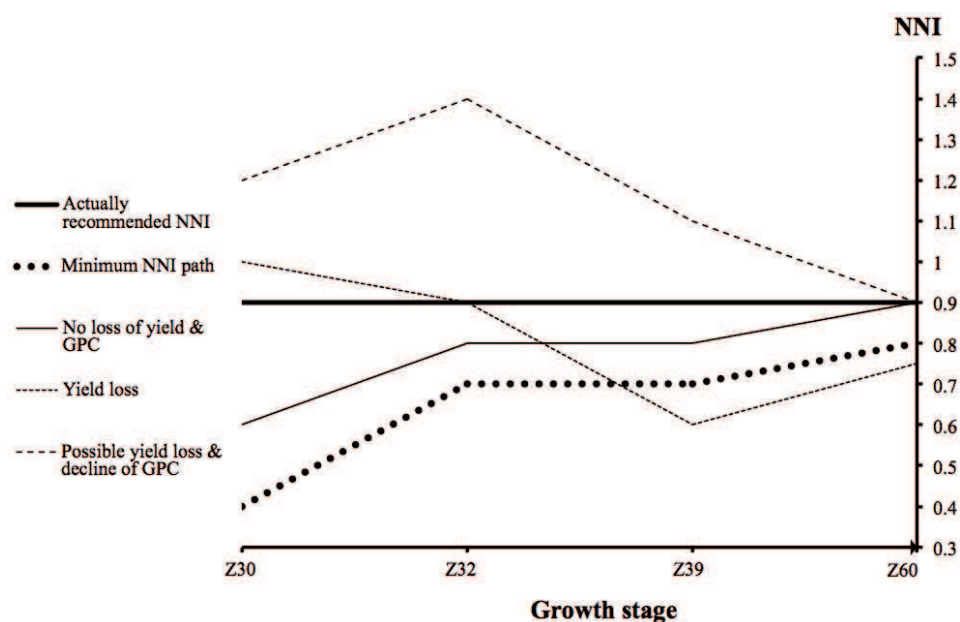


Fig. 3. NNI dynamics for a wheat crop, at 4 growth stages (Z30, Z32, Z39, Z60 on Zadoks' scale). The thick lines (continuous and dotted) are references (current and minimum NNI paths), whereas the thin dotted lines are examples of NNI dynamics that can lead to yield losses if NNI falls below the minimum NNI path, regardless of the time point at which this occurs during the crop cycle, or to a decrease in grain protein content (GPC) and possible yield losses if the recommended NNI is exceeded (gray dotted line, from Jeuffroy *et al.*, 2013). For situations between the two reference lines (thin continuous line), there is no risk of production losses

3.2.3. Methods for estimating soil N supply

Once the concept was partitioned and refined (i.e. a fertilization method based on a plant indicator with possible periods of N deficiency), the next key question to be tackled was how much N should be applied (Fig. 2). A method for estimating N application rates based on comparisons between N supply and crop requirements during short periods was put forward. The possibility of assessing soil N supply by measurements or models was discussed. Knowledge about soil N dynamics in cultivated conditions (Recous and Machet, 1999), and the many sources of uncertainty in soil analysis highlighted during the diagnosis of uses (Ravier *et al.* 2016), led to the exclusion of decision rules based on the monitoring of soil N mineral content (Table 2). Instead, exchanges focused on a concept making use of predictions from a soil-crop model, Azodyn, which was proposed as a relevant model for simulating soil N dynamics over short periods. Azodyn relies on a small number of input data that are easy to estimate. However, the Azodyn soil submodel is a dynamic version of the balance-sheet method (Jeuffroy and Recous, 1999); it therefore requires an estimation of soil mineral N content at the end of winter. A NNI value below 1 indicates that the soil N supply is not sufficient to meet crop requirements (Limaux *et al.*, 1999). The toleration of N deficiency early in the crop cycle is associated with the uptake of soil mineral N by the crop before fertilizer application. The measurement of soil N content at the end of winter is, therefore, not useful if this approach is adopted. Finally, the principles

of regular monitoring of crop N status throughout the crop cycle and of tolerating periods of N deficiency make it possible to estimate soil N supply without the need for soil analysis.

3.2.4. Proposed frequency of plant monitoring

The concept was refined with new attributes: a fertilization method based on the regular monitoring of crop N status with a plant indicator, including periods of N deficiency, without soil analysis and using Azodyn to calculate N fertilizer rates during the crop cycle (Fig. 2). The experts agreed that this concept would require the regular monitoring of crop N status throughout the growing season, but the optimal frequency of monitoring was unclear. Three partitions of the concept were then explored. First, based on the knowledge that N depletion occurs within two weeks of N fertilizer application (Recous and Machet, 1999), it was suggested that crop N status should be monitored every two weeks. This proposal was rapidly ruled out because it was not suitable for use in farm conditions: it might lead to N applications every two weeks, whereas rainfall, which is known to be required to valorize N application, might not occur every two weeks. Second, given that crop N requirements vary with growth stage, it was suggested that monitoring frequency should be based on growth stage. However, the diagnosis of uses showed that, despite current recommendations for N fertilizer applications based on growth stage, drought risk aversion often led farmers to apply fertilizer earlier than recommended. Thus, linking monitoring to growth stage might not be the most appropriate approach for users. Third, making use of knowledge about NUE maximization, the participants highlighted the need to take optimum weather conditions into account as a trigger for N fertilizer application. It was therefore decided that crop N status should be monitored only if weather conditions for N fertilizer application are optimal and no N fertilizer has been applied during the last two weeks.

The concept underlying the new method for determining fertilizer applications was described as follows: (i) regular monitoring of crop N status with an indirect plant indicator, (ii) N application only if weather conditions are optimal for N fertilizer valorization and if crop NNI is below 1 (N deficiency), indicating both a high crop N requirement and a low soil N supply, and (iii) N rate estimation with Azodyn, to take soil N supply into account and keep plant N concentration above a threshold value of NNI until the next day with optimal weather conditions for N application (Fig. 2). The challenge was then to convert this concept into a prototype method for determining N fertilizer applications taking uncertainties about the weather into account and based on the Azodyn soil-crop model, and to develop a convenient way to measure NNI during the crop cycle. We therefore established a relationship predicting NNI from a chlorophyll meter measurement, to monitor NNI during the crop cycle in tests in the real-life conditions in which the users worked (Ravier *et al.*, in preparation (Chapter 5)).

3.2.5. Model-based prototyping to incorporate uncertainty about the weather into decision rules

Based on this proposal and the results of the diagnosis of uses (briefly summarized for the participants), the second workshop focused on refining the concept to incorporate uncertainty about the weather. The switch towards applying N fertilizer when crop N demand was high and soil N supply was low raised two important questions: 1) how should drought risk be taken into account in the decision rules? and 2) how should we estimate the optimal amount of fertilizer N required to keep the NNI at a satisfactory level for an undefined period, depending on future weather, and thus varying between years. With a precise weather forecast, it would be possible to take this decision knowing when the next day with optimal conditions would be, and the weather occurring during the intervening period. However, weather forecasting quality remains too poor for integration into a strategic adaptation of management (Kusunose and Mahmood, 2016). We discussed the possibility of constructing decision rules based on a weather frequency analysis to identify the next day with optimal weather conditions. The resulting analysis of the frequency of optimal weather conditions for N application (Fig. 4) provided useful knowledge for the second workshop on drought risk and supported the introduction of this method on farms. For each day, we determined the longest time to optimal conditions in 19 years out of 20. This analysis revealed the pattern of drought risk over the entire crop cycle. For instance, in Normandy, the risk was highest in March: there was no day with optimal weather conditions between March 1 and April 25 in one year in 20. Conversely, in 19 of 20 years, optimal weather conditions occur time between the start of March and the end of April. In New Aquitaine, the risk of drought was also highest at the start of March, with a risk of about three weeks of drought from March 2 and of about a month of drought from March 8. However, this representation of climatic risk was not consistent with the weather information available to farmers taking decisions about fertilizer applications, decreasing the reliability of the method. It also led to a representation of risk prioritizing drought risk over the risk of N losses to the environment. A method was therefore required for successive and related decisions better balancing these two risks. Viability theory (Aubin, 1991) can provide such a trade-off, as it can identify, from a series of simulated strategies, those that respect a particular set of constraints. We fixed two viability constraints to assess the robustness of decision rules to uncertainties about the weather: 1) the rate of N fertilizer application should keep crop NNI above the minimum NNI path, regardless of the time to the next day with optimal weather conditions for N application; 2) the rate of N application should make it possible to avoid N losses of more than 20 kg N ha⁻¹. Losses, as assessed with the Azodyn model, correspond to unused fertilizer N; some are gaseous, in the form of NH₃, or N₂O and N₂, in some conditions, as suggested by Limaux *et al.* (1999). Robustness was defined as the percentage of the 20 weather scenarios for which the rate of N application satisfied the viability constraints and could therefore be considered a viable option. For each date on which weather conditions were optimal for the valorization of N fertilizer, we determined the recommended rate of N application from crop NNI, as the lowest rate at which maximal robustness

could be achieved. Using viability theory, we identified viable N rates taking into account actual crop N status, soil characteristics and the nature of the preceding crop, all of which influence soil N availability in the Azodyn model.

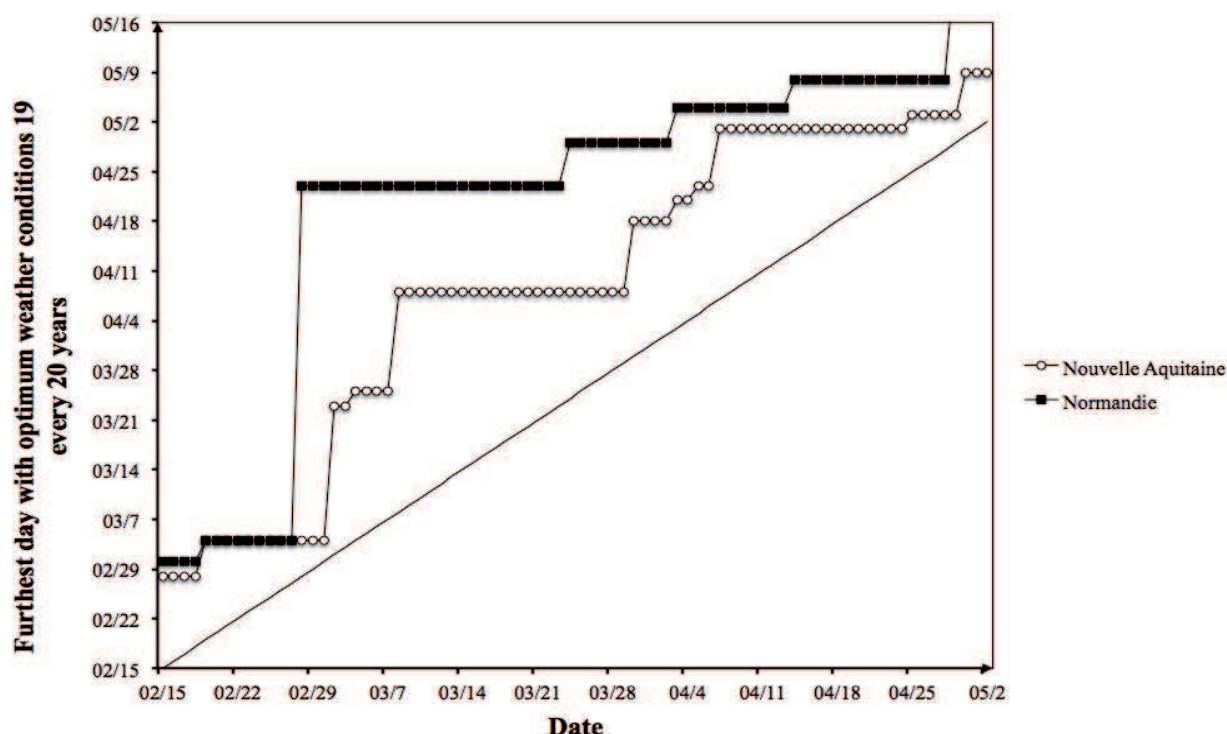


Fig. 4. Frequency analysis for the period of N fertilizer application based on the last 20 series of weather data (from 1995 to 2012) for Normandy and New Aquitaine. The graph shows the longest interval to the next day with optimal weather conditions for N fertilizer application in 19 of the 20 years, for each date

Through this process for the design of a new method for determining fertilizer applications, we formalized a prototype method for managing N fertilization based on the principle of tolerating periods of N deficiency, applying N fertilizer only when weather conditions are favorable, and minimizing N losses, with the following implementation procedure:

- 1) From the end of winter, crop N status is monitored when weather conditions are optimal for N fertilizer use, if no N fertilizer has been applied during the last two weeks,
- 2) Crop N status is measured and growth stage is determined,
- 3) The decision rule (Table 3) appropriate for the agronomic situation is applied,
- 4) The process is repeated until the booting stage (the last stage at which N fertilizer applications can be efficiently used by the crop).

Table 3. Decision rules* for implementing the new method for determining N fertilizer applications, with the N application rate, in kg N ha⁻¹, recommended according to the period within the crop cycle and the NNI measured

	Before ear 1 cm	Ear 1 cm	2 nodes	Flag leaf	Booting
NNI					
0.4	40				
0.5	40	60			
0.6	40	60			
0.7	40	60	100	80	40
0.8	0	40	80	80	40
0.9	0	40	60	40	40
1	0	40	40	40	40
1.1	0	40	40	40	0
1.2	0	0	0	0	0

The following situations should, however, be avoided. If they are encountered N should be applied at a rate fixed with the advisor

* For a cereal as a preceding crop, on a luvisol under an oceanic climate (e.g. in Normandy).

3.3. Testing the prototype method for determining fertilizer applications in the work conditions of the users

3.3.1. Changes in practices triggered by implementation of the prototype

In both farmers' groups, the use of the prototype led farmers to delay the first N application. In 10 of the 13 fields in the two regions for which information was recorded, N fertilizer was applied on the test strip later than on the rest of the field (Fig. 5). Fertilizer application on the test strip was delayed by 4 to 37 days. Moreover, in 12 cases, the total rates of N fertilizer applied on the test strip were lower than the total rates of N fertilizer applied on the rest of the field (Fig. 5). The difference in N fertilizer rates between the field and the test strip ranged from 10 to 70 kg N ha⁻¹. N rates differed between fields, because, even within the same region, soil type and preceding crops varied between farms.

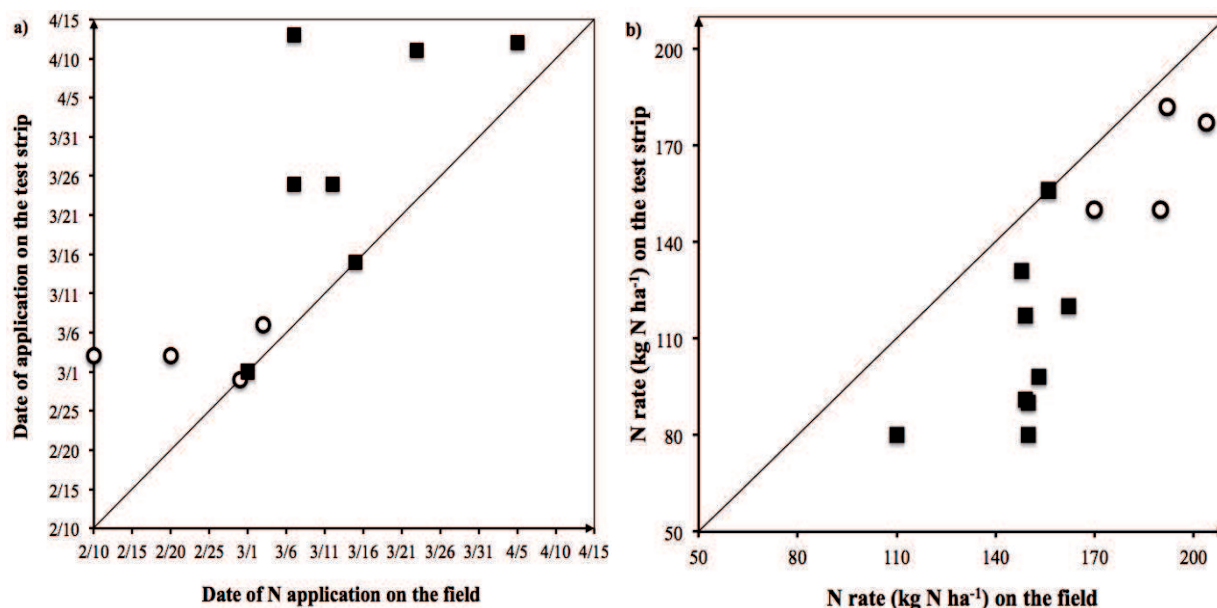


Fig. 5. Comparison between the field and the test strip for a) date of first N fertilizer application and b) total N fertilizer application rate, for both regions (Normandy ■ and New Aquitaine ○)

The difference in management between the prototype method and usual practice was highlighted by the example of one farmer who strictly followed the recommendations obtained with the prototype (Table 4). N fertilizer was applied later on the test strip, with only the last N fertilizer application occurring on the same date for both the field and the test strip (Table 4). On the day of the second monitoring (March 25), the weather forecast suggested that it would not rain during the next two weeks. He followed the recommendation but admitted, during the debriefing, that he had doubts because he knew there was a dry period coming. The most motivated farmers (including the example presented in table 4) measured yield and protein content on the test strip and found the results to be similar to those obtained for the rest of the field managed by classical fertilizer application practices. The similar results obtained with less N fertilizer raised questions about the efficiency of usual management practices and increased the interest of the farmers in the new method for managing N fertilizer application (Table 5).

Table 4. Comparison between usual practices (Field) and management strategies implemented with the prototype (Test), for 1 farm in Normandy

NNI	Date						
	March 7	March 25	April 13	April 28	May 7	May 13	May 30 (Flowering)
Field	1.05	1.2	1.2	1.1	1.06	1	0.92
Test	0.95	0.92	0.86	0.83	0.98	0.96	1
	N splitting strategy ((kg N ha ⁻¹))						Total N rate
	March 7	March 25	April 13	April 28	May 7	May 13	May 30 (Flowering)
Field	40	80	0	0	0	42	162*
Test 1	0	0	40	40	0	40	120

*The provisional N rate calculated with the balance-sheet method was 163 kg N ha⁻¹ for a target yield of 8 t ha⁻¹

3.3.2. Problematic situations requiring improvements to the prototype

The major limitation of the prototype identified by users was the time and labor required for NNI measurement. This would be problematic if the method were applied to more than one field on the farm. During the debriefing, two approaches to extending this method to whole-farm scale were discussed. In the first, extrapolation rules could be defined, to limit the number of measurements required. However, users highlighted the risks and uncertainties associated with the extrapolation of measurements to other fields, as is currently the case for soil analyses to estimate soil N content at the end of winter. The second would be realistic only if more convenient tools, such as satellites, as in the Farmstar® method, or on-board sensors, such as the N-Sensor®, could provide information about crop NNI. This approach involved the development of alternative means of obtaining NNI more rapidly than by in-field measurement with a hand-held chlorophyll meter.

3.3.3. Unexpected uses of the method suggested by users

Users envisaged additional potential uses of the method, such as following the dynamics of both crop N nutrition and soil N supply. They suggested that regular NNI monitoring could provide information about N dynamics in the crop. An increase in NNI between two measurements would imply that the

plant was taking up N whereas a decrease would imply that there was no more available N (Table 5). The users rapidly adopted the idea of monitoring NNI as an indicator of N supply. They were confident that this indicator would help them to manage N fertilizer applications more efficiently with respect to crop requirements (Table 5).

Finally, users saw the prototype as an opportunity to learn and progress in their practices (Table 5). They used the prototype to explain and understand N dynamics, and to justify the implementation of practices different from those they usually employed. The measurement of NNI provided farmers with a means of assessing their practices (i.e. do these practices keep the NNI above the minimum NNI path?). If NNI values were not consistent with their expectations, they could build on this experience to improve their practices the following year.

Table 5. Excerpt from the collective debriefing with farmers and advisors in the two regions in which the prototype was tested

	<i>New Aquitaine</i>	<i>Normandy</i>
<i>Farmers' interest in the method for managing N fertilization</i>	"With less fertilizer, I achieved similar yield and protein content, raising questions about the lower N rates applied on the test strip and the final result" (Farmer) "I just started to see the double-density band brighten, but the measurement was high enough to wait. I applied N on the field but not on the test strip, and, in fact, the NNI of the test strip did not fall" (Farmer)	"On April 15th, I applied 60 kg N ha⁻¹ on the test strip, and 95 on the field, but the NNI measurements were the same. It's interesting this difference in rates but not in NNI" (Farmer) "Wheat can be light green to such a degree that it's frightening, making us believe that we should apply N fertilizer, but with the measurement I saw that there was no need to apply N. So we wait a little, and as soon as the measurement drops below the threshold, we apply fertilizer and it becomes green again, as green as its neighbors" (Farmer) "It made me think. Where I managed according to the prototype, I applied less N, and today, the NNI is the same on the test strip and on the field, which received 40 kg N ha⁻¹ more" (Farmer)
<i>Following of soil N supply and crop N dynamics</i>	"I did not apply N fertilizer, but the NNI did not drop. That means that there was sufficient N in the soil" (Farmer)	"It is interesting to have lots of measurements, because that shows whether NNI is increasing or decreasing, and how it changes" (Advisor) "What is interesting with the measurement of NNI is that it gave information about the soil N supply available to the plant" (Farmer) "It is highly relevant to measure the NNI, because we can apply N fertilizer when the crop needs it" (Farmer) "Visually, I thought there was a nitrogen deficiency, but in the end, according to the measurement and the decision rules, there was still no need to apply fertilizer, so I waited" (Farmer)
<i>Favoring learning process</i>	"The advantage over existing methods and tools, which are highly standardized, is that we can incorporate technical elements. NNI measurement is concrete and the NNI path is a good technical point of reference" (Advisor)	"When learning this method, and it is what I felt with you, you have to make an effort to forget about N rates, the total N rate and what has already been applied and to focus only on the measurement of NNI [...] If we use this method, we cannot combine it with other tools because they are based on the objective of non-limiting N" (Advisor)

4. Discussion

4.1. A fertilization method establishing a new paradigm

The new method for managing N fertilizer applications explored here differs from the current paradigm of N fertilization, based on the balance-sheet method, in several ways:

- The balance-sheet method aims to calculate a total N application rate from first principles (Hébert, 1969), whereas the total N rate obtained with our method results from the real-time estimation of several N rates depending on crop N status;
- The balance-sheet method determines the technical optimum rate of N application (COMIFER, 2013), whereas our method determines the most robust N application rate to maintain crop N status above a minimum NNI path while limiting N losses to the environment;
- The balance-sheet method was developed on the basis of historical soil science knowledge, and aims to provide a precise estimate of soil N supply (Hébert, 1969; Rémy and Hébert, 1977), whereas our method is based on a plant indicator and, during the workshop, soil indicators were used only late in the process;
- The balance-sheet method assumes non-limiting N nutrition throughout the crop cycle, whereas our method takes into account the benefits of tolerating some periods of N deficiency (Meynard *et al.*, 2002).

We showed that the management strategies implemented with the prototype differed from usual practice. Use of the prototype delayed the first N application, which should increase apparent nitrogen recovery and decrease N losses (Limaux *et al.*, 1999). As a result, periods of N deficiency are tolerated, although the farmers admitted that this was not always easy (Table 5). The rates of N fertilizer application were lower, which is promising for attempts to decrease the energy and monetary costs of fertilizer applications without damaging productivity.

4.2. Prospective uses of the method

Both users and designers can benefit from exchanges about possible ways of using the method during the design process (Béguin, 2003). Such exchanges can also prevent the failure of the method when applied in practice (McCown, 2001; Prost *et al.*, 2016). At that stage, the design is not finished and the ways in which users suggest using it can contribute to improving the prototype (Béguin, 2003). We initiated discussions on possible uses of the method, by organizing the last meeting with the workshop team around the discussion of two proposals from two different future users.

The first approach was based on a model-based decision tool. Estimates of N fertilizer rates could be updated regularly through model simulation and the real-time adjustment of crop needs on the basis of plant measurements. This would require plant measurements to be made by an external agent (through drone or satellite technologies), with transmission of the N application rate to be used in real time to

the farmer. The main advantages of this approach are that (i) the farmer has fewer measurements to make and the method can thus be extended to all the fields of the farm, provided that costs are not too high, and (ii) the calculation is centralized to facilitate updating.

The second approach focused on favoring the learning process through the new fertilizer management method. During the test, farmers discussed N dynamics and fluxes. They saw the measurement of a plant indicator as a relevant means of achieving an understanding of these fluxes, accounting for changes in practice. The favoring of the learning process with this method is dependent on the existence of a tool directly used by farmers. This would enable farmers to compare visual observations with other measurements, enabling them to take decisions with a full awareness of their relevance to N dynamics and the agronomic situation.

These presentations brought two possible future uses of the method into sharp contrast: a decision rule for farmers derived from a tool based on heavy models that is not directly used by farmers, and a decision rule built by farmers themselves, dependent on measurements they make and data they can interpret. These two scenarios, based on the same method, valorize the strengths of this method in different ways corresponding to two alternative visions of the role of farmers (Lemery, 2003). On the one hand, there is a modern conception of the role of the farmer oriented towards precision agriculture and prioritizing a simplification of tasks. However, modern tools and attempts to save time result in the decisions of the farmer being dictated directly by the decision support tools, with the knowledge underlying the decision being held by the structure providing the farmer with advice. On the other hand, there is a more open conception of the role of the farmer based on the desire to develop local solutions adapted to the diversity of situations, in which learning-based approaches are particularly important, with farmers agreeing to devote time to learning. The term was not actually used by Lemery (2003), but we can identify here all the hallmarks of the agroecological approach (Francis *et al.*, 2003).

4.3. An innovative design process taking users and situations of use into account

A major reason for the poor adoption of science-based models by farmers and advisors is that they are usually based on researchers' representations and researchers frequently have a viewpoint different from that of users (Cerf, 1996; Meynard *et al.*, 2002). This difference of perspective applies to the balance-sheet method (Ravier *et al.*, 2016). We aimed to implement a process to overcome such discrepancies between designers and future users of an innovative fertilizer management method. One original features of this design process was the combination of KCP workshops (based on C-K theory, Hatchuel and Weil, 2009) with user involvement throughout the project. C-K theory has already been used as a framework for exploring innovative concepts relating to agricultural issues (Berthet *et al.*, 2016). However, as suggested by Cerf *et al.* (2012), the design of innovative decision support tools in agricultural science requires an additional space: the user space (U). In our design approach, we

enriched the U space in several ways: 1) through a diagnosis of the uses of the model, which helped us to establish exploratory conceptual axis and new assessment criteria; 2) by coupling the diagnosis with the workshop: to orientate the exploration towards issues raised by users. Furthermore, the leader of workshop used elements from the diagnosis to prevent fixation effects. In addition, some of the workshop participants were, as advisors, users of fertilizer management methods in direct contact with farmers. This increased the desire to take users and the situations of use into account; 3) through prototype testing, which provided feedback about the relevance of the method for supporting the decisions made by advisors and farmers. Indeed, the U space is a relevant space in which to propose and discuss new attributes and to determine whether they merit further exploration. The inclusion of a user space within the framework of C-K facilitates a shift in the design paradigm, such that users' needs orient and re-orient the design (Cerf *et al.*, 2012). This dialog-based approach can bridge the gap between theory and practice (McCown, 2001). Favoring exchanges between researchers and users makes it possible to take the users' representation of the problem into account whilst bypassing previous failed interventions by scientists in farmers' practices (Prost *et al.*, 2012). The results of prototype testing highlighted changes in practices that were well received, with enthusiasm, by farmers and advisors. For example, the suggestion of new uses of the method (e.g. following NNI dynamics to obtain information about N availability to the plant or using the plant indicator to follow soil N dynamics) by users revealed that they had appropriated the tool and were using it to understand their situation. Furthermore, the prospective uses presented by potential future users suggested that they were interested in developing the method as they found it relevant to their situations and concerns.

4.4. Innovative ways of using models and theories

Agronomists do not usually involve users in the design process, through the diagnosis of uses and testing in the working conditions of the users. Generally, within the design process, requirements are formulated through agronomic diagnosis and methods are assessed through experiments (Cerf *et al.*, 2012). However, integrating users in the research project makes it possible for non-sociologists to appreciate the social dimension of the management system (McCown, 2001). Agronomy is not equipped for such an analysis of uses of the method. This part of the study was therefore based on expert advice from ergonomists (Cerf and Meynard, 2006).

Knowledge about the minimum NNI path was obtained with receiver-operating characteristic curve (ROC) methodology, which has already been used to compare the accuracy of indicators in agricultural science (Makowski *et al.*, 2005). We identified the NNI path most accurately discriminating between treatments with and without yield losses, using the Youden index (Youden, 1950), one of the principal summary statistics from ROC analysis used to select optimal threshold values for biomarkers for the classification of disease status in medicine (Fluss *et al.*, 2005; Ruopp *et al.*, 2008). We also used an original strategy for using an existing model to meet the needs of design.

In most examples of model-based design, models are used to compare and evaluate different alternative cropping systems (Rossing *et al.*, 1997; Bergez *et al.*, 2010). Past studies of N management at the field level, have used models to optimize N fertilization (Meynard *et al.*, 2002; David *et al.*, 2004). However, we aimed to provide decision rules that were robust to uncertainties about the weather. The mathematical framework of viability theory (Aubin, 1991) is appropriate for assessments of management options when environmental conditions are uncertain (Accatino *et al.*, 2014; Sabatier *et al.*, 2015). This work led to an original way of using models as tools for design and an original way of using viability theory to build decision rules that are robust in the face of uncertainty about the weather (Ravier *et al.*, in preparation, Chapter 4).

5. Conclusion

Our design process combined a diagnosis of the uses of existing tools, participatory workshops, knowledge generation, model-based prototyping and prototype testing. This conceptual framework was used to design an innovative method for determining N fertilizer applications. Based on an analysis of the limitations expressed by users, we formulated an exploratory conceptual axis and new assessment criteria leading to the exploration of innovative concepts and avoiding fixation effects. The diagnosis of uses was relevant as it made it possible to formulate the requirements of users and to direct the exploration so that users' representations of the problem were taken into account early in the design process. As modeled by C-K theory, the innovation emerged from dual expansion of the concept space and the knowledge space; this expansion was influenced by the involvement of users in the design process. It required the generation of actionable knowledge, defined as knowledge supporting the implementation of new practices, and the diversification of scientific resources to find a method for addressing the new questions that arose during the exploration. Finally, prototype testing showed that the users had appropriated the method to support their practices and the decision-making process for managing N fertilizer application. The preliminary results obtained with this approach are promising as they suggest that it should be possible to maintain production levels whilst tolerating periods of N deficiency. They also suggest that a satisfactory production performance can be achieved with lower N rates, which should be less damaging to the environment.

Acknowledgments

We thank the farmers and advisors who participated in the diagnosis of uses and prototype testing. We thank the experts (Marianne Cerf, Laurence Guichard, Pierre Cellier, Sylvie Recous, Marc Bardinal, Eric Masson, Philippe Braun, Michel Bonnefoy, Olivier Deudon) who participated in the workshops and made major contributions to the emergence of the new concept. We thank Marc Lambert from Yara for lending us chlorophyll meters. We thank *Arvalis-Institut-du-végétal*, and ADEME (*Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*) for funding this study. This study was part of the REACCTIF project. We thank Julie Sappa from Alex Edelman & Associates for reviewing the English.

References:

- Accatino, F., Sabatier, R., De Michele, C., Ward, D., Wiegand, K., Meyer, K.M., 2014. Robustness and management adaptability in tropical rangelands: a viability-based assessment under the non-equilibrium paradigm. *Animal* 8, 1272–1281.
- Agogué M., Arnoux, F., Brown, I., Hooge, S., 2013. Introduction à la conception innovante: Éléments théoriques et pratiques de la théorie C-K, 2013. . Presses des Mines-Transvalor, Paris. 58 p.
- Aubin J-P. 1991. Viability Theory. Birkhäuser Boston, Boston. Available from <http://link.springer.com/10.1007/978-0-8176-4910-4> (accessed December 4, 2015).
- Béguin, P., 2003. Design as a mutual learning process between users and designers. *Interacting with Computers* 15, 709–730. doi:10.1016/S0953-5438(03)00060-2
- Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32, 3–9. doi:10.1016/j.eja.2009.06.001
- Berthet, E.T.A., Barnaud, C., Girard, N., Labatut, J., Martin, G., 2016. How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. *Journal of Environmental Planning and Management* 59, 280–301. doi:10.1080/09640568.2015.1009627
- Billen G., Garnier J., Benoît M., Anglade J., 2013. La cascade de l’azote dans les territoires de grande culture du Nord de la France. *Cahiers Agricultures* 22, 272-281.
- Cerf, M., 1996. Approche cognitive de pratiques agricoles : intérêts et limites pour les agronomes. *Nature Sciences Sociétés*, 4 (4), 327-340.
- Cerf, M., Meynard, J.M., 2006. Les outils de pilotage des cultures : diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception. *Natures Sciences Sociétés* 14, 19–29. doi:10.1051/nss:2006004
- Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., Meynard, J.-M., 2012. Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 899–910. doi:10.1007/s13593-012-0091-z
- COMIFER (2013) Calcul de la fertilization azote. Guide méthodologique pour l’établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. http://www.comifer.asso.fr/images/stories/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Recous, S., Dorsainvil, F., 2004. Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* 21, 249–266. doi:10.1016/j.eja.2003.09.003
- Elmqvist, M., Segrestin, B., 2009. Sustainable development through innovative design: lessons from the KCP method experimented with an automotive firm. *International Journal of Automotive Technology and Management* 9, 229. doi:10.1504/IJATM.2009.026399
- Fluss, R., Faraggi, D., Reiser, B., 2005. Estimation of the Youden index and its associated cutoff point. *Biometrical Journal* 47, 458–472. doi:10.1002/bimj.200410135
- Francis, C., Lieblein, G., Gliessman, S., Breland, T.A., Creamer, N., Harwood, R., Salomonsson, L., Helenius, J., Rickerl, D., Salvador, R., Wiedenhoef, M., Simmons, S., Allen, P., Altieri, M., Flora, C., Poincelot, R., 2003. Agroecology: The ecology of food systems. *Journal of Sustainable Agriculture* 22, 99–118. doi:10.1300/J064v22n03_10
- Hatchuel, A., Weil, B., 2009. C-K design theory: an advanced formulation. *Research in Engineering Design* 19, 181–192. doi:10.1007/s00163-008-0043-4

- Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., 2009. Design theory and collective creativity : a theoretical framework to evaluate KCP process. International conference on engineering design, ICED'09, August 2009, Stanford University, Stanford, CA, USA, 277-288
- Hébert, J.C., 1969. La fumure azotée du blé. Bulletin technique d'information. 244, 755-766.
- Hooge, S., Béjean, M., Arnoux, F., 2016. Organisation for radical innovation : the benefits of the interplay between cognitive and organisational processes in KCP workshops. International Journal of Innovation Management 20, 1640004. doi:10.1142/S1363919616400041
- Jeuffroy, M.-H., Bouchard, C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. Crop Science 39, 1385-1393. doi:10.2135/cropsci1999.3951385x
- Jeuffroy, M.-H., Recous, S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. European Journal of Agronomy 10, 129-144.
- Kusunose, Y., Mahmood, R., 2016. Imperfect forecasts and decision making in agriculture. Agricultural Systems 146, 103-110. doi:10.1016/j.agsy.2016.04.006
- Lecomte, C., Prost, L., Cerf, M., Meynard, J.-M., 2010. Basis for designing a tool to evaluate new cultivars. Agronomy for Sustainable Development 30, 667-677. doi:10.1051/agro/2009042
- Le Masson, P., Hatchuel, A., Weil, B., 2011. The interplay between creativity issues and design theories: A new perspective for design management studies? Creativity and Innovation Management, 20(4):217-237.
- Lemaire, G., Nicolardot, B., 1997. Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. INRA (Eds.), Paris. 336 p.
- Lemaire, G., van Oosterom, E., Jeuffroy, M.-H., Gastal, F., Massignam, A., 2008. Crop species present different qualitative types of response to N deficiency during their vegetative growth. Field Crops Research 105, 253-265. doi:10.1016/j.fcr.2007.10.009
- Lemery, B., 2003. Les agriculteurs dans la fabrique d'une nouvelle agriculture. Farmers in the making of a new agriculture. Sociologie du travail 45, 9-25
- Limaux, F., Recous, S., Meynard, J.-M., Guckert, A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. Plant and Soil 214, 49-59.
- Makowski, D., Taverne, M., Bolomier, J., Ducarne, M., 2005. Comparison of risk indicators for *Sclerotinia* control in oilseed rape. Crop Protection 24, 527-531. doi:10.1016/j.cropro.2004.10.003
- McCown, R.L., 2001. Learning to bridge the gap between science-based decision support and the practice of farming: Evolution in paradigms of model-based research and intervention from design to dialogue. Australian Journal of Agricultural Research, 52, 549-57. doi: 10.1071/AR00119
- Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? Agronomie 22, 817-829. doi:10.1051/agro:2002064
- Meynard, J.M., Dedieu, B., Bos, B., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices, in: Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B., (Eds.) Farming systems research into the 21st century : The new dynamic. Springer, Berlin, 405-429.
- Ministry of Ecology (2015) Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. NOR: DEVL1134069A. Version du 24 juin 2015
- Newman, S., Lynch, T., Plummer, A.A., 1999. Success and failure of decision support systems: learning as we go. Proceedings of the American society of Animal science, 12 p.

- Prost, L., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., 2012. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 581–594. doi:10.1007/s13593-011-0059-4
- Prost, L., Berthet, E.T.A., Cerf, M., Jeuffroy, M.-H., Labatut, J., Meynard, J.-M., 2016. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Research in Engineering Design*. doi:10.1007/s00163-016-0233-4
- Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 79, 31–40. doi:10.1016/j.njas.2016.10.001
- Recous, S., Machet, J.M., 1999. Short-term immobilisation and crop uptake of fertiliser nitrogen applied to winter wheat: effect of date of application in spring. *Plant and Soil*, 206, 137-149. doi:10.1023/A:1004377006602
- Rémy, J.-C., Hébert, J., 1997. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. 63, 700-710.
- Rossing, W.A.H, Meynard, J.M, van Ittersum, M.K., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: cases studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy* (7), 271-283. 1161-0301/97/\$17.00
- Ruopp, M.D., Perkins, N.J., Whitcomb, B.W., Schisterman, E.F., 2008. Youden index and optimal cut-point estimated from observations affected by a lower limit of detection. *Biometrical Journal* 50, 419–430. doi:10.1002/bimj.200710415
- Sabatier, R., Oates, L.G., Jackson, R.D., 2015. Management flexibility of a grassland agroecosystem: A modeling approach based on viability theory. *Agricultural Systems* 139, 76–81. doi:10.1016/j.agsy.2015.06.008
- Sutton, M.A. (Ed.), 2011. *The European nitrogen assessment: sources, effects, and policy perspectives*. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York.
- Youden, W.J., 1950. Index for rating diagnostic tests. *Cancer* 3, 32–35. doi:10.1002/1097-0142(1950)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3

Chapitre III - Production de connaissances actionnables : Etablissement d'une trajectoire seuil de nutrition azotée

La remise en cause d'un raisonnement basé sur un objectif de rendement a conduit à re-questionner la manière de prendre en compte et d'estimer les besoins en azote de la plante. Le processus d'exploration du concept innovant : « une méthode de raisonnement sans objectif de rendement », a fait émerger le besoin d'une nouvelle connaissance sur la trajectoire de nutrition azote minimale, avec des carences, tolérable sans pénalité sur le rendement et la teneur en protéine. Jusqu'à là, la fertilisation azotée a surtout visé à maximiser la production du blé. Les études antérieures sur les carences en azote ont permis d'améliorer significativement notre compréhension du fonctionnement du système sol-plante-azote, cependant elles n'ont pas permis d'aboutir à des connaissances permettant la mise en œuvre de stratégies de fertilisation avec des périodes de carence. Il manque en fait, une connaissance plus précise sur ces trajectoires avec carences tolérables. L'INN est un indicateur approprié pour la caractérisation des carences en azote. A partir d'une grande diversité de données expérimentales, avec des suivis d'INN du stade Epi 1cm à la floraison, notre objectif était d'identifier la trajectoire d'INN minimum en dessous de laquelle il n'y a pas de risque que la carence en azote soit préjudiciable au rendement. Les données expérimentales ont été triées en deux groupes : les traitements pour lesquels on observe une perte de rendement par rapport au maximum obtenu sur le même essai et les traitements pour lesquels le rendement n'est pas différent du maximum. Nous avons adapté l'analyse des courbes « receiver operating characteristics » (ROC) à notre étude pour identifier la trajectoire d'INN qui discriminait le mieux les traitements entre les deux groupes. Nous montrons que le blé peut tolérer des carences en azote, mais que l'intensité des carences doit diminuer au cours du cycle. Nous avons ensuite regardé l'effet sur la teneur en protéine et l'efficacité d'utilisation de l'azote sur des traitements triés selon cette trajectoire minimum. Nous discutons finalement la nature de cette connaissance : Inscrite dans une démarche de conception qui intègre les utilisateurs une des caractéristique de cette connaissance est qu'elle est actionnable et qu'elle pourrait faciliter le processus de transfert de la nouvelle méthode proposée dans les pratiques agricoles.

Ce travail a fait l'objet d'un article scientifique soumis en 2016 dans la revue *European Journal of Agronomy*.

Early nitrogen deficiencies favor high yield, grain protein content and N use efficiency in wheat

Clémence Ravier^{*1,3}, Jean-Marc Meynard², Jean-Pierre Cohan³, Philippe Gate⁴, Marie-Hélène Jeuffroy¹

¹ UMR211 Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

² UMR1048 SAD-APT, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

³ Arvalis-Institut-du-Végétal, Station expérimentale de la Jaillière, 44370 La Chapelle Saint-Sauveur, France

⁴ Arvalis-Institut-du-Végétal, 3 rue Joseph & Marie Hackin, 75116 Paris, France

^{*}Corresponding author: Clémence Ravier

Postal address: Campus de Grignon, Bâtiment EGER, UMR Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France

E-mail address: clemence.ravier@inra.fr

Abstract: Nitrogen fertilization has been widely studied in wheat (*Triticum aestivum* L.), with a view to maximizing local yields and obtaining high grain protein contents. It has long been accepted that nitrogen nutrition must be non-limiting throughout the crop cycle for these targets to be reached. However, studies over the last 20 years have shown that some periods of N deficiency are detrimental, whereas others have no impact on grain yield. There is, therefore, still a need to define the precise N deficiency path that can be tolerated. Nitrogen nutrition index (NNI) is an appropriate indicator of N deficiency. Based on experiments with wheat crops showing various patterns of NNI dynamics from the start of stem elongation to flowering, we aimed to identify a minimum nitrogen nutrition path, including periods of N deficiency, defining the threshold above which there is no detrimental impact on wheat crop yield. We used experimental data from 18 site-year experiments, each including 1 to 14 cultivars and 2 to 8 fertilization strategies, with determinations of crop NNI at four growth stages (Z30, Z32, Z39 and Z60 on the Zadoks scale). Experimental treatments were assigned to two groups: those with and without yield loss due to N fertilization strategy, relative to the maximum yield in each trial. Using receiver operating characteristics curve analysis, we identified the NNI path best distinguishing between the two groups of treatments. We found that the lowest acceptable NNI value (i.e. the lowest value for which there was no yield loss), increased during the crop cycle. We characterized periods of N deficiency during vegetative growth that did not lead to a decrease in yield or grain protein content, and even some periods in which the deficiency improved nitrogen use efficiency. Finally, we discuss how this threshold NNI path could be used, during the growth period, to determine when to apply fertilizer on the basis of real-time crop N status monitoring.

Key words: *Triticum aestivum*, nitrogen nutrition index, yield gap, N use efficiency, grain quality, Receiver-operating characteristics curve.

1. Introduction

It is widely accepted that, for cereal crops, the optimization of tradeoffs between yield, grain quality and environment requires fertilization strategies achieving synchrony between nitrogen (N) supply and crop requirements, taking temporal and spatial variability into account (Shanahan *et al.*, 2008; Cassman *et al.*, 2002; Schröder *et al.*, 2000). Worldwide, the N use efficiency of cereal-based systems is low (Ladha *et al.*, 2005; Raun and Johnson, 1999), and this poor efficiency is frequently attributed to the poor synchrony between N fertilizer application and crop requirements, and a failure to adapt N management strategy to growth and weather conditions in real time (Limaux *et al.*, 1999; Cassman *et al.*, 2002; Mohammed *et al.*, 2013). As the plant itself is considered to be a relevant indicator of N availability from any source within the growing season (Schröder *et al.*, 2000; Olf *et al.*, 2005), strategies based on plant indicators have been developed for the adjustment of N fertilizer applications during the crop cycle.

Crop N status is a function of both crop biomass and N concentration, and can be quantified by calculating the nitrogen nutrition index (NNI) (Lemaire and Gastal, 1997). NNI is the ratio between the actual N concentration of the aerial parts of the crop and their critical N concentration, defined as the minimal concentration required for the maximum production of aerial dry matter (Justes *et al.*, 1994). As described by Meynard *et al.* (1997), NNI meets many of the criteria required for a plant N nutrition indicator. It is specific, as it varies only with N nutrition, and sensitive, as it reacts to changes in N nutrition, particularly in cases of marked prolonged deficiency. It can be used to describe N deficiency dynamics, to detect situations in which nutrition is involved in yield loss, and to characterize the effect of N deficiency on the number of seeds formed (Jeuffroy and Bouchard, 1999; Lemaire and Meynard, 1997). NNI at flowering is a determinant N indicator for grain number and is highly correlated with grain yield (Jeuffroy and Bouchard, 1999). NNI has been used to define threshold values for managing the final N application of the growing season on wheat crops, and monitoring tools have been set up to trigger N fertilizer as soon as the N concentration drops below the critical concentration before flowering (Justes *et al.*, 1997a). However it has been shown that N concentration can temporarily fall below the critical curve during vegetative growth with no effect on yield, so long as the N deficiency ceases at flowering (Jeuffroy and Bouchard, 1999). Moreover, as shown by Justes *et al.* (1997a), crop NNI is also a relevant indicator for grain protein content that is dependent on the amount of N taken up before flowering and N supply during grain filling. However, this knowledge is not directly useful for the management of fertilizer applications, as the precise NNI paths causing no damage to either grain yield or grain protein content remain unknown.

Approaches to increase nitrogen use efficiency (NUE) to prevent N losses to the environment remain challenging. NUE has been shown to increase as soon as N fertilizer is applied, in conditions of high crop demand (Limaux *et al.*, 1999), and when N application is followed by rainfall (Cellier *et al.*, 2013). NUE tends to decrease with increasing N application rates (Cassman *et al.*, 2002). NUE is

generally lower for early applications (Recous and Machet, 1999). Thus, by accepting early periods of N deficiency, N application could be delayed, thereby increasing NUE over the whole crop cycle. Moreover, some N fertilization strategies involving late N applications have yielded promising results for NUE, yield and grain protein content (Zebarth *et al.*, 2007; Meynard *et al.*, 2002).

We analyzed the relationship between N nutrition paths, characterized by successive NNI measurements at different growth stages during the crop cycle, and yield, with a view to identifying the NNI thresholds, throughout the crop cycle, above which N nutrition is not detrimental to yield. We then analyzed the relevance of this N nutrition path for increasing grain protein content and NUE over that for crops with an NNI greater than 0.9 for the entire crop cycle.

2. Materials and Methods

2.1. Experimental data

A database was constructed, collating data from experiments carried out at six different sites in France: Le Magneraud (Charente-Maritime, 46 °N, 0 °W), Grignon (Yvelines, 48.9 °N, 1.9°W), Boigneville (Essonne, 48 °N, 2.8 °W), Rots (Calvados, 49 °N, 0°W), Montans (Tarn, 43 °N, 1 °W), Labergement (Côte-d'Or, 47.3 °N, 5.3°W). These experiments were carried out from 1992 to 2002 (Table 1). In each experiment, two to eight fertilization strategies were tested, with various N application rates and timings (Table 1), resulting in a large range of N nutrition dynamics. All but one of the experiments were performed with mineral N fertilizer, the remaining experiment being conducted with organic fertilizer (Table 1). Twenty different wheat cultivars were used in the various experiments. According to the French classification, these cultivars were either 'common' or 'superior' in terms of their potential grain protein content and ability to fulfill bakery requirements. Not all cultivars and fertilization strategies were tested in each experiment. However, in most of the experiments, the same fertilization strategy was applied to multiple cultivars. We thus collected data for 215 treatments from 63 different site-year-cultivar combinations. Detailed descriptions of the experiments conducted at Grignon can be found in Jeuffroy and Bouchard (1999), David *et al.* (2004), Prost and Jeuffroy (2007), and Barbottin *et al.* (2005).

Three or four replicates of each treatment were used, depending on the experiment. Crop biomass and plant N concentration were measured for each replicate, on plant samples taken from an area of 0.175 m². Each sample was oven-dried at 80°C for 48 or 72 hours and weighed. N concentration was determined by the Dumas method (Horwitz *et al.*, 1975). NNI was calculated for each replicate, from N concentration and the critical dilution curve (Justes *et al.*, 1994). NNI was measured at growth stages Z30, Z32, Z39 and Z60 on the Zadoks scale. We used mean values from the replicates for the 215 treatments, each characterized by a succession of four NNI values (NNI_{Z30}, NNI_{Z32}, NNI_{Z39}, NNI_{Z60}), dry grain yield (t ha⁻¹), total N applied (kg N ha⁻¹) and grain protein content (% of grain weight).

Table 1. Characteristics of the 215 (*) treatments recorded in the database: site, year and soil type of each trial, cultivars studied and nitrogen fertilization strategies (N rates applied (kg.ha⁻¹) at different growth stages on the Zadoks scale (Z25=tillering; Z30=beginning of stem elongation; Z32= second node detectable; Z37= flag leaf just visible; Z39=flag leaf out and Z45= boot just swollen). The year recorded is the year of harvest.

Site	Year	Soil	Cultivar	N strategies (kg N ha ⁻¹)						Total N rate
				Z ₂₅	Z ₃₀	Z ₃₂	Z ₃₇	Z ₃₉	Z ₄₅	
Montans	2002	Albic luvisol	Isengrain	50	85	0	0	85	0	220
				50	45	0	0	125	0	220
				50	120	0	0	0	0	170
Montans	2001	Albic luvisol	Isengrain	50	170	0	0	0	0	220
				50	85	0	0	85	0	220
				50	45	0	0	125	0	220
				50	120	0	0	0	0	170
				50	60	0	0	0	0	110
				50	0	0	0	0	0	50
Le Magneraud	2002	Rendzina	Recital; Rialto; Tremie	40	160	0	0	0	0	200
				40	40	0	0	120	0	200
Le Magneraud	2001	Rendzina	Recital; Rialto; Tremie	40	160	0	0	0	0	200
				40	40	0	0	120	0	200
Labergement	2001	Luvisol	Mercury; Recital; Tremie	40	190	0	0	0	0	230
				40	125	0	0	65	0	230
				40	65	0	0	125	0	230
Rots	2002	Albic luvisol	Recital; Rialto	45	125	0	0	0	0	170
				45	80	0	0	40	0	165
				45	45	0	0	70	0	160
Rots	2001	Albic luvisol	Isengrain; Tremie	50	185	0	0	0	0	235
				50	125	0	0	60	0	235
				50	60	0	0	125	0	235
Boigneville	2001	Albic luvisol	Campremy; Charger; Isengrain; Hynoprecia; Oratorio; Recital; Shango; Soissons	40	200	0	0	60	0	300
				40	120	0	0	60	0	220
				40	60	0	0	120	0	220
				40	60	0	0	60	0	160
Boigneville	2001	Albic luvisol	Recital	50	230	0	0	0	0	280
				50	170	0	0	0	0	220
				50	85	0	0	85	0	220
				50	45	0	0	125	0	220
				50	110	0	0	0	0	160
Boigneville	2001	Albic luvisol	Cockpit	50	245	0	0	0	0	295
				50	185	0	0	0	0	235
				50	95	0	0	90	0	235
				50	45	0	0	140	0	235
				50	125	0	0	0	0	175
Boigneville	2001	Albic luvisol	Tremie	50	190	0	0	0	0	240
				50	130	0	0	0	0	180
				50	65	0	0	35	0	150
				50	35	0	0	65	0	150
				50	70	0	0	0	0	120
Boigneville	2000	Albic luvisol	Cockpit	50	160	0	0	0	0	210
				50	80	0	0	80	0	210
				50	40	0	0	120	0	210
				50	100	0	0	0	0	150
Boigneville	2000	Albic luvisol	Recital	50	210	0	0	0	0	260
				50	40	0	0	110	0	200
				50	150	0	0	0	0	200
				50	75	0	0	75	0	200
				50	90	0	0	0	0	140
Boigneville	2000	Albic luvisol	Tremie	50	170	0	0	0	0	220
				50	110	0	0	0	0	160
				50	55	0	0	55	0	160
				50	30	0	0	80	0	160
				50	50	0	0	0	0	100
Grignon	2002	Luvisol	Arche; Baltimore; Campremy; Dij;	0	60	60	0	80	40	240

			Galibier; Hynoprecia; Isengrain; Oratorio; Ornicar; Recital; Renan; Rumba; Soissons; Tremie	0	60	80	0	0	0	140
Grignon	2001	Luvisol	Arche; Campremy; Dij; Hynoprecia; Isengrain; Oratorio; Recital; Renan; Rumba; Soissons	0	60	0	0	0	0	60
				0	60	0	100	0	0	160
				0	60	0	100	80	0	240
Grignon	1999	Luvisol	Baltimore; Cockpit; Florence Aurore; Soissons; Tremie	0	60	100	0	100	0	260
				0	60	0	0	0	0	60
				0	0	0	100	0	100	200
				0	60	60	0	0	0	120
Grignon	1998	Luvisol	Arche (*)	60	100	50	50	0	0	260
				0	0	0	150	100	0	250
				60	0	0	0	150	0	210
Grignon	1998	Luvisol	Soissons	60	100	0	100	0	0	260
				0	0	150	0	100	0	250
				0	0	0	150	0	100	250
				60	0	0	0	150	0	210
				60	0	0	0	0	150	210
Grignon	1998	Luvisol	Soissons (<i>organic fertilizer</i>)	60	100	0	0	100	0	260
				0	0	0	100	0	0	100
				0	0	100	0	0	0	100
				0	100	0	0	0	0	100
				100	0	0	0	0	0	100
				80	0	0	0	0	0	80
				0	0	0	60	0	0	60
				0	0	60	0	0	0	60
				0	60	0	0	0	0	60
				60	0	0	0	0	0	60
Grignon	1996	Luvisol	Soissons	60	120	0	120	0	0	300
				60	80	0	0	100	0	240
				60	60	0	0	80	0	200
				60	60	0	0	0	0	120
				60	0	0	0	0	0	60
Grignon	1995	Luvisol	Soissons	60	120	120	0	0	0	300
				0	120	120	0	0	0	240
				60	0	120	0	0	0	180
				60	30	0	0	0	0	90
				60	0	0	0	0	0	60
Grignon	1992	Luvisol	Soissons	60	100	50	0	50	0	260
				60	0	0	0	100	0	160
				60	50	0	0	0	50	160
				60	100	0	0	0	0	160
				0	0	150	0	0	0	150

(*) For experiment “Grignon, 1998, Arche”, N application rates were not available for one N strategy. However, the corresponding NNI path and yield were used in the analysis.

2.2. Identification of experimental treatments displaying yield loss

Our aim was to separate treatments with yield loss due to N deficiency during the crop cycle from treatments without yield loss. However, no consensus yield threshold clearly distinguishing between these two types of treatment had ever been defined. Moreover, the diversity of the experiments resulted in a large range of least significant differences (ranging from 0.1 to 1.6 t.ha⁻¹) between the treatments with the highest yields and those with significantly lower yields, within experiments. We therefore defined: (i) the treatment resulting in the maximum yield for each experiment, and (ii) the difference between the yield obtained for each treatment and the maximum yield obtained in the same experiment. Treatments were then assigned to one of two subgroups on the basis of a comparison between this difference, referred to as the yield gap (YG), and a predefined yield gap threshold value (YG_{thresh}). YG_{thresh} is the level above which we considered yield loss to be significant. The use of this

threshold made it possible to differentiate between treatments resulting in yield loss ($YG > YG_{thresh}$), and treatments without yield loss ($YG \leq YG_{thresh}$). We did not fix YG_{thresh} as a single value, but instead used a range of thresholds, from $YG_{thresh}=0.1 \text{ t.ha}^{-1}$ to $YG_{thresh}=1 \text{ t.ha}^{-1}$, with increments of 0.1, to test the robustness of our analysis to yield gap value. Treatments were therefore assigned to subgroups 10 times, depending on the YG_{thresh} value.

2.3. Method for comparing the range of NNI paths according to yield loss

We then searched for the indicator best distinguishing between the two groups of treatments. The indicator (I) tested was the NNI path, consisting of a combination of four successive NNI values obtained at four different growth stages. For identification of the best threshold value for the NNI path (i.e. the I_{thresh} most accurately distinguishing between treatments “with yield loss” and “without yield loss”), we compared the measured NNI path for each experimental treatment (I_{meas}) with various theoretical threshold NNI paths (I_{thresh}) consisting of combinations of successive NNI values at the four growth stages considered (Z30, Z32, Z39 and Z60). We covered all possible combinations for I_{thresh} , by successively assigning all possible values, from 0.4 to 1, with increments of 0.1 (7 possible values of NNI) to NNI_{Z30} , NNI_{Z32} , NNI_{Z39} , and NNI_{Z60} . I_{thresh} is, thus, a four-dimensional indicator. We therefore constructed $7^4 = 2401$ theoretical NNI paths (i.e. 2401 I_{thresh}).

If one NNI value for I_{meas} was below the NNI for I_{thresh} at a particular growth stage, we considered $I_{meas} < I_{thresh}$. If all four values of I_{meas} were equal to or greater than the four values of I_{thresh} at each growth stage, we considered $I_{meas} \geq I_{thresh}$. Four different cases were observed:

- (1) $I_{meas} \geq I_{thresh}$; treatment in the subgroup without yield loss ($YG \leq YG_{thresh}$)
- (2) $I_{meas} \geq I_{thresh}$; treatment in the subgroup with yield loss ($YG > YG_{thresh}$)
- (3) $I_{meas} < I_{thresh}$; treatment in the subgroup without yield loss ($YG \leq YG_{thresh}$)
- (4) $I_{meas} < I_{thresh}$; treatment was in the subgroup with yield loss ($YG > YG_{thresh}$)

As we aimed to define a NNI path useful for decision support for N fertilizer management, we adapted the receiver operating characteristics (ROC) curve analysis widely used to compare indicators in agronomy. Within the ROC methodology (Hughes *et al.*, 1999; Makowski *et al.*, 2005), the results are usually tabulated in contingency tables and used to calculate:

- The true positive proportion (TPP), corresponding to the number of true positive treatments (those with $I_{meas} \geq I_{thresh}$) divided by the total number of treatments in the subgroup without yield loss;
- The true negative proportion (TNP), corresponding to the number of true negative treatments (those with $I_{meas} < I_{thresh}$) divided by the total number of treatments in the subgroup with yield loss.

TPP is referred to as the ‘sensitivity’ of the indicator tested, and TNP is considered to correspond to its ‘specificity’ (Makowski *et al.*, 2009). Sensitivity and specificity vary from 0 to 1, with lower values

indicating a lower accuracy of the indicator. A high sensitivity value indicates that the indicator accurately identifies treatments with NNI paths above I_{thresh} . A value of 1 for sensitivity indicates that, for all treatments with $I_{meas} < I_{thresh}$, yield loss occurs. A high specificity value indicates that the indicator accurately identifies treatments with NNI paths below I_{thresh} . A value of 1 for specificity indicates that no yield loss occurs for any of the treatments with $I_{meas} \geq I_{thresh}$.

We used the Youden Index (J) (Youden, 1950) to assess and interpret the accuracy of each I_{thresh} . This index is one of the main summary statistics in ROC analysis (Fluss *et al.*, 2005; Ruopp *et al.*, 2008). The maximum value of J (J_{max}) corresponds to the I_{thresh} best distinguishing between the two groups of treatments, with similar weights for the sensitivity and specificity of I_{thresh} (Youden, 1950). It defines the maximum effectiveness of an I_{thresh} (Ruopp *et al.*, 2008). J is calculated as follows:

$$J = \text{Sensitivity} + \text{Specificity} - 1 \quad \text{Eq. 1}$$

J varies from 0 to 1, with 0 indicating that the proportion of treatments with $I_{meas} \geq I_{thresh}$ is the same for both subgroups, and 1 indicating that there are no false predictions, either positive or negative, all treatments with $I_{meas} \geq I_{thresh}$ being assigned to the $YG < YG_{thresh}$ subgroup, and all treatments with $I_{meas} < I_{thresh}$ being assigned to the $YG > YG_{thresh}$ subgroup. Previous studies considered J values of 0.6 to indicate a moderate level of discrimination, and J values above 0.8 to indicate a high degree of discrimination (Fluss *et al.*, 2005; Ruopp *et al.*, 2008). In this study, we considered only I_{thresh} values resulting in a $J \geq 0.6$.

We first analyzed the results obtained for the 2401 I_{thresh} values for each YG_{thresh} separately. We then focused on those giving the highest Youden Index (J_{max}) in each YG_{thresh} group and focused in more detail on the most interesting I_{thresh} regardless of the YG_{thresh} considered. After identifying the most accurate I_{thresh} , we assessed grain protein content and N use efficiency for treatments with $I_{meas} \geq I_{thresh}$.

2.4. Analysis of grain protein content and nitrogen use efficiency with I_{thresh}

We investigated the grain protein content (GPC) and NUE responses of treatments above the I_{thresh} . We analyzed the response of treatments with $I_{meas} > I_{thresh}$ as a function of whether or not I_{meas} included a period of N deficiency. We considered treatments for which all NNI > 0.9 to have no N deficiency, as proposed in Jeuffroy and Bouchard (1999). If one of the four NNI values was below 0.9, the treatment was considered to include a period of N deficiency. A comparison of treatments with and without N deficiency was performed to determine whether some N deficiencies had positive effects on grain protein content and NUE. We estimated mean grain protein content, mean relative NUE and mean N rate. Mean values were compared on the basis of the least significant difference (LSD) at the 0.05 probability level, in Fisher's LSD tests.

2.4.1. Grain protein content

No GPC measurements were available for 17 treatments in the database. In addition, this analysis included only selected experiments in which at least one treatment resulted in a GPC above 11.5%, the

minimum value required for the targeted market. If GPC was below 11.5% for all the treatments in the trial, then the entire trial was removed from the analysis of the relationship between NNI path and GPC. In most cases, the cultivars removed were registered as being of ‘common’ quality. The final analysis was carried out on GPC data for 173 treatments from the initial database.

2.4.2. Nitrogen use efficiency

The following widely used equation (Ladha *et al.*, 2005) was applied for the quantification of nitrogen use efficiency (NUE):

$$NUE_i = \frac{Yield_i}{N_i} \quad Eq. 2$$

where N_i is the total amount of N fertilizer applied to treatment i. No information about the total amount of N applied was available for one treatment in the initial database. This treatment was therefore removed from this analysis. NUE may differ between two trials, due to experimental conditions, such as the preceding crop, causing variations of soil mineral N availability, and affecting the optimal rate of N application. For comparisons of the NUE values of all treatments from the different trials, we used an efficiency ratio calculated as the ratio of NUE_i for the treatment concerned to the NUE of the treatment giving the highest yield in the trial considered, rNUE. Thus, NUE is expressed relative to experimental conditions, making it possible to compare the performance of treatments from different experimental conditions.

3. Results

3.1. Experimental results

The set of experimental treatments resulted in a large diversity of NNI levels at each growth stage (Fig.1). The number of treatments for which a N deficiency was registered was not marginal, and the full range of N deficiencies (from 0.4 to 1) was observed at each growth stage. Dry grain yield ranged from 4.8 to 14.8 t.ha⁻¹, with a rather high mean value, at 9.7 t.ha⁻¹ (Fig.2). Grain protein content ranged from 6.54 to 20 %, with a mean value of 11.12%. GPC reached the 11.5% required for the targeted market in almost half the treatments (Fig.2). N fertilizer application rates ranged from 50 to 300 kg.N.ha⁻¹ (Fig.2). Finally, a large range of NUE values was recorded, from 30 to 180% (Fig.2).

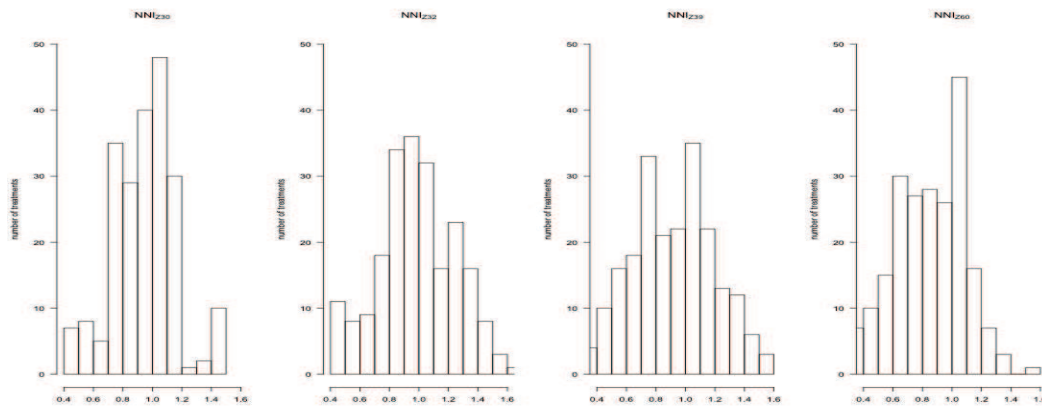


Fig. 1. Distribution of NNI for the 215 experimental treatments, for each growth stage (Z30, Z32, Z39, Z60).

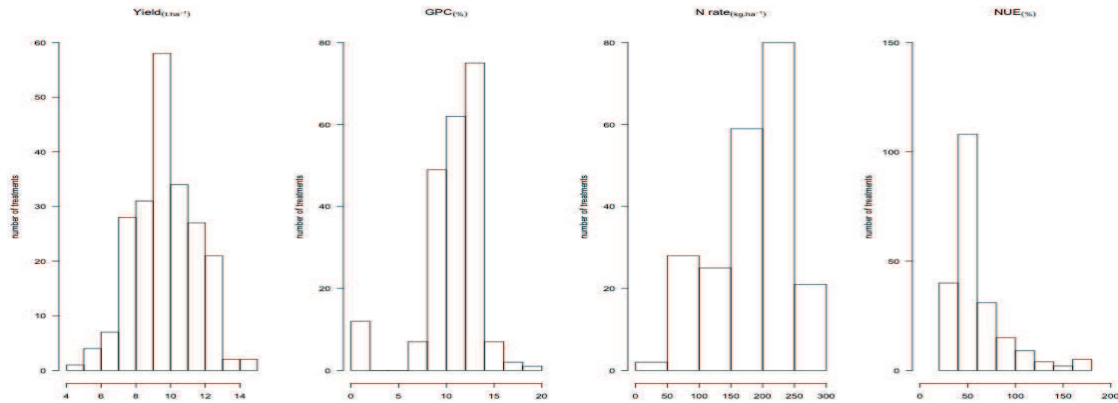


Fig. 2. Distribution of yield (t.ha^{-1}), grain protein content (%), N application rate (kg.ha^{-1}) and NUE (%) for the experimental treatments. For GPC and N application rate, 0 indicates treatments for which no information was available (17 and 1, respectively).

3.2. Identifying the most accurate NNI path for distinguishing between treatments “with yield loss” and those “without yield loss”

3.2.1. Accuracy of I_{thresh}

For each of the 10 values of YG_{thresh} , almost all the 2401 points were above the “no discrimination” line (Fig.3). The indicator I_{thresh} was therefore both relevant and informative for distinguishing between treatments with and without yield loss. Points lying closer to the “no discrimination” line have a lower sensitivity value for a given value of specificity. For instance, the I_{thresh} corresponding to the classically recommended “non-limiting” NNI path ($\text{NNI} = 1$ at the four growth stages) is closer to the non-discrimination line than other I_{thresh} values with the same given level of specificity. Other values of I_{thresh} had similar levels of specificity but much higher levels of sensitivity (Fig.3). This I_{thresh} corresponding to the classically recommended “non-limiting” NNI path ($\text{NNI} = 1$ at the four growth stages) is highly specific, meaning that most treatments showing no period of deficiency (all NNI values ≥ 1) are in the group “without yield loss”. However, the sensitivity of this I_{thresh} is very low, indicating that treatments for which a period of N deficiency occurs (at least one $\text{NNI} < 1$) may be

among those “without yield loss”. Thus, this I_{thresh} minimizes the risk of yield loss due to N deficiency, but it does not take advantage of periods of N deficiency that are not detrimental to yield. The most interesting I_{thresh} values are those in the top left-hand corner of the graph, for which both sensitivity and specificity are close to 1. This area of the graph contains the I_{thresh} corresponding to the maximum J value: J_{max} (Fig.3).

For each value of YG_{thresh} , there was always at least one I_{thresh} with a $J > 0.6$, indicating a high degree of discrimination (Fig.3). For the 10 YG_{thresh} , the maximum value observed for J (J_{max}) ranged from 0.61 to 0.76.

3.2.2. Effectiveness of I_{thresh}

Nine of the 2401 values of I_{thresh} tested resulted in J_{max} for at least one of the ten YG_{thresh} (Table 2). The most accurate I_{thresh} differed slightly according to YG_{thresh} . Nevertheless, the NNI_{Z30} value (at the start of stem elongation) of the most discriminative I_{thresh} was always 0.4. At the flag leaf out and at flowering stages, the NNI values of the best indicator were 0.6 or 0.7, and 0.8 or 0.9 respectively, according to the assumed yield gap threshold. NNI_{Z32} frequently reached 0.7, but uncertainty was very high for NNI_{Z32} , which ranged from 0.4 to 0.7. None of the I_{thresh} values resulted in $J=J_{max}$, regardless of YG_{thresh} . Only three I_{thresh} (i.e., lines b, c and g in Table 2) values resulted in J_{max} for more than one group. The more frequently I_{thresh} resulted in $J > 0.6$ (i.e., the same I_{thresh} was highly discriminatory for different groups of YG_{thresh}), the more robust I_{thresh} could be considered to be. However, only two I_{thresh} values were associated with $J > 0.6$, regardless of YG_{thresh} , and both these values were characterized by $NNI_{Z60} = 0.9$ (lines a and b in Table 2). One I_{thresh} (line c in Table 2) achieved both the highest mean value of J (0.68) and the largest number of times for which $J = J_{max}$ (4 times). We retained this I_{thresh} , corresponding to the NNI path = 0.4 – 0.7 – 0.7 – 0.8 at Z30, Z32, Z39 and Z60, respectively. However, other paths were also identified as potentially interesting (such as a and b of table 3 (0.4 – 0.7 – 0.7 – 0.9 and 0.4 – 0.7 – 0.6 – 0.9)), as they achieved better results for other criteria (mean specificity and number of times for which $J > 0.6$).

Table 2. Detailed results for the 9 I_{thresh} achieving J_{max} for at least one of the ten YG_{thresh} , from a to i: mean sensitivity, specificity and Youden index (J) for the 10 YG_{thresh} ; standard deviation of the difference between J and J_{max} for the YG_{thresh} ; number of times (out of ten YG_{thresh}) for which $J > 0.6$ and $J = J_{max}$ observed for the I_{thresh} .

I_{thresh}	NN_{Z30}	NN_{Z32}	NN_{Z39}	NN_{Z60}	Mean sensitivity	Mean specificity	Mean J	Standard deviation ($J-J_{max}$)	Number of YG_{thresh} groups with $J > 0.6$	Number of YG_{thresh} groups with $J=J_{max}$
a	0.4	0.7	0.7	0.9	0.79	0.84	0.64	0.02	10	1
b	0.4	0.7	0.6	0.9	0.81	0.84	0.65	0.03	10	3
c	0.4	0.7	0.7	0.8	0.90	0.78	0.68	0.06	8	4
d	0.4	0.6	0.7	0.8	0.90	0.76	0.66	0.07	8	1
e	0.4	0.5	0.7	0.8	0.90	0.75	0.66	0.07	7	1
f	0.4	0.4	0.7	0.8	0.90	0.75	0.66	0.07	7	1
g	0.4	0.7	0.6	0.8	0.92	0.75	0.66	0.07	8	2
h	0.4	0.6	0.6	0.8	0.92	0.73	0.65	0.08	8	1
i	0.4	0.5	0.6	0.8	0.92	0.72	0.64	0.08	7	1

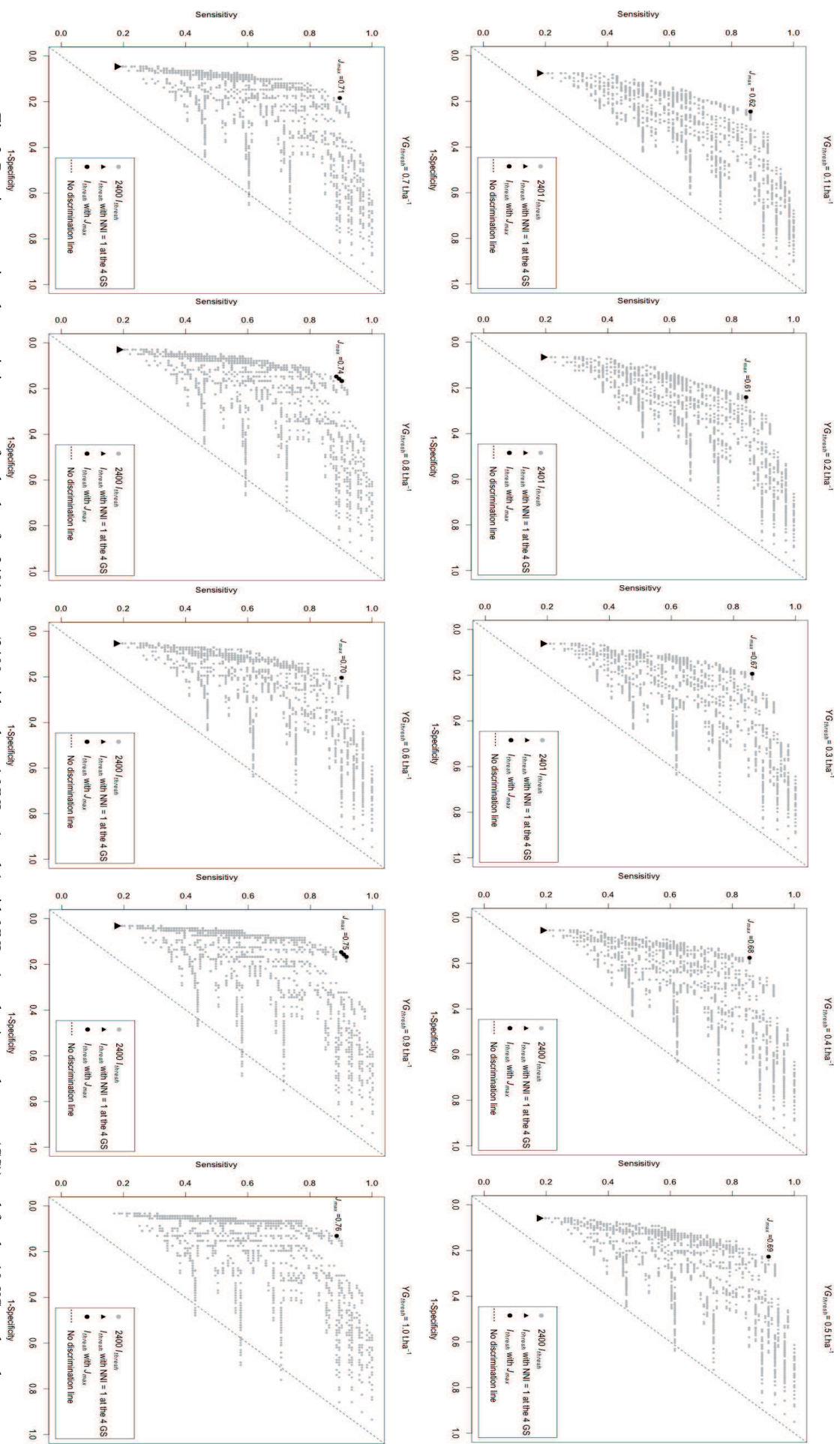


Fig. 3. Receiver operating characteristics curves for the data for 2401 $I_{livesth}$ (2400 with at least 1 $NNI < 1$ and 1 with $NNI = 1$ at the 4 growth stages (GS)) and for the 10 $YG_{livesth}$ based on yield gaps from 0 to 1 t ha⁻¹. $I_{livesth}$ corresponds to successive values of NNI at growth stages Z30, Z32, Z37 and Z60. The dotted line is the 'no discrimination' line. $I_{livesth}$ values associated with higher J_{max} values correspond to the most effective $I_{livesth}$ values for discriminating between the groups of treatments with and without yield loss.

3.3. Effect of I_{thresh} on grain protein content and nitrogen use efficiency

We compared the mean GPC and rNUE of experimental treatments with $I_{meas} \geq I_{thresh}$, according to whether or not I_{meas} included a period of N deficiency (cf. §2.4).

Overall, 84 of the 173 treatments for which GPC values were available had $I_{meas} < I_{thresh}$. The mean GPC for these treatments (mean value of 10.8%, SD= 1.9) was below the target value of 11.5%. This finding is not particularly surprising, as these treatments had presented intense N deficiencies. For the 89 treatments for which $I_{meas} \geq I_{thresh}$, mean GPC exceeded 11.5%, for treatments with and without periods of N deficiency (Table 3). Furthermore, no significance in mean GPC was observed between treatments with and without N deficiency. This suggests that there is no need to maintain NNI values above 0.9 for the entire crop cycle to achieve a satisfactory GPC.

Overall, 99 of the 214 treatments for which rNUE values were available had $I_{meas} < I_{thresh}$. The mean rNUE of these treatments was 1.6 and the mean rate of N application was 144 kg N ha⁻¹. The high rNUE value obtained was not surprising, given the lower mean rate of N application for the treatments concerned. However, considerable variability was observed between treatments (the standard deviation was 0.67 for rNUE and 60 for N rate). For the 115 treatments with $I_{meas} > I_{thresh}$, mean rNUE differed significantly between treatments with and without periods of N deficiency, but no significant difference in mean N rate was observed (Table 3). Treatments with N deficiency (at least one NNI $\leq$ 0.9) had significantly higher rNUE values than treatments without N deficiency (Table 3).

Thus, accepting a period of N deficiency during the vegetative growth period might improve rNUE without affecting yield and GPC.

Table 3. Results for grain protein content (GPC) and rNUE for treatments with $I_{meas} \geq I_{thresh}$, depending on whether I_{meas} did or did not include a period of N deficiency

	Treatments without N deficiency (all NNI > 0.9)	Treatments with N deficiency (at least one NNI $\leq$ 0.9)	Total
Number of treatments with GPC	36	53	89
Treatments with GPC < 11.5%	8	9	17
Treatments with GPC $\geq$ 11.5%	28	44	72
Mean GPC (***)	12.53 a	12.48 a	
Standard deviation	1.3	1.4	
Number of treatments with rNUE	45	70	115
Mean relative efficiency (*)	0.97 b	1.04 a	
Standard deviation	0.11	0.19	
Mean N rate (kg.N.ha ⁻¹) (**)	230 a	220 a	
Standard deviation	30	43	

Values in the same row followed by the same letter are not significantly different

* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$ and *** $P < 0.001$

4. Discussion

4.1. Highly productive intensively managed wheat crops can tolerate N deficiencies

Our results indicated that N deficiencies could be tolerated during the vegetative growth phase, with no decrease in grain yield or grain protein content. We also found that ‘non-detrimental’ deficiencies could potentially enhance environmental and economic performance, by increasing NUE. Positive effects of temporary periods of N deficiency have been reported before. For example, under conditions of water stress, early N application increases crop biomass, leaf area and, thus, evapotranspiration. Highly fertilized crops therefore suffer more severely from water stress than crops with early N deficiency, which require less water (Luebs and Laag, 1967). Borghi *et al.* (1997) showed that, in dry Mediterranean conditions, splitting the total amount of N into several applications and delaying N application increased both yield and quality. Moreover, as high levels of N nutrition frequently increase the development of foliar diseases (Simon *et al.*, 2003), a period of N deficiency could potentially limit such diseases. The later application of smaller amounts of N is also known to decrease the risks of stem disease and lodging, which may result in yield loss (Crook and Ennos, 1995, Loyce *et al.*, 2008).

Given the weather conditions and yields reported in our database, we can assume that water stress occurred in a few experiments on shallow soils in the Charente-Maritime (12 treatments). Similarly, we can assume that a few treatments in two trials (one in Le Magneraud 2002 and the other in Boigneville 2001) presented lodging or disease. In each of these two trials, treatments with NNI paths consisting of values greater than 1 throughout the crop cycle were associated with lower yields and protein contents than treatments for which the NNI path included periods of N deficiency. These results may be explained by a negative effect of over fertilization leading to problems of disease or lodging. With the exception of these cases, trials were generally performed in an oceanic climate, with intensive farming practices (i.e. irrigation, and pesticide use to prevent diseases, and growth regulators to prevent lodging), as confirmed by the high maximum yields achieved in all experiments (maximum yield ranged from 8.3 to 14.9 t.ha⁻¹). Wheat crops can thus tolerate periods of N deficiency with no effect on yield not only in conditions of water stress or disease, but also in conditions of intensive crop management in which such stresses are absent.

As suggested by previous studies, the cultivar used may also partly account for the ability of the crop to tolerate N deficiencies. As shown by Barbottin *et al.* (2005) and Le Gouis *et al.* (2000), contrasting cultivars may differ in their sensitivity to N deficiency. Both these studies highlighted a stronger effect of N deficiency on yield for the cultivar Recital than for the other cultivars studied. Despite the diversity of cultivars in our database, the threshold value for NNI path (I_{thresh}) appeared to be robust. However, we were unable to establish a specific NNI path threshold value more suitable for highly sensitive cultivars from our data, due to the limited number of replicates for each cultivar. It would be

interesting to carry out a more detailed analysis of the response to I_{thresh} identified for each cultivar type as a function of cultivar sensitivity to N stress.

Finally, although no cultivar effect on minimum NNI path was identified, the translation of the NNI path threshold into fertilization strategies may depend on the cultivar used. For instance, NNI may decrease more rapidly in cultivars that are more sensitive to N deficiency.

4.2. The ability to tolerate N deficiency depends on the time at which the deficiency occurs

Our results showed that even intense N deficiencies have no effect on grain yield, provided that they occur at early growth stages (until Z30). Previous studies have shown that N deficiency leads to lower rates of shoot mass accumulation, due to lower levels of leaf expansion and tillering (Lemaire and Gastal, 2009). However, a decline in leaf expansion and tillering may have a greater effect on growth and yield when crop LAI is insufficient for interception of almost all the PAR. The intensity of N deficiency that can be tolerated may depend on the biomass and LAI of the crop at the time of the N deficiency, but we were unable to demonstrate such an effect with our data. Thus, the level of N deficiency that wheat crops can tolerate at the beginning of the growing season (Z30) is less clear than that tolerable at other stages, because biomass and LAI may have a more determinant effect at this early growth stage. Furthermore, NNI did not always differ between treatments in the experiments showing that N deficiency was tolerable at Z30. We can therefore conclude only that early N deficiencies, even if intense, are tolerable, and that it might be necessary to define the minimum NNI as a function of biomass.

However, in well-fertilized wheat crops, unnecessary vegetative growth (Alcoz *et al.*, 1993) may lead to excessive tiller production, largely exceeding the number of spikes required to reach maximum yield. Indeed, high early levels of N nutrition would increase tillering and individual growth, thereby enhancing subsequent competition for light, leading to the death of secondary tillers (Lemaire and Gastal, 2009). Previous studies analyzing the effects of N deficiency as a function of the time at which they occur during the crop cycle have shown grain yields to be higher for crops receiving their first application of N at GS 30, than in those receiving early N applications (Alcoz *et al.*, 1993). Thus, if maximizing grain yield rather than crop biomass (i.e. harvest for forage) is the principal objective, it may be advantageous to delay N application (Raun and Johnson, 1999). We also showed that the maintenance of satisfactory performance required early N deficiencies to decrease in intensity later in the season. NNI should increase, from $NNI \geq 0.7$ at the flag leaf growth stage (Z37) to $NNI \geq 0.8$ at flowering (Z60). Demotes-Mainard and Jeuffroy (2004) showed an effect on spike formation in cases of severe N deficiency occurring after the start of spike growth (i.e., during stem elongation). These authors showed that crop biomass at flowering was decisive for grain formation. Thus, crop N nutrition during the pre-flowering period is crucial for grain yield. Demotes-Mainard and Jeuffroy (2004) suggested that a moderate N deficiency ($NNI \geq 0.8$) before flowering has almost no effect on

dry matter accumulation in the spike. Given these results, our NNI path, requiring NNI to increase from 0.7 to 0.8 before flowering, is consistent with the optimal pattern of spike formation. Jeuffroy and Bouchard (1999) also demonstrated that decreases in grain number were dependent on the timing, intensity and duration of N deficiency. The greatest losses of grain number were observed for N deficiencies that did not cease before flowering. These results highlight the dependence of the crop response to N deficiency on the history of the N stress, stressing the relevance of studying NNI path to determine the minimum N levels that wheat crops can tolerate without yield loss.

4.3. The concept of NNI path is a new form of actionable knowledge

Many studies have improved our understanding of the effects of N deficiency and shown that N deficiency can be tolerated, but only a few have generated operational tools for the implementation of N fertilization strategies involving periods of N deficiency. Previous studies quantified the effects of N deficiency to provide indicators to characterize a non-detrimental N deficiency (Jeuffroy and Bouchard, 1999) or parameters for inclusion in crop models (Sadras and Lemaire, 2014; Lemaire and Gastal, 2009; David *et al.*, 2004). However, these types of knowledge, which are fundamental for an understanding of the processes at work, are not sufficient to support action. For instance, the indicator suggested by Jeuffroy and Bouchard (1999), the product of the duration and the intensity of the deficiency, is measured *a posteriori*, and cannot therefore be used to guide decisions about N fertilization in real time. Similarly, improving models to take N deficiency into account is relevant for research purposes (Abbate *et al.*, 1995). However, adoption rates are low for decision support tools based on such complex scientific models (Prost *et al.*, 2012; Matthews *et al.*, 2008). Some difficulties in the use of models are linked to their reliance on many parameters, requiring local adaptation (Passioura *et al.*, 1996). However, difficulties have been experienced in the use of even the simplest models, as shown for the balance-sheet method (Ravier *et al.*, 2016). The passage from scientific models to tools suitable for use in practice requires the generation of actionable knowledge, relevant for the support of decision-making by farmers in real time and for guiding practices (Toffolini *et al.*, 2016).

By identifying a minimal NNI path, including periods of N deficiency, resulting in satisfactory yields and grain protein contents, we suggest here an alternative way of analyzing N deficiency, oriented towards action. This work will facilitate the transition from scientific knowledge to actionable knowledge. We provide successive threshold values of NNI that can be used to guide the dynamics of N fertilization by comparisons with in-season NNI monitoring (or monitoring of a plant indicator correlated with NNI) from the start of the crop cycle. Recommendations are generally based on soil indicators measured at the start of the crop cycle (Olfs *et al.*, 2005), and plant indicators measured later in the season (Justes *et al.*, 1997b; Arregui *et al.*, 2006; Ladha *et al.*, 2005). Since the end of the last century, interest has been increasing in the use of tools for adjusting the last fertilizer application of the season and improving grain protein content on the basis of plant indicators (Justes *et al.*,

1997b). Determinations of plant-sap nitrate N concentration, chlorophyll, and reflectance levels are the most widely used plant-based indicators (Olfs *et al.*, 2005). Such tools are oriented towards action as they support decision-making for the last N application of the season based on the detection of N deficiencies (Arregui *et al.*, 2006). However, these tools focus on crop N status late in the season only, and they cannot be used to manage N deficiencies early in the crop cycle.

From a practical standpoint, the “NNI path” concept suggests an approach for managing N fertilization from the start of the crop cycle, with the first N application delayed for as long as possible, to prevent the accumulation of unnecessary biomass (Alcoz *et al.*, 1993; Sylvester-Bradley *et al.*, 1997), and to enhance both grain protein content and yield (Meynard *et al.*, 2002). We also showed that managed periods of N deficiency before flowering resulted in a higher NUE than strategies designed to ensure that N nutrition remained non-limiting throughout the crop cycle. These results are consistent with the findings of Limon-Ortega *et al.* (2000) suggesting that NUE is higher for treatments in which N is applied later in the season (at the 1st node growth stage rather than as a top dressing after planting). Similar results were obtained for the efficiency of N recovery. Limaux *et al.* (1999) reported the existence of a positive linear relationship between the efficiency of N fertilizer recovery and crop growth rate at the time of N application: higher N recovery rates were observed for N applications when the crop was growing rapidly, later in the season. Similarly, Foulkes *et al.* (2009) showed that the application of large amounts of N early in the season was less efficient due to poor synchrony between the N fertilizer application and crop demand.

Further studies are now required to investigate and model the effect of this minimum NNI path, to make it more relevant to practice in the field and to highlight the possibility of making use of managed N deficiencies: Are there N fertilization strategies making it possible to keep the NNI above the minimum NNI path throughout the crop cycle after an intense early N deficiency?

5. Conclusion

Our results suggest that it is possible, and even desirable, to manage wheat crops such that they experience an early N deficiency, when targeting high yields, grain protein contents and N use efficiencies. We showed that, to reach such targets, NNI values should exceed 0.4, 0.7, 0.7 and 0.8 at growth stages Z30, Z32, Z39 and Z60, respectively, corresponding to an intense deficiency early in the cycle, but a lower deficiency before flowering. Using this approach, we were able to generate actionable knowledge of potential value for real-time decision support. In a context in which N fertilization is increasingly constrained by economic, societal and environmental issues, this concept of the ‘minimum NNI path’ is potentially useful to drive a shift towards new fertilization practices in which the application of N is better timed to match crop N demand. It should provide farmers with greater flexibility in decisions about when to apply N fertilizer during the growing season whilst

ensuring a satisfactory performance. Such support would be expected to increase NUE and could be used to optimize the timing of N applications.

Acknowledgments

We thank Christine Le Souder and François Piraux from Arvalis-Institut-du-végétal for providing data. We thank Arvalis-Institut-du-végétal, and the ADEME (*Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*) for funding this study. This study was part of the REACTIF project. We thank Julie Sappa (Alex Edelman & Associates) for reviewing the English.

References

- Abbate, P.E., Andrade, F.H., Culot, J.P., 1995. The effect of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *The Journal of Agricultural Science* 124 (3), 351-360. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859600073317>
- Alcoz, M.M., Hons, F.M., Haby, V.A., 1993. Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. *Agronomy Journal* 85, 1198-1203. doi:10.2134/agronj1993.00021962008500060020x
- Arregui, L.M., Lasa, B., Lafarga, A., Irañeta, I., Baroja, E., Quemada, M., 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 24, 140-148. doi:10.1016/j.eja.2005.05.005
- Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., Jeuffroy, M.-H., 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat. *Crop Science* 45, 1141-1150. doi:10.2135/cropsci2003.0361
- Borghi, B., Corbellini, M., Minoia, C., Palumbo, M., Di Fonzo, N., Perenzin, M., 1997. Effects of Mediterranean climate on wheat bread-making quality. *European Journal of Agronomy* 6, 145-154. doi:10.1016/S1161-0301(96)02040-0
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 31, 132-140.
- Cellier, P., Rochette, P., Hénault, C., Générmont, S., Laville, P., Loubet, B., 2013. Les émissions gazeuses dans le cycle de l'azote à différentes échelles du territoire : une revue. *Cahier Agricultures* 22, 258-71. doi : 10.1684/agr.2013.0641
- Crook, M.J., Ennos, A.R., 1995. The effect of nitrogen and growth regulators on stem and root characteristics associated with lodging in two cultivars of winter wheat. *Journal of Experimental Botany* 46, 931-938. doi:10.1093/jxb/46.8.931
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Recous, S., Dorsainvil, F., 2004. Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* 21, 249-266. doi:10.1016/j.eja.2003.09.003
- Demotes-Mainard, S., Jeuffroy, M.-H., 2004. Effects of nitrogen and radiation on dry matter and nitrogen accumulation in the spike of winter wheat. *Field Crops Research* 87, 221-233. doi:10.1016/j.fcr.2003.11.014
- Fluss, R., Faraggi, D., Reiser, B., 2005. Estimation of the Youden index and its associated cutoff point. *Biometrical Journal* 47, 458-472. doi:10.1002/bimj.200410135
- Foulkes, M.J., Hawkesford, M.J., Barraclough, P.B., Holdsworth, M.J., Kerr, S., Kightley, S., Shewry, P.R., 2009. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. *Field Crops Research* 114, 329-342. doi:10.1016/j.fcr.2009.09.005
- Horwitz, W., Senzel, A., Reynolds, H., Park, D.L. (Eds) 1975. *Official Methods of Analysis*, 12th ed. AOAC, Washington DC.
- Hughes, G., McRoberts, N., Burnett, F.J., 1999. Decision-making and diagnosis in disease management. *Plant Pathology* 48, 147-153. DOI: 10.1046/j.1365-3059.1999.00327.x

- Jeuffroy, M.-H., Bouchard, C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Science* 39, 1385-1393. doi:10.2135/cropsci1999.3951385x
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.-M., Machet, J.-M., Thelier-Huché, L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74, 397-407. doi: 10.1006/anbo.1994.1133
- Justes, E., Jeuffroy, M.-H., Mary, B., 1997a. Wheat, barley and durum wheat, in: Lemaire, G. (Ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer, Berlin, pp 73-92.
- Justes, E., Meynard, J.-M., Mary, B., Plénet, D., 1997b. Diagnosis using stem base extract: Jubil Method, in: Lemaire, G. (Ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer, Berlin, pp 163-188.
- Ladha, J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J., van Kessel, C., 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Advances in Agronomy* 87, 85-156. doi:10.1016/S0065-2113(05)87003-8
- Le Gouis, J., Béghin, D., Heumez, E., Pluchard, P., 2000. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy* 12, 163–173. doi:10.1016/S1161-0301(00)00045-9
- Lemaire, G., Gastal, F., 2009. Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency, in: Sadras, V.O., Calderini, D.F. (Eds), *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Academic Press San Diego, 171–211.
- Lemaire, G., Meynard, J.-M., 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data, in: Lemaire, G. (Eds), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Lemaire, G., (Eds), 45-55.
- Lemaire, G., Gastal, F., 1997. *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer, Berlin, Lemaire, G. (Ed), 239.
- Limaux, F., Recous, S., Meynard, J.-M., Guckert, A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214, 49–59. DOI: 10.1023/A:1004629511235
- Limon-Ortega, A., Sayre, K.D., Francis, C.A., 2000. Wheat nitrogen use efficiency in a bed planting system in northwest Mexico. *Agronomy Journal* 92, 303-308. DOI: 10.1007/s100870050037
- Loyce, C., Meynard, J.M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., Doussinault, G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27, 1131–1142. doi:10.1016/j.cropro.2008.02.001
- Luebs, R.E., Laag, A.E., 1967. Nitrogen effect on leaf area, yield, and nitrogen uptake of barley under moisture stress. *Agronomy Journal* 59, 219–222. doi:10.2134/agronj1967.00021962005900030004x
- Makowski, D., Taverne, M., Bolomier, J., Ducarne, M., 2005. Comparison of risk indicators for sclerotinia control in oilseed rape. *Crop Protection* 24, 527–531. doi:10.1016/j.cropro.2004.10.003
- Makowski, D., Tichit, M., Guichard, L., Van Keulen, H., Beaudoin, N., 2009. Measuring the accuracy of agro-environmental indicators. *Journal of Environmental Management* 90, S139–S146. doi:10.1016/j.jenvman.2008.11.023
- Matthews, K.B., Schwarz, G., Buchan, K., Rivington, M., Miller, D., 2008. Wither agricultural DSS? *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 149–159. doi:10.1016/j.compag.2007.11.001
- Meynard, J.-M., Aubry, C., Justes, E., Le Bail, M., 1997. Nitrogen diagnosis and decision support, in: Lemaire, G. (Ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer, Berlin, 147-161.

- Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817-829. DOI: 10.1051/agro:2002064
- Mohammed, Y.A., Kelly, J., Chim, B.K., Rutto, E., Waldschmidt, K., Mullock, J., Torres, G., Desta, K.G., Raun, W., 2013. Nitrogen fertilizer management for improved grain quality and yield in winter wheat in Oklahoma. *Journal of Plant Nutrition* 36, 749–761. doi:10.1080/01904167.2012.754039
- Olfs, H.-W., Blankenau, K., Brentrup, F., Jasper, J., Link, A., Lammel, J., 2005. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 414–431. doi:10.1002/jpln.200520526
- Passioura, J.-B., 1996. Simulation models: Science, Snake oil, Education or Engineering? *Agronomy Journal* 88, 690-694. doi: 10.2134/agronj1996.00021962008800050002x
- Prost L, Cerf M , Jeuffroy MH, 2012. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agron. Sustain. Dev.* (2012) 32:581–594 doi:10.1007/s13593-011-0059-4
- Prost, L., Jeuffroy, M.-H., 2007. Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 321–330. doi:10.1051/agro:2007032
- Raun, W.R., Johnson, G.V., 1999. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. *Agronomy Journal* 91, 357-363. DOI: 10.2134/agronj1999.00021962009100030001x
- Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences*. doi:10.1016/j.njas.2016.10.001
- Recous, S., Machet, J.-M., 1999. Short-term immobilisation and crop uptake of fertiliser N applied to winter wheat: effect of date of application in spring. *Plant Soil* 206,137–149. DOI: 10.1023/A:1004377006602
- Ruopp, M.D., Perkins, N.J., Whitcomb, B.W., Schisterman, E.F., 2008. Youden index and optimal cut-point estimated from observations affected by a lower limit of detection. *Biometrical Journal* 50, 419–430. doi:10.1002/bimj.200710415
- Sadras, V.O., Lemaire, G., 2014. Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crops Research* 164, 54–64. doi:10.1016/j.fcr.2014.05.006
- Schröder, J.J., Neeteson, J.J., Oenema, O., Struik, P.C., 2000. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Research* 66, 151-164. [doi:10.1016/S0378-4290\(00\)00072-1](https://doi.org/10.1016/S0378-4290(00)00072-1)
- Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J.S., 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 51–62. doi:10.1016/j.compag.2007.06.006
- Simón, M.R., Cordo, C.A., Perelló, A.E., Struik, P.C., 2003. Influence of nitrogen supply on the susceptibility of wheat to *Septoria tritici*: effect of N on *Septoria tritici* susceptibility. *Journal of Phytopathology* 151, 283–289. doi:10.1046/j.1439-0434.2003.00720.x
- Sylvester-Bradley, R., Davies, D.B., Dyer, C., Rahn, C., Johnson, P.A., 1997. The value of nitrogen applied to wheat during early development. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 47, 173-180. DOI: 10.1007/BF01991549
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., 2016. Indicators used by farmers to design agricultural systems: a survey. *Agronomy for Sustainable Development* 36. doi:10.1007/s13593-015-0340-z

- Zebarth, B.J., Botha, E.J., Rees, H., 2007. Rate and time of fertilizer nitrogen application on yield, protein and apparent efficiency of fertilizer nitrogen use of spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 87, 709–718. doi : 10.4141/CJPS06001
- Youden, W.J., 1950. Index for rating diagnostic tests. *Cancer* 3, 32–35. doi:10.1002/1097-0142(1950)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2-3

Chapitre IV - Construction d'un prototype d'outil : Production de règles de décision à l'aide d'un modèle et de la théorie de la viabilité

Dans le chapitre précédent, nous avons travaillé sur la trajectoire de nutrition azotée minimum qu'un blé peu tolérer sans pénaliser sa production. Pour mettre en mouvement cette connaissance dans un prototype de la méthode, nous avons besoin de construire des règles de décision qui permettront, à partir d'une estimation de l'INN de déclencher en apport quand les conditions sont optimales : c'est-à-dire quand les conditions météorologiques sont favorables à la valorisation de l'engrais, quand la demande en azote du couvert est forte et la fourniture du sol faible, tout en évitant de rentrer en carence préjudiciable : c'est-à-dire sans passer sous la trajectoire minimum. Ces règles de décision doivent permettre de concilier à la fois les objectifs environnementaux et économiques. Effectivement, en positionnant les apports ainsi, l'efficacité d'utilisation des engrais sera significativement améliorée. Dans la gestion de la fertilisation azotée, nous l'avons vu, l'incertitude sur les conditions météorologiques à venir peut influencer la prise de décision, conduisant à une anticipation des apports indépendamment de la prise en compte de la demande en azote du couvert. Par conséquent, pour améliorer les pratiques, les règles de décisions doivent permettre de trouver le meilleur compromis entre apporter l'engrais dans des conditions météorologiques optimales et dans des conditions de demande en azote du couvert fort avant un risque de carence préjudiciable. Les utilisateurs ont besoin de règles de décisions qui soient robustes au regard de cette incertitude. Nous avons utilisé Azodyn pour simuler l'effet de stratégie de fertilisation sous différents scénarios climatiques. A partir d'algorithmes de viabilité, nous avons analysé les doses d'engrais qui permettent de maintenir l'INN au dessus de la trajectoire minimum tout en minimisant les pertes vers l'environnement. Nous avons ensuite évalué la robustesse associée à chaque dose d'engrais. Selon le formalisme de la théorie de la viabilité, la robustesse correspond au pourcentage de séries climatique pour lesquelles pour un état du système (i.e. un niveau d'INN à une date) il existe au moins une option de fertilisation viable, c'est-à-dire qui permet de respecter les contraintes de maintenir de l'INN au dessus de la trajectoire minimum avec des pertes inférieures à 20 kg N ha^{-1} . Nous montrons que la théorie de la viabilité permet d'intégrer la notion de risque et d'incertitude climatique dans le formalisme des règles de décision. Nous avons également discuté les stratégies de fertilisation azotée obtenues en appliquant ces règles de décisions au regard des stratégies résultant de la mise en œuvre des recommandations actuelles basées sur la méthode du bilan. Nous montrons que la méthode que nous proposons pourrait a priori permettre de réduire les doses d'engrais par rapport aux doses calculées avec le bilan, diminuer les pertes d'azote par rapport aux règles de fractionnement actuelles, sans pénaliser la production par rapport aux résultats obtenus avec les recommandations actuelles.

Ce travail fera l'objet d'une publication scientifique.

Viability-based assessment of the robustness of model-based decision rules for managing N fertilization on winter wheat

Clémence Ravier^{1,2}, Rodolphe Sabatier³, Damien Beillouin¹, Jean-Marc Meynard³, Ronan Trépos⁴, Marie-Hélène Jeuffroy^{1,*}

¹ UMR211 Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

² Arvalis-Institut-du-Végétal, Station expérimentale de la Jaillière, 44370 La Chapelle Saint-Sauveur, France

³ UMR1048 SAD-APT, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

⁴ INRA, UR0875 MIAT, INRA Auzeville, chemin de Borde-Rouge, 31326 Castanet Tolosan, France

* Corresponding author: Marie-Hélène Jeuffroy

Postal address: Campus de Grignon, Bâtiment EGER, UMR Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France

E-mail address: marie-helene.jeuffroy@inra.fr

Highlights:

- Fertilization strategies simulated with Azodyn model were evaluated with viability based algorithms
- Robust decision rules for managing N fertilizer with no-detrimental N deficiencies were developed
- The new fertilizer management rules resulted in similar yields and grain protein contents, for lower N rates
- N losses were much smaller with new decision than for the current recommendations
- The decision rules can be adjusted according to farmers' risk aversion

Abstract: Nitrogen (N) fertilizer is commonly applied to wheat crop (*Triticum aestivum* L.) during the vegetative growth to satisfy crop requirement. Yet it might result in low N use efficiency and N losses to the environment due to excess of N fertilizer and poor synchrony between soil supply and crop N demand. Despite existing tools and methods to manage N fertilization, maximizing grain yield and protein content whilst minimizing N losses to the environment remains challenging. There is a need to provide decision rules to apply N fertilizer at the time of optimal weather conditions, low soil N supply, and high crop N demand without exceeding N crop requirements, thereby increasing N use efficiency and limiting N losses. Here we developed a modeling approach based on the Azodyn model and using the mathematical framework of the viability theory to build decision rules where 1) N is applied only if weather conditions are optimal and if there is a risk that N deficiency become detrimental to grain yield and protein content and 2) the N rate is the minimum sufficient to prevent from detrimental N deficiencies whilst avoiding N losses to the environment. We computed metric of robustness to build decision rules for timing and rates of N fertilizer in the view to manage crop N nutrition with no-detrimental period of N deficiency and to avoid N losses during the vegetative growth higher than 20 kg N ha⁻¹. Compared to current recommendations, those decision rules enable

to decrease the total amount of N fertilizer applied whilst maintaining similar yields and improving grain protein contents.

Key words: crop model, N deficiency, fertilizer management, weather uncertainty, N losses

1. Introduction

Minimizing nitrogen (N) losses towards the environment whilst maintaining high yields and high grain protein content require the management of synchrony between soil N supply and crop N demand (Cassman *et al.*, 2002; Meynard *et al.*, 2002; Shanahan *et al.*, 2008). Furthermore, to maximize N uptake by the crop N fertilizer should be applied when weather conditions are optimal for its valorization: when superficial layers of the soil are sufficiently moist to diffuse fertilizer to the roots (Campbell *et al.*, 1995) or when it rains shortly after fertilizer application (Powlson *et al.*, 1992). It may therefore be possible to achieve high N use efficiency (NUE) and limit N losses by applying N fertilizer when crop N uptake capacity is high, soil N supply is limiting, and weather conditions are optimal (Campbell *et al.*, 1995; Limaux *et al.*, 1999; Olf *et al.*, 2005; Samborski *et al.*, 2009). Plant indicator-based methods are considered relevant to adjust in season N fertilizer application (Olf *et al.*, 2005). Ravier *et al.* (submitted) proposed a N fertilizer management method based on a regular monitoring of crop nitrogen nutrition index (NNI). NNI, defines as the ratio between the actual N concentration of the aerial parts of the crop and the critical N concentration, which is the minimum concentration required to maximize aerial dry matter production, is a sensitive and specific indicator of crop N status (Lemaire, 1997). It can be used to detect N-limiting situations, which could cause a decrease in yield relative to the potential yield (Lemaire and Meynard, 1997). For wheat crop, NNI has been proven to be useful for determining both the time on which the N deficiency began and its intensity (Jeuffroy and Bouchard, 1999). Furthermore, Jeuffroy and Bouchard (1999) have shown that not all N deficiencies were damaging wheat grain yield. Ravier *et al.* (submitted) determined a minimum NNI path above which there is no damage neither to grain yield nor grain protein content. This minimum NNI path can be used as a threshold for managing fertilization strategies including periods of N deficiency, as long as the crop N status is maintained above the minimum NNI path from the beginning of stem elongation until flowering. Yet, implementing this new NNI-based method in the view to maximize NUE and avoid N losses required formalizing decision rules taking into account that:

- 1) N fertilizer should be applied only when weather conditions are optimal to valorize N and if crop NNI is likely to fall under the minimum NNI path before the next application time;
- 2) N rate should be sufficient to maintain the crop N nutrition above the minimum NNI path, thereby preventing from detrimental N deficiencies whilst avoid N losses during the vegetative growth exceeding a sustainable threshold value.

Decision rules based can be constructed by using a dynamic soil-crop model to simulate the consequences of various sequences of N fertilizer application times and rates on daily changes of crop NNI and then identifying viable sequences i.e. sequences making it possible to achieve the set of constraints. Furthermore, due to the low prediction accuracy of weather, particularly for rainfall (Kusunose and Mahmood, 2016), those decision rules need to be robust regarding weather uncertainty and therefore uncertainty on the next possible time of N application. Such uncertainty can be taken into account by considering various weather scenarios in the multiple simulations performed (Woodward *et al.*, 2008). Viability theory (Aubin, 1991) appears to be a suitable approach for identifying the sequences of N fertilizer application times and rates that have the highest probability, across different weather scenarios, of ensuring the maintenance of a stochastic dynamic system within a defined set of constraints over time. Viability theory is particularly suitable for quantifying and assessing the efficacy of management strategies in uncertain and unpredictable environments (Doyen and De Lara, 2010).

Based on a case study corresponding to one agronomic situation, we combined model-based simulations of sequences of N fertilizer application times and rates with the mathematical framework of the viability theory to compute metrics of robustness. Robustness is defined as the proportion of weather scenarios for which there is at least one sequence of N fertilizer application times and rates that maintains crop NNI above the minimum NNI path throughout the crop cycle and keeps N losses to the environment below a sustainable threshold value. We aimed to build decision rules with a conditional “If...then” form, making it possible to use a plant indicator, from the end of winter until flowering, to guide decisions about fertilizer application (Rossing *et al.*, 1997; Aubry *et al.*, 1998). Our decision rules were therefore designed to indicate the most robust N fertilizer rate for each level of crop NNI estimated at each time of optimal weather conditions for N fertilizer application. We then compared simulated performance and N losses between those decision rules and current N recommendations, to identify the possible gains and risks associated with the NNI-based fertilizer management method.

2. Materials and methods

2.1. The soil-crop model and main characteristic of the studied agronomical situation

Azodyn soil-crop model (Jeuffroy and Recous, 1999) was used to simulate NNI dynamics resulting from various sequences of N fertilizer application times and rates applied over different weather scenarios. Azodyn is a simple and accurate soil-crop model that simulates, on a daily basis, soil N supply and crop N uptake, from the end of winter until harvest (Jeuffroy and Recous, 1999). It simulates the consequences of N fertilizer times and rates for crop yield and grain protein content, taking soil characteristics and weather conditions into account. The crop submodel simulates crop

aerial biomass and its N content, using classic formalisms for radiation interception and efficiency (Monteith, 1972), and the critical N dilution curve (Justes *et al.*, 1994) for the estimation of N requirement. Azodyn simulates NNI on a daily basis, from a comparison between actual and critical plant N contents.

The input data used were typical of luvisols in Normandy (north-western France), with low levels of N mineralization from the preceding crop (e.g. maize) and no organic manure application or grassland in the crop rotation (Table 1). The sowing date for the wheat crop was October 25th, with harvest on July 20th. We used weather data for a 20-year period in this region (1995 to 2015) as model input. The maximum yield for the cultivar was set at 10 t.ha⁻¹, which is a good and possible yield for this region. At the initialization of the model (end of winter, set as February 15th), crop N status was set as either not deficient, with a NNI of 1, or deficient, with a NNI value of 0.4 to 0.9, with increments of 0.1.

Table 1. Input data for the soil submodel, for simulations implemented with the model Azodyn

Input data	Value
Soil type	Luvisol
Soil mineral N content at the end of winter (kg N ha ⁻¹)	50
Soil mineral N content at the end of winter in the 0-30 cm layer (kg N ha ⁻¹)	17
CaCO ₃ content in the 0-30 cm soil layer (%)	0.5
N organic content in the 0-30 cm soil layer (%)	1.5
Clay content in the 0-30 cm soil layer (%)	14
Bulk density in the 0-30 cm soil layer (m ³ per m ³ of soil)	1.3
Maximum water content of the rooting zone (mm)	110
Soil water content at the end of winter (mm)	70
N derived from the mineralization of residues from the preceding crop (kg N ha ⁻¹)	20
C/N ratio of the residues of the preceding crop	60
C content of residues of the preceding crop (kg ha ⁻¹)	2990
N derived from organic manure mineralization (kg N ha ⁻¹)	0
N derived from grassland mineralization (kg N ha ⁻¹)	0

2.2. Simulation of various sequence of N-fertilizer application times and rates

For each of the 20 weather scenarios, we first identified the times with optimal conditions for N fertilizer application. The period during which fertilizer application took place lasted from February 15th (corresponding to the legal date for starting N fertilizer application in vulnerable zones in France) to booting stage (considering to be the last stage at which any N fertilizer applied was likely to be used efficiently to improve grain yield and protein content). Based on Azodyn formalism, technical recommendations (Cohan and Bouthier, 2010), and data from several studies (e.g. Limaux *et al.*, 1999; Jones *et al.*, 2013; Kissel *et al.*, 2014), we defined that conditions were optimal each day followed by a cumulative rainfall exceeding 10 mm within three days, or each day with a sufficient soil moisture so

that fertilizer can be released to the plant. We estimated that soil moisture was sufficient if the difference between cumulative rainfall and potential evapotranspiration over the last five past days was positive. Recous and Machet (1999) showed that most of the fertilizer-N is taken up by the crop within seven to fourteen days after application. Based on this finding, we fixed the minimum interval between two consecutive N applications at 15 days, to ensure that all the N from the previous fertilizer application was completely depleted before the next application.

Each time with optimal conditions for N fertilizer application, we tested five different N fertilizer rates: no N fertilizer, and applications of 40, 60, 80 or 100 kg N ha⁻¹. The minimum N rate was set at 40 kg N ha⁻¹, based on the assumption that farmers would be unlikely to apply less than this amount. The maximum was fixed at 100 kg N ha⁻¹ because French recommendations advice to split applications for amounts of fertilizer exceeding this value (Hébert, 1969; ITCF, 1978).

Depending on the year considered, there were two (2002 and 2010) to six (1998) times with optimal conditions during the period in which N fertilizer application took place. Thus, we simulated from 25 different sequences of N fertilizer application times and rates for years with two possible times with optimal conditions for N fertilizer application to 15 561 different sequences for year with six possible times with optimal conditions. Using the 20 weather scenarios resulted in a total of 41 324 simulations. In addition, each sequence of N-fertilizer application time and rates was duplicated to simulate 7 possible initial values of crop NNI from 0.4 to 1 with increments of 0.1. The total number of simulations was therefore 289 268. Simulations were performed with the Record platform (Bergez *et al.*, 2013). We extracted NNI dynamics from the time at which the simulations were initiated (February 15th) until flowering (May 20th), and grain yield (t ha⁻¹), grain protein content (%), and the total amount of N taken up by the crop (kg N ha⁻¹) at harvest.

Table 2. Precise calendar days with optimal weather conditions for application of the different rates of N fertilizer (0, 40, 60, 80 or 100 kg N ha⁻¹). The period during which N application was possible (from the end of winter to booting) was divided in 15-day subperiods

	Subperiods						Number of dates with optimal conditions for N fertilizer application
	February 15 th to 29 th	March 1 st to 15 th	March 16 th to 31 st	April 1 st to 15 th	April 16 th to 30 th	May 1 st to 13 th	
Growth stage (Zadoks' scale)	Tillering (Z25)	End of Tillering (Z29)	Beginning of stem elongation (Z31)	2nd node detectable (Z32)	Flag leaf (Z37)	Booting (Z40)	
Years (sowing-harvest)							
1995-1996	15	8	23	-	-	4	4
1996-1997	15	-	-	-	23	8	3
1997-1998	29	-	30	14	29	-	4
1998-1999	15	2	25	9	24	9	6
1999-2000	15	1	26	-	26	11	5
2000-2001	23	10	25	9	26	-	5
2001-2002	15	14	-	-	-	10	3
2002-2003	26	-	-	-	23	-	2
2003-2004	15	4	19	3	-	9	5
2004-2005	21	8	24	8	-	11	5
2005-2006	15	2	20	-	-	5	4
2006-2007	15	2	17	1	26	-	5
2007-2008	26	12	27	-	17	7	5
2008-2009	15	7	27	15	30	-	5
2009-2010	21	-	31	-	-	8	3
2010-2011	16	-	-	-	29	-	2
2011-2012	16	2	17	7	-	-	4
2012-2013	15	8	-	2	-	-	3
2013-2014	15	2	21	-	22	-	4
2014-2015	15	2	28	-	28	-	4

- No date with optimal conditions for N application during the subperiod

2.3. Viability analysis

According to state-control formalism, the system dynamics of Azodyn can be defined as follows:

$$NNI_{t+1} = f(NNI_t, N_t, \omega_t) \quad \text{Eq. 1}$$

where NNI_t is the state descriptor of the system, N_t (the N rate applied on time t) is the control, ω_t are weather conditions between t and $t+1$, and f is the function describing the dynamics of the system (see Jeuffroy and Recous, 1999 for details). Time t belongs to $[0, T]$, where T corresponds to the length of the entire crop cycle.

Following viability theory, we defined two viability constraints:

The first constraint required NNI to be kept above the minimum NNI path from tillering until flowering. The minimum NNI path was previously defined, for the period from the beginning of stem elongation to flowering, such that all NNI values above the threshold value at a given time point were sufficient to achieve the potential yield allowed by the specific conditions occurring in the year

considered (Ravier et al., submitted). For decision rules during tillering, we extrapolated the minimum value of NNI tolerable at Z31 to the Z25 and Z29 growth stages. This constraint reads as follows:

$$NNI_t > NNI_t^* \quad \text{Eq.2}$$

where NNI^* is the minimum NNI path. As soon as NNI fell below the threshold, the management option was not viable, even though NNI increased again and exceeded the threshold.

The second constraint required the N losses during the period in which N fertilizer application took place to remain below a sustainability threshold:

$$N_{loss} < 20 \text{ kg N ha}^{-1} \quad \text{Eq.3}$$

with 20 kg N ha^{-1} as the sustainability threshold for N loss. N losses were calculated from variables simulated with Azodyn. For each weather scenario and initial values of crop NNI, we estimated the amount of N uptake derived from fertilizer as the difference between total N uptake at harvest for a fertilized crop and total N uptake at harvest for a non-fertilized crop grown in the same conditions. We estimated potential N losses as the difference between total N applied and total crop N uptake from fertilizer.

If a given simulation respected these two constraints (Eq.2 and Eq.3), the sequence of N fertilizer application times and rates was considered viable.

2.4. Simulations and analysis

Following Sabatier *et al.* (2015), we used the mathematical framework of the viability theory to compute metrics of robustness. Robustness was defined as the proportion of weather scenarios for which there is at least one sequence of N fertilizer application times and rates ($N_t, N_{t+1}, \dots, N_T$) that keeps the stochastic dynamic system within the set of constraints (Eq.2 and Eq.3) over time.

First, we assessed the robustness of sequence of N fertilizer application times and rates, i.e. the proportion at a given NNI at time t of weather scenarios for which there is at least one sequence viable over time starting from state NNI_t .

Second, we assessed the robustness of N fertilizer application rates, i.e. the proportion for a given N rate applied at a given NNI at time t of weather scenarios for which there is at least one sequence viable over time starting from state NNI_t with N_t control. The precise time on which N was applied varied between years (Table 2). Thus, to assess the robustness of N fertilizer rates applied to different weather conditions, we split the period in which fertilizer applications took place into 15-day subperiods (Table 2). This resulted in a fertilizer application being linked to a subperiod, regardless of the exact time on which N was applied. For simplification purpose, each subperiod was characterized by a growth stage corresponding to the specific situation simulated (i.e. a crop sown at the end of October in Normandy) (Table 2). Decision rules were built by identifying, for each NNI at time t , the minimum N fertilizer rate that maximized the robustness. In order to limit background noise, we

started calculation of robustness only when a N rate (N_t) applied at a given NNI at time t (NNI_t) was simulated under more than five weather scenarios.

2.5. Comparison with current recommendations

Effects of sequences of N fertilizer application times and rates resulting from the implementation of the decision rules built by simulation with Azodyn were compared to sequences of N fertilizer applications times and rates resulting from current recommendations.

Firstly, we defined current recommendations by using the balance-sheet method to calculate the N rate that would be applied in the same agronomic situation (Table 1). The balance-sheet method is usually implemented at the end of winter. Thus, whatever the year-specific weather conditions, the N rate calculated *a priori* remains the same for a given agronomic situation. Each term of the balance-sheet equation were estimated based on regional references for similar soil types, soil mineral N content and preceding crops, and for a target yield of 8.5 t. ha⁻¹ (corresponding to the regional average for winter wheat in recent years). The total amount of N fertilizer was estimated at 210 kg N ha⁻¹. Based on current recommendations, this total amount of N was split into three or four N applications: a first application of 50 kg N ha⁻¹ at the end of winter (February 15th), a second application targeting the ear 1 cm growth stage (Z31) split into two successive applications of 60 kg N ha⁻¹ each in March, and a final application of 40 kg N ha⁻¹ between the second node (Z32) and flag leaf (Z37) stages. In line with common practice, times of application were as close as possible to the recommended growth stage provided that rainfall was likely to occur (Ravier *et al.*, 2017, submitted). Furthermore, no fertilizer was applied if weather conditions were not optimal at the target growth stage. This ruled out one or two N applications in some years. Thus, for most years, 210 kg N ha⁻¹ of N fertilizer was applied in four applications, but in five years, the total amount of N applied was reduced by 10 to 100 kg N ha⁻¹ and split into two or three applications only. The crop was assumed to not be deficient at the end of winter, which resulted in the initial NNI being set to 0.9 in Azodyn. Simulations were ran and the following data: grain yield (t ha⁻¹), grain protein content (%) and total N uptake (kg N ha⁻¹) at harvest (July 20th) were extracted.

Secondly, from the set of 289 268 simulations of N fertilizer application times and rates over twenty weather scenarios, only simulations with an initial value of NNI of 0.9 were selected. Within this batch of simulations, we identified those for which the sequence of N fertilizer application times and rates respected the decision rules built for the NNI-based method.

Thirdly, simulated grain yield (t ha⁻¹), grain protein content (%), total N rate (kg N ha⁻¹) and N losses (kg N ha⁻¹), resulted from sequence of N fertilizer application times and rates we compared year-by-year, for the two different methods. We also compared the mean values between methods using the least significant difference (LSD) with a 5% probability threshold, in Fisher's LSD tests.

3. Results

3.1. Robustness of sequence of N fertilizer application times and rates

From the whole set ($n = 289\,268$) of simulations, we calculated the robustness of sequence of N fertilizer application i.e. the proportion of weather scenario for which there is at least one viable fertilization sequence starting from a value of crop NNI at a time t (Fig.1). We found that the correlation between value of crop NNI at time t and robustness was not necessarily monotonous. Targeting a high level of NNI was not always the most robust way of managing N fertilization in the view of respecting the viability constraints. For example, there was not robust sequence of N-fertilizer application if the beginning of the crop cycle started with a very high plant N status (NNI at time t corresponding to $Z29 \geq 1.2$) (Fig. 1). In 70% of cases, the non-viability of sequences of N-fertilizer application resulted from N losses of more than 20 kg N ha^{-1} . Neither of the viability constraints was respected in 26% of the cases, and situations in which a low robustness resulted exclusively from NNI falling below the minimum NNI path accounted for only 4% of cases. Thus, low robustness mostly reflected that at time t , rate of crop growth was too low to uptake N from fertilizer, resulting in losses of more than 20 kg N ha^{-1} .

The minimum NNI path requires keeping NNI above 0.4 at growth stage Z31, 0.7 at stage Z32, 0.7 at stage Z37 and 0.8 at stage Z60 (Ravier et al., submitted). If the crop NNI is very close to the minimum NNI path, the robustness of the sequence of N fertilizer application appears to be very low (Fig. 1). Targeting NNI levels close to the minimum NNI path is, therefore, a risky strategy, mostly due to the time lag from N application to N uptake, during which NNI may fall below the minimum acceptable value. To limit risk and guarantee a minimum robustness of sequence N fertilizer application for each levels of crop NNI at any time t the NNI dynamic should be maintained well above the minimum NNI path, particularly at the beginning of the considered period (Fig.1). Assuming a minimum robustness of 0.7, leads to keep NNI above 0.6 for growth stage Z25, above 0.7 for Z29, above 0.8 from Z31 to Z37, and above 0.9 at Z40, while the minimum NNI path, is 0.4 - 0.7 - 0.7 and 0.8 at Z31, Z32, Z37 and Z40 respectively (Fig.1). This provided a robust NNI path for the NNI-based method, where the minimum NNI path is adjusted to guarantee a minimum proportion of 70% of weather scenario with at least one viable sequence of N fertilizer application at each level of crop NNI at time t .

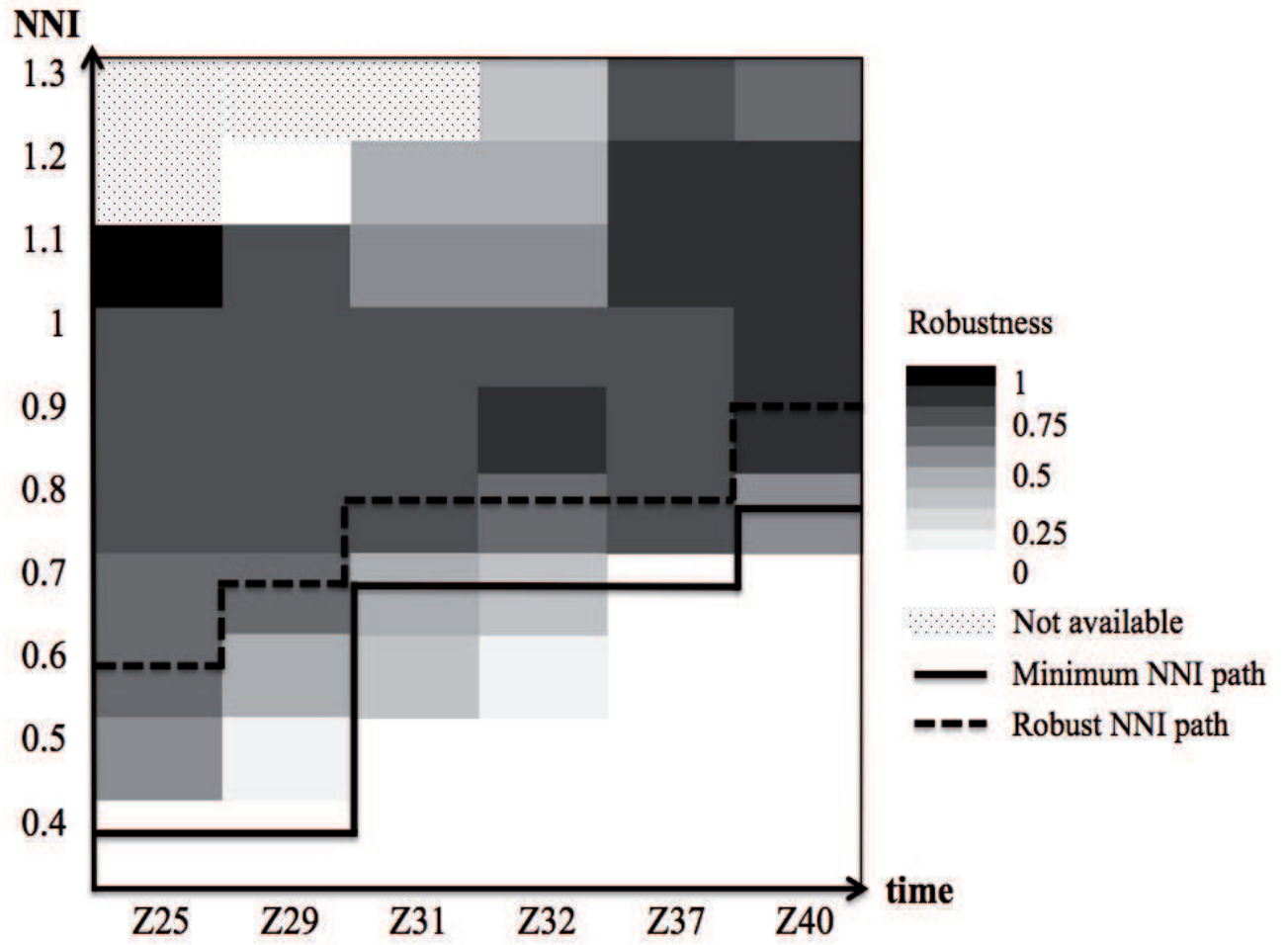


Fig. 1. Robustness of the sequence of N fertilizer application times and rates at a given value of crop NNI (y-axis) at a given time t (x-axis) corresponding to the crop growth stage. The black line is the minimum NNI path defined by Ravier et al. (submitted) and the dotted lines is the robust NNI path identified to guarantee at each given value of crop NNI at time t, 70% of weather scenario with at least one viable sequence starting from NNIt.

3.2. Robustness of N fertilizer application rates

For each time t , corresponding to growth stage, we represented the robustness of the five N fertilizer application rates (no fertilizer, 40, 60, 80 and 100 kg N ha⁻¹) as a function of crop NNI (Fig. 2.).

At growth stages Z25 (February 15th to 29th) and Z29 (March 1st to 15th), for every levels of crop NNI above 0.5, the robustness of the N fertilizer application rates decreased with increasing N rates (Fig. 2). It means that over the twenty weather scenarios, sequences of N fertilizer application times and rates, starting at a time t during this period, were most often viable without N fertilizer application rather than with N fertilizer application. At the beginning of the crop cycle, the fact that robustness did not increase even with N fertilizer application can be explained by the low crop growth rate at time t that resulted in low crop N uptake, leading to N losses higher than 20 kg N ha⁻¹. For low levels of crop NNI (i.e. those close to the minimum NNI path), the lack of increase in robustness is most often resulted from a decrease in NNI below the minimum acceptable value before uptake of the N fertilizer applied.

From growth stage Z31 (March 16th to 31st) to Z40 (May 1st to 13th), for a given level of crop NNI, the application of N fertilizer systematically increased robustness (Fig. 2). From Z31 to Z40, the N rates yielded maximum robustness varied depending on the level of crop NNI and lower NNI values were associated with a need for higher N rates to achieve maximum robustness.

At Z31 (March 16th to 31st), for levels of crop NNI ≤ 0.8 , the maximum robustness was achieved with 60 kg N ha⁻¹ and for levels of crop NNI > 0.8 , 40 kg N ha⁻¹ yielded maximum robustness.

At Z32 (April 1st to 15th), for level of crop NNI of 0.7 (which correspond to the threshold value of the minimum NNI path for this period), 100 kg N ha⁻¹ yielded maximum robustness, yet not high; for level of crop NNI of 0.8, the maximum robustness was achieved with 80 kg N ha⁻¹; and for levels of crop NNI ≥ 0.9 , 40 kg N ha⁻¹ yielded maximum robustness.

At Z37 (April 16th to 30th), for level of crop NNI of 0.8, the maximum robustness was achieved with 80 kg N ha⁻¹ and at this time a higher N rate decreased the robustness; for levels of crop NNI ≥ 0.9 , 40 kg N ha⁻¹ yielded maximum robustness.

At Z40 (May 1st to 13th) for each levels of crop NNI between 0.8 and 1.2 or more, 40 kg N ha⁻¹ yielded maximum robustness.

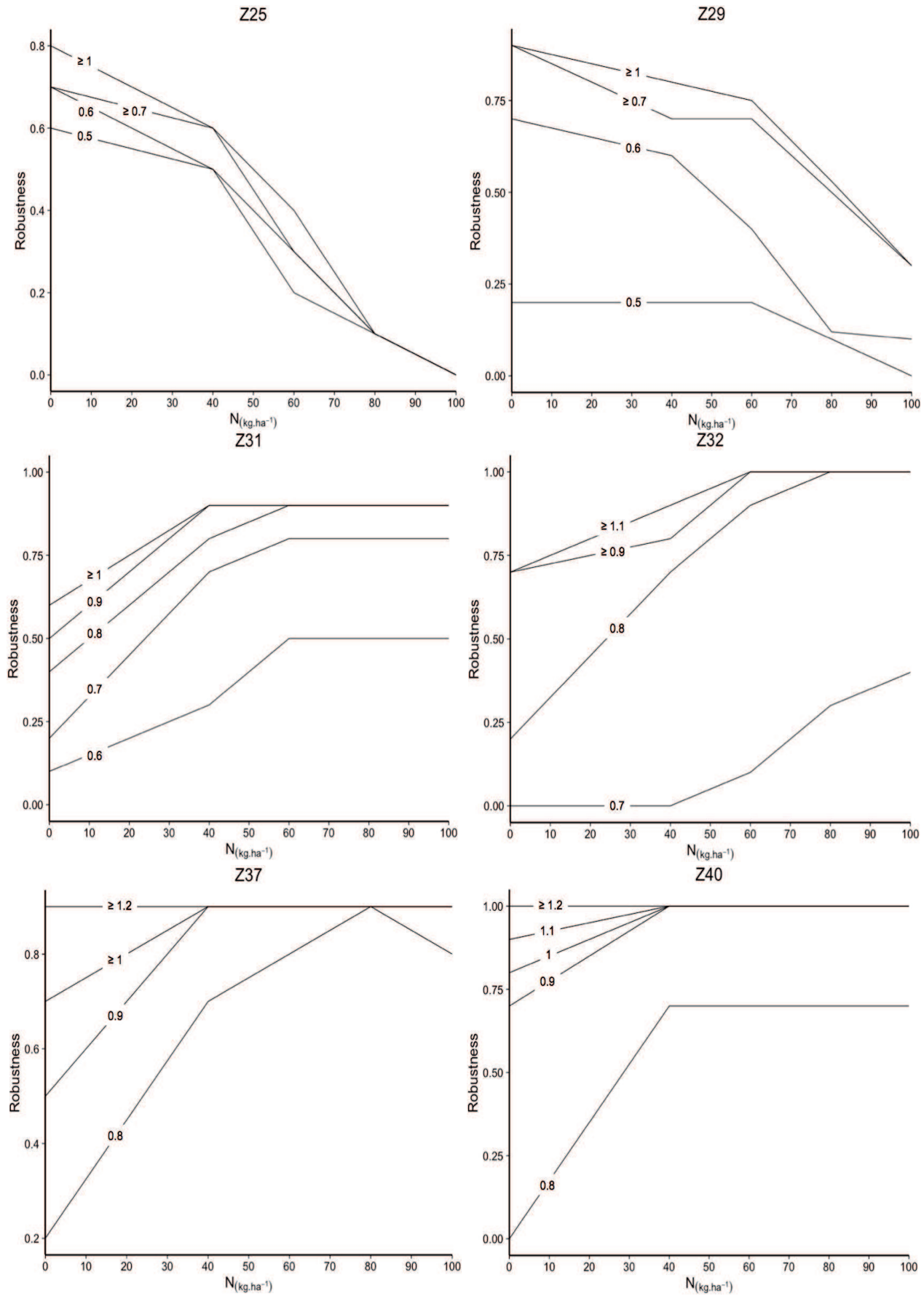


Fig. 2. Robustness (y-axis) of the fertilizer application options (x-axis) for different values of NNI (curves) for each subperiod of the crop cycle (subfigures). Those robustness of N fertilizer options were calculated using the values of the minimum NNI path for the viability constraint Eq.2. The subfigures correspond to growth stages Z25 (February 15th to 29th), Z29 (March 1st to 15th), Z31 (March 16th to 31st), Z32 (April 1st to 15th), Z37 (April 16th to 30th), and Z40 (May 1st to 13th)

3.3. Set of proposed decision rules

Based on the above graphical representation, we each level of crop NNI at each growth stage (time t) was associated to the lower the N fertilizer rate that maximized the robustness of the system (Table 3a). As suggested in Fig.1, the constraint of viability concerning the minimum NNI path (Eq.2) was adjusted in order to ensure a minimum robustness of sequences of N fertilizer application times and rates at each level of crop NNI at time t . Using the robust NNI path to guarantee a minimum proportion of 70% of weather scenario with at least one viable sequence of N fertilizer application at each level of crop NNI at time t (Fig.1), changed the decision rules. Indeed, the proportion of viable sequences of N fertilizer times and rates increased by 3%. Furthermore, non-viability patterns were different between the minimum NNI path and the robust NNI path. As the robust NNI path required keeping the NNI dynamic well above the minimum NNI path, the proportion of situations where non-viability resulted exclusively from NNI falling below the robust NNI path accounted for 35% of cases against 4% with the minimum NNI path. With the robust NNI path, in 52% of the cases neither of the viability constraints was respected and in 13% of the cases the non-viability of sequences of N-fertilizer application resulted from N losses more than 20 kg N ha⁻¹. The robustness of the five N fertilizer rates (no fertilizer, 40, 60, 80 or 100 kg N ha⁻¹) at each growth stage for each levels of crop NNI with the viability constraints of Eq.2 being set with the robust NNI path (Fig.1) was also assessed (data not shown). Decision rules resulting from this analysis is presented in table 3b.

At a given stage, the optimal N fertilizer rate decreases with increasing NNI, and the maximum rate of N fertilizer application increases with growth stage. Recommended N rates varied between the two NNI paths (minimum or robust). At a given crop NNI at time t , recommended N rates tend to be higher when taking the robust NNI path. At Z25 there is no difference: whatever the NNI, the maximum robustness was achieved without N fertilizer. At Z29, using the minimum NNI path, the recommendation would be no fertilizer for each crop NNI while, using the robust NNI path, for NNI of 0.8 the N fertilizer rate of 40 kg N ha⁻¹ yielded maximum robustness.

Table 3. N fertilizer rates that yielded maximum robustness when the viability constraint concerning NNI was a) the minimum NNI path and b) the robust NNI path. These decision rules are valid only for the specific agronomic situation studied

a)	Growth stage					
	Z25	Z29	Z31	Z32	Z37	Z40
Minimum NNI path	0.4	0.4	0.7	0.7	0.7	0.8
≤0.4						
0.5	0	0				
0.6	0	0	60			
0.7	0	0	60	100		
0.8	0	0	60	80	80	40
0.9	0	0	40	60	40	40
1	0	0	40	40	40	40
>1.1	0	0	40	40	0	0

NNI levels that should be avoided to keep the system viable

b)	Growth stage					
	Z25	Z29	Z31	Z32	Z37	Z40
Robust NNI path	0.6	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
≤0.7						
0.7	0					
0.8	0	40	80			
0.9	0	0	60	60	60	40
1	0	0	60	60	40	40
>1	0	0	40	0	40	0
<i>NNI levels that should be avoided to keep the system viable</i>						

3.4. Comparison between current recommendations and the NNI-based

3.4.1. Comparison of fertilization strategies

The NNI-based method resulted in significantly lower total N rates than current recommendations ($p < 0.001$, Fig. 3a): mean N application rates were 200 kg N ha⁻¹ for current recommendations, and 130 kg N ha⁻¹ for the NNI-based method with the minimum NNI path and 150 kg N ha⁻¹ with the robust NNI path. Mean total N application rates did not differ significantly between the NNI-based method with the minimum NNI path and with the robust NNI path ($p < 0.05$).

Sequences of N fertilizer application resulting from the implementation of decision rules of the NNI-based method (with both the minimum and robust NNI path as viability constraint) were compared to those achieved with current recommendations under the same weather scenario. The timing of N fertilizer application did not differ between minimum and robust NNI path. Indeed, the sequence difference regarding N rate that tended to be higher with the robust NNI path for same situation NNI t .

The NNI-based method led to more diverse splitting strategies than the current recommendations. With current recommendations, 99% of the years the total N rate was split in three or four N fertilizer applications while with the NNI-based method, there were various splitting strategies with three N fertilizer applications (45% of the years), two (40% of the years) and one (15% of the years).

The NNI-based method resulted in a later first application of N fertilizer than current recommendations (Fig. 3b). The timing of the first application was similar for the NNI-based with the minimum and the robust NNI path, whatever the year (Fig. 3b). Over all years, according to current recommendations, the first N application would take place between February 15th and March 1st, whereas, with the NNI-based method, the first N application would occur in between March 16th and 31st or later, after April 20th in four years. Furthermore, the date of the first application was more variable from year to year with the NNI-based method than with current recommendations, showing a better adaptation of timing of N fertilization application depending on the year (Fig. 3b).

For early applications in the season, the NNI-based method led to lower rates of N fertilizer than current recommendations. The beginning of stem elongation (Z30 on Zadoks' scale) is a reference growth stage in current N recommendations. To avoid drought risk during the spring, farmers tend to apply fertilizer earlier than this growth stage. In 75% of the year, the current recommendations led to

apply more than half the total amount of N fertilizer before Z30. With the NNI-based method, N fertilizer was applied before Z30 in five years with, N rate of 40 and 60 kg N ha⁻¹ with the minimum NNI path and 60 and 80 kg N ha⁻¹ with the robust NNI path.

For late applications in the season, the NNI-based method led to higher rates of N fertilizer than current recommendations. With current recommendations, the last N application occurred during stem elongation, at growth stage 37 on Zadoks' scale (corresponding to flag leaf emergence). The last N application was canceled twice due to non-optimal conditions for the application of N fertilizer and, in 90% of the 18 years with a late N application 40 kg N ha⁻¹ was applied after April 1st. In the NNI-based method, we assumed that N could be applied until booting, corresponding to about 15 days before flowering. N was thus always applied during the period from April 1st to the booting stage. The minimum amount applied during this period was 40 kg N ha⁻¹ with both the minimum and robust NNI path. The maximum was 140 kg N ha⁻¹ with the minimum NNI path and 160 kg N ha⁻¹ with the robust NNI path, split into two N applications after April 1st.

3.4.2. Comparison of performances

Mean yields were not significantly different when the NNI-based method and current recommendations were compared ($p > 0.5$; Fig. 4a). Based on 20-year averages, mean yields were 8.7 t ha⁻¹ with current recommendations, and 8.4 t ha⁻¹ for the NNI-based method with the minimum NNI path and 8.6 t ha⁻¹ with the robust NNI path. Within current recommendation, the balance-sheet was set with a predefined target yield to estimated crop N. However, the yields achieved with current recommendations were below the target yield in more than half the cases (Fig. 4a), thus leading to higher values of unused N fertilizer.

The NNI-based method resulted in significantly lower N losses ($p < 0.001$, Fig. 4b): mean N loss was about 55 kg N ha⁻¹ with current recommendations and 5 kg N ha⁻¹ for the NNI-based method with minimum and 7 kg N ha⁻¹ with robust NNI path. There was no significant difference between the NNI-based method with the minimum and robust NNI path ($p > 0.5$). For the 20 years considered, the NNI-based method, with both the minimum and robust NNI path, resulted in N losses higher than 20 kg N ha⁻¹ being lost only twice, whereas N losses exceeded 20 kg N ha⁻¹ in 95% of the simulated years with the current recommendations (Fig. 4b). The NNI-based method clearly outperformed current recommendations in this respect. Furthermore, for the only year in which N application rates were lower with current recommendations (see 2011 on Fig. 3a), yield (Fig. 4a) and grain protein content (Fig. 4c) were higher, and N losses were lower with the NNI-based method (Fig. 4b).

With the current recommendations, grain protein content was above 11.5%, which is a desirable grain protein content for the market, as often as not (Fig. 4c). With the NNI-based method, the grain protein content was above 11.5% in 70% of the cases with the minimum NNI path and in 85 % of the cases

with the robust NNI path (Fig. 4c). Indeed, three years, the decision based on the robust NNI path led to higher grain protein content than those based on the minimum NNI path.

Mean grain protein content did not differ significantly between current recommendations and NNI-based method ($p > 0.5$). When grain protein content did not exceed 11.5% with NNI-based method, it did not exceed 11.5% with current recommendations either, whereas the opposite pattern (below 11.5% with the current recommendation and above 11.5% with the NNI-based method) was observed in four years with the minimum NNI path and in seven years with the robust NNI path.

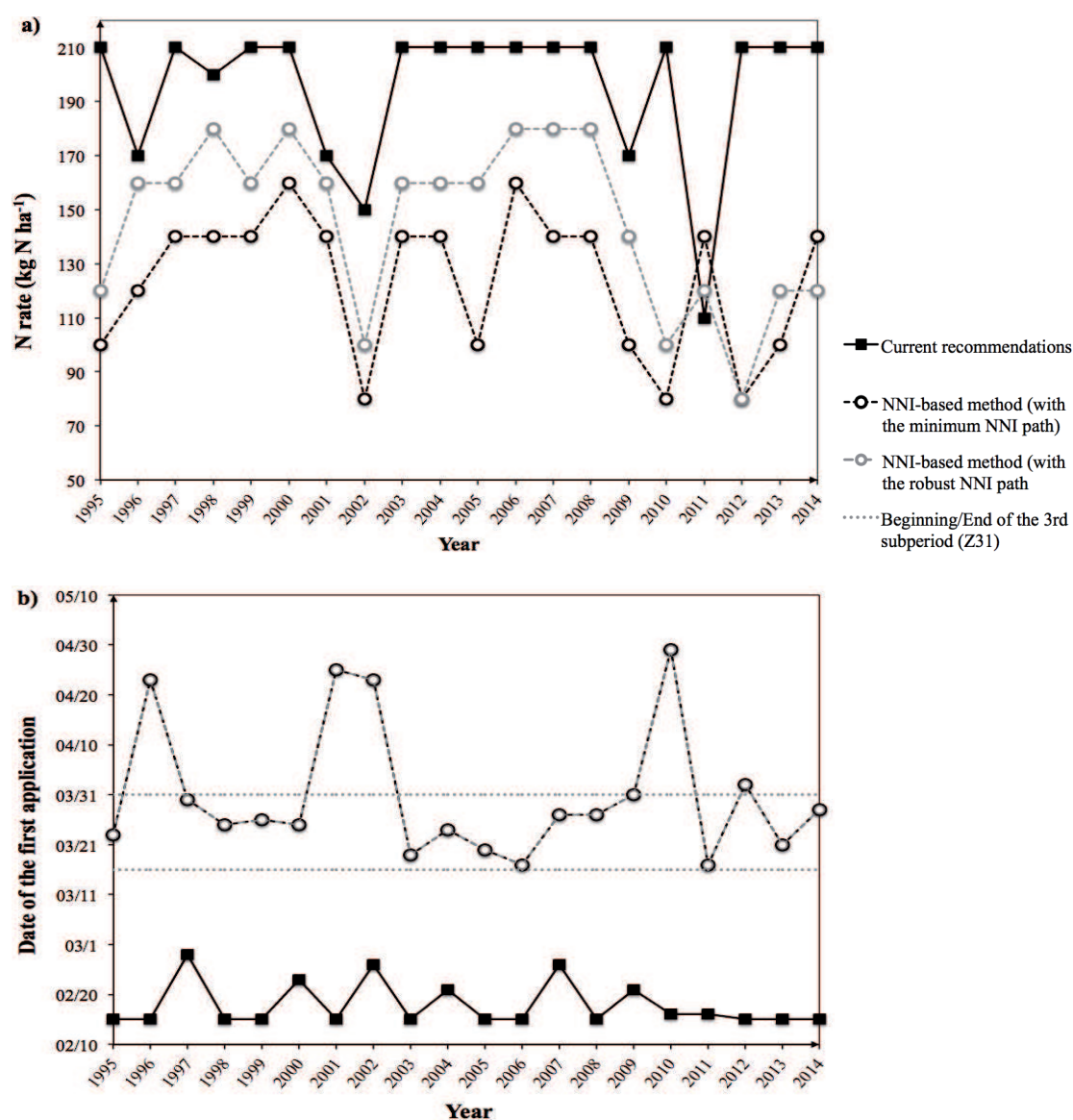


Fig. 3. Comparison of (a) the total N rate and (b) the date of the first N application with the NNI-based method with the minimum NNI path (●) and the robust NNI path (○) and current recommendations (■). The dates of N application were the same for the NNI-based method with minimum and robust NNI path

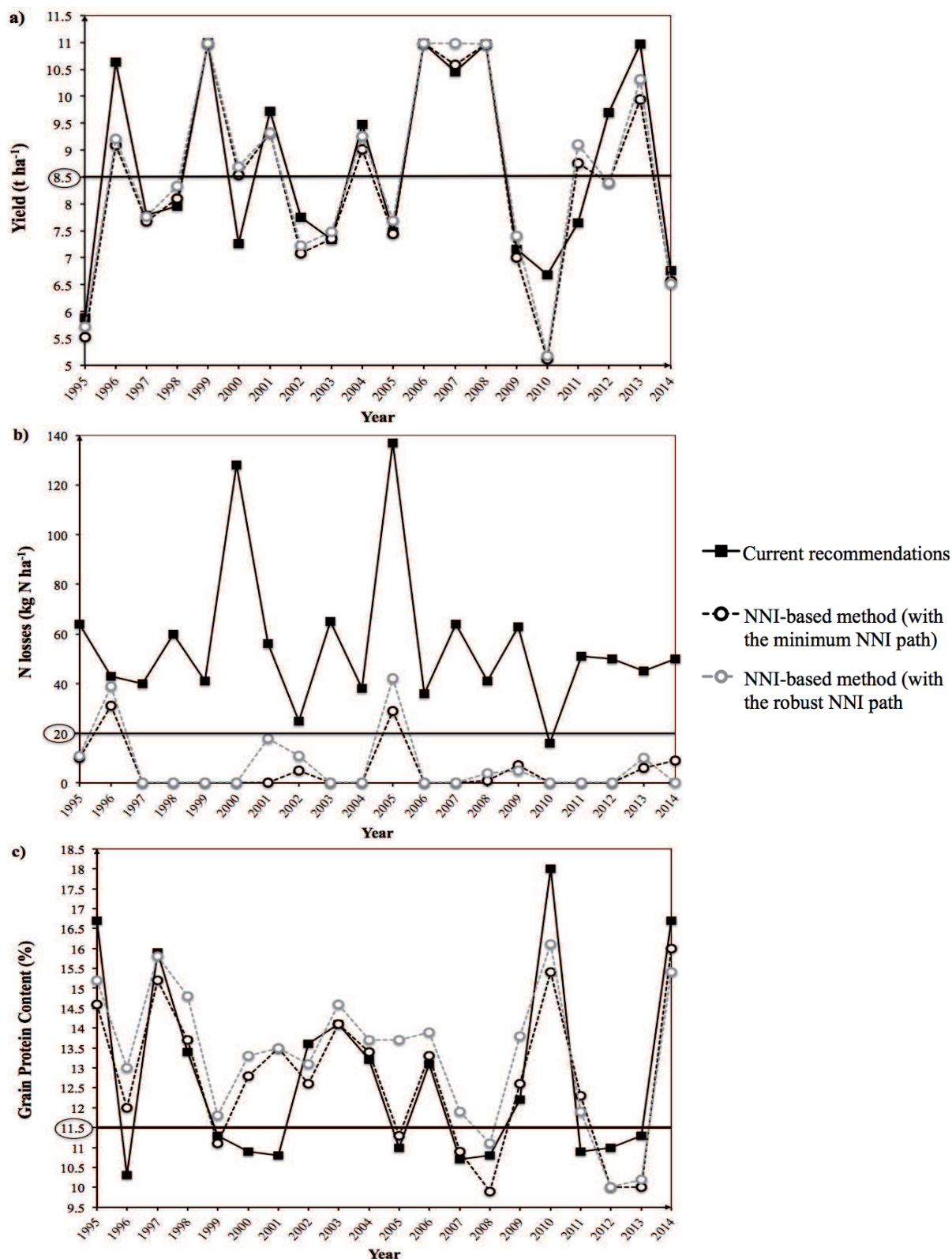


Fig. 4. Year-by-year comparison of economic performances: a) grain yield (t ha⁻¹) and c) protein content (%), and environmental performances b) N losses (kg N ha⁻¹) achieved with the current recommendations (■), the NNI-based method with the minimum NNI path (●) and the robust NNI path (○). Yield (a) was compared with the target yield fixed for the calculation of N application rates by the balance-sheet method (8.5 t ha⁻¹); N losses (b) were compared with the sustainable threshold value we suggested (20 kg N ha⁻¹), and grain protein content (c) was compared with the desirable grain protein content for market (11.5 %)

4. Discussion

4.1. Change in practices

The decision rules developed in this study to implement the NNI-based method led to delay N fertilizer application, compare to current recommendations. If the comparison with current recommendations highlighted promising results, in practices, such strategies, where N fertilizer applications are delayed, are perceived as particularly risky. Indeed, farmers tend to apply N fertilizer as soon as the weather forecast announces rain, regardless of crop N requirement (Ravier *et al.*, submitted). Thus, given farmers' perception about drought risks, they might be unwilling to not apply N fertilizer at the beginning of the vegetative growth while weather conditions are optimal.

First, we can argue that depending on future climate, the risk associated with the method would be increased if drought periods tend to increase, and be decreased if frequencies of precipitations tend to increase. Current climatic studies predict a potential increase of rainfall in Northern Europe, however, the hydrological impact of climate change is still highly uncertain (Douville and Terray, 2010). A careful adjustment of the model to future climatic conditions is therefore an important step before applying it to the field.

Secondly, we can put forward that the NNI-based method can be more relevant previous method. Indeed, Limaux *et al.* (2001) developed method based on a change in color (yellowing) of a double-density strip within the field, yet the method was not widely adopted because farmers considered that the visual interpretation of the indicator to be too subjective. Here, the method is based a specific indicator as NNI varied only with N nutrition (Meynard *et al.*, 1997) which is relevant for an activation rule (Aubry *et al.*, 1998). Furthermore, as suggested by Toffolini *et al.* (2016), to support farmers' actions, indicators should be learning-oriented, facilitating understanding and interpretation. In this sense, Ravier *et al.* (submitted) shown that regular monitoring of NNI provides opportunities for farmers to learn: As soon as NNI can be estimated regularly during the crop cycle, it can 1) provides real-time information about crop N status, reassuring farmers about the fact it is not limiting for yield; 2) be used to control efficiency of past applications; and 3) be a mean to interpret N dynamics in the plant and in the soil.

4.2. Updating the Azodyn model to include the minimum NNI path

According to our simulations, mean grain yield did not differ significantly between sequences of N fertilizer application times and rates resulting from current recommendations and from the NNI-based method. However, Azodyn predictions of grain yield are on the conservative side, taking into account an effect of N deficiency on grain number (David *et al.*, 2004). Based on Jeuffroy and Bouchard (1999) study, the yield loss due to N deficiency was simulated with the indicator IDD, which is the product of the intensity and duration of the N deficiency. In our study, we assumed that N deficiency damages yield only if NNI falls below the minimum NNI path. However, it might be necessary to

compare the IDD calculated for NNI dynamics resulting from the implementation of the NNI-based decision rules. As IDD of the NNI dynamics resulting from those decision rules could fall under the threshold suggested by Jeuffroy and Bouchard (1999) we may have simulated a decrease in grain number whilst assuming the deficiency was not damaging yield, thus underestimating yield in our simulations. The updating of Azodyn hypotheses to take into account the minimum NNI path might therefore be expected to lead to the prediction of similar or even better grain yields with the new method.

4.3. Adapting recommendations in practice

The analysis of robustness showed that, for some values of crop NNI (for example, low NNI at early growth stages), there were few viable sequence of N fertilizer application (see light gray states in Fig. 1), and no highly robust N fertilizer rate (Fig. 2). However, in practices, we should provide an appropriated solution (applying N fertilizer or not) if such situations are encountered. Low robustness can be due to N application that cause N losses higher than 20 kg N ha^{-1} due to low N uptake (Foulkes *et al.*, 2009), or to the time lag between N application and N uptake may lead to NNI falling below the minimum NNI path for a short period.

We tested the effect of different levels of threshold values for N losses on the robustness of sequences of N fertilizer application at each NNI at time t (see appendix 1). We observed that increasing the threshold values to 30 or 40 kg N ha^{-1} of losses, increased robustness of sequences starting from time t with high NNI ($\text{NNI} > 1$) yet, there was no effect for sequences starting from time t with low NNI ($\text{NNI} < 0.7$). Thus, for high levels of crop NNI, the low robustness was due to N losses higher than 20 kg N ha^{-1} and for low levels of crop NNI, the low robustness was due to NNI that fall under the minimum NNI path. For instance, at growth stage Z25, the decision rules (based on the minimum and the robust NNI path) suggested that no fertilizer yield maximum robustness, yet, for values of crop $\text{NNI} \leq 0.7$, there is a risk that without applying N fertilizer at Z25 the NNI would fall under the minimum and robust NNI path by the next growth stage Z29. Thus, in practices we would nevertheless recommend an application of N fertilizer to low values of crop NNI in order to ensure that the crop NNI will be maintained above the NNI path.

4.4. Optimal weather conditions for maximizing NUE

The NNI-based method required regular monitoring of crop N status at times of optimal weather conditions for the valorization of N fertilizer. Advisors frequently recommend applying fertilizer when at least 15 mm of rainfall is expected to fall within the following 15 days to guarantee high N use efficiency (Cohan and Bouthier, 2010). However, this recommendation has two important consequences: (i) weather forecasts are often too unreliable to provide accurate rainfall predictions for the next 15 days (Kusunose and Mahmood, 2016), and (ii) the threshold of 15 mm is rather high, increasing the risk of early fertilizer application, as soon as rain is predicted. However, there is no scientific consensus on the definition of optimal weather conditions for fertilizer application, and the

advice given is based on empirical observations. Only a few studies have investigated this question, probably because such investigations require the use of a heavy experimental device with, for identical soil and crop N status conditions, different weather conditions at the time of application and various types of fertilizer, plus the equipment necessary for the assessment of all N losses through different process (gaseous emission, leaching and organization in soil) after N application. Nevertheless, we gathered together information from previous studies, mostly focusing on N volatilization, the process responsible for the largest N losses, to identify the days on which weather conditions were optimal for N fertilizer application. Even if there is no consensus about threshold values, several authors have shown that applying N fertilizer during a rainfall event strongly limits N losses by volatilization (Meyer, 1961; Powlson *et al.*, 1992; Campbell *et al.*, 1995; Jones *et al.*, 2013). Considering a minimum cumulative rainfall of 10 mm in the three days following the fertilizer application as optimal seemed to be relevant (Jones *et al.*, 2013). Furthermore, optimal conditions of fertilizer valorization varied with fertilizer type: solid N fertilizers tend to lead to higher levels of N volatilization than liquid fertilizers, for N applications on humid soils (Meyer, 1961; Jones *et al.*, 2013). By contrast, there is less volatilization from solid fertilizer than from liquid fertilizer when applied on dry soils (Génermont and Cellier, 1998; Jones *et al.*, 2013). Indeed, soil moisture can trigger the degradation of solid forms of fertilizer without being sufficient to allow N to diffuse into the soil (Meyer, 1961). Azodyn has been refined to estimate volatilization, according to the form of N (ammonia (NH_4) and nitrate (NO_3)), soil humidity and rainfall after N application (Beillouin *et al.*, in preparation). Nevertheless, in the model, valorization could be differentiated further according to the physical form of N fertilizer (solid or liquid), and could take into account that in some situations, solid N fertilizer applied on humid soil could lead to high N losses.

4.5. Extrapolation to other agronomic situations

This work, considered as a proof of concept, concerned a single agronomic situation (i.e. for one soil type, one preceding crop etc...). However, this approach could easily be applied to other situations. This would require 1) setting Azodyn input data (Table 1) for the new situations considered; 2) identifying days with optimal weather conditions for N fertilizer application (Table 2) for each weather scenario; 3) building a simulation plan with all possible N fertilizer rate at each time with optimal conditions; 4) characterizing each stimulation in terms of whether the NNI and N-loss thresholds are respected; 5) calculating the robustness of sequences of N fertilizer application times and rates and of N rates at each level of crop NNI at each time. Decision rules are assumed to differ slightly between agronomic situations and weather conditions, because: (i) soil type strongly influences soil N dynamics and, thus, N availability to the plant during the growing season; (ii) successive growth states may occur on different dates, modifying the daily minimum NNI values to be respected on particular calendar dates; (iii) weather conditions may strongly influence application dates. Finally, the robustness of N rate changes is probably also dependent on agronomic situation.

4.6. Using the viability theory framework to build decision rules with Azodyn

According to Passioura (1996), agronomic models can be grouped into two categories: those improving our understanding of crop physiology in interaction with the environment, and those providing sound management advice. In this second approach, models are generally used to identify an optimal solution, through a comparison of alternatives, often with artificial intelligence algorithms (Loyce *et al.*, 2002, Bergez *et al.*, 2010), or based on exchanges with stakeholders in a participatory approach (Woodward *et al.*, 2008). Models can thus be seen as exploratory tools for assessing the effects of a diverse range of options (Rossing *et al.*, 1997). They can be used to test hypotheses (Bouman *et al.*, 1996) and to estimate or predict the impact of practices (Stöckle *et al.*, 2003; Brisson *et al.*, 2003; Ledoux *et al.*, 2007). Here we aimed to identify an optimal N rate to be applied while taking into account the possibility, conditioned by the weather, to still apply N fertilizer later. We used a viability-based approach, similar to that described by Sabatier *et al.* (2015), to assess robustness. Here, we sought to achieve a compromise between the risk of N losses following the application of fertilizer in non-optimal conditions for valorization and the risk of damaging yield with detrimental N deficiency. Viability-based approaches can be used to achieve such a compromise, by making it possible to define a set of constraints of different natures reflecting production and environmental objectives (e.g. Sabatier *et al.*, 2010; Mouysset *et al.*, 2014). The way in which we have taken N losses to the environment into account is a shift from current recommendations, mostly based on the balance-sheet method which is parameterized to achieve a fixed target yield (independent of the weather of the year) and considers the minimization of N losses as a secondary objective, after the target yield has been achieved. In addition, the NNI-based method is designed to facilitate dynamic sequential decisions, thus adjusting the decisions to the crop evolution (thus taking into account the effect of the weather). At each time t , we ensure that management remains viable at the following time points ($t+1$, $t+2$ etc.).

5. Conclusion

We provide here a set of decision rules to determine, in real time and as a function of crop N status, the rate of N fertilizer most likely, whatever the next possible time to apply N fertilizer, to keep crop NNI above a minimum NNI path, making it possible to achieve maximum yields and to prevent N losses of more than 20 kg N ha⁻¹. Viability theory provides an original framework, never used before for the development of a decision support system for N fertilizer management based on a soil-crop model, such as Azodyn. This approach could also be applied to other crops, such as rapeseed or fruit trees, and to other agricultural decisions for which real-time decisions are based on the monitoring of indicators, such as pest or water irrigation management. An analysis of the robustness of management options showed that a distinction should be made between the physiological threshold and the management threshold. Field experiments are now required: 1) to determine whether the NNI-based method can actually support farmers' change in N fertilizer management. This will require a

convenient way to measure NNI without the need for time-consuming and destructive plant sampling, and an adaptation of the decision rules to diverse agronomic situations; and 2) to confirm that yields are similar to or better than those achieved with current recommendations, whilst decreasing the total amount of N fertilizer applied and N losses. If this method proves effective, it would be particularly suitable for use in precision agriculture, in which farmers are equipped to measure plant indicators and could even adjust N application rates within fields on the basis of NNI estimation with onboard sensors.

Acknowledgments:

We thank *Arvalis-Institut-du-végétal*, and the ADEME (*Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*) for funding this study. This study was part of the REACCTIF project. We thank Julie Sappa (Alex Edelman & Associates) for reviewing the English. And we thank Bertrand Omon for providing the data to set Azodyn parameter for the studied situation.

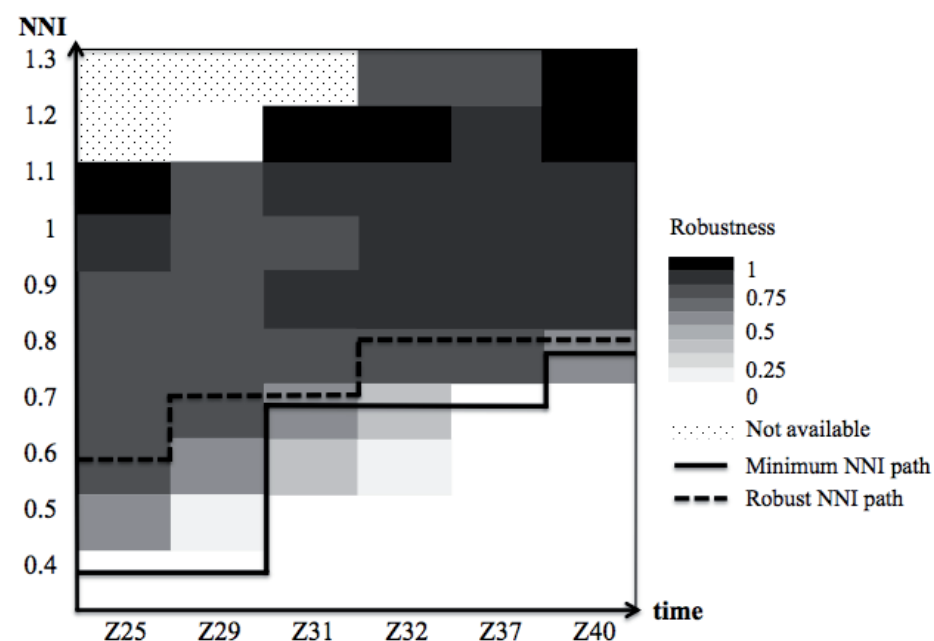
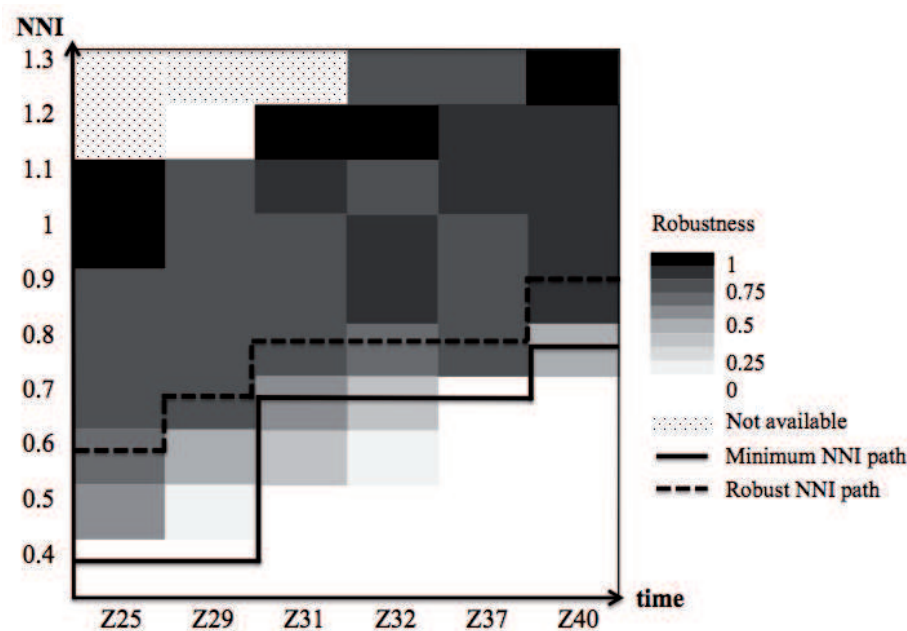
References

- Aubin J-P. 1991. Viability Theory. Birkhäuser Boston, Boston. Available from <http://link.springer.com/10.1007/978-0-8176-4910-4> (accessed December 4, 2015).
- Aubry, C., Papy, F., Capillon, A., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56, 45–65. doi:10.1016/S0308-521X(97)00034-6
- Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32, 3–9. doi:10.1016/j.eja.2009.06.001
- Bergez J.E., Chabrier P., Gary C., Jeuffroy M.H., Makowski D., Quesnel G., Ramat E., Raynal H., Rousse N., Wallach D., Debaeke P., Duru M., Dury J., Faverdin P., Gascuel-Odoux C., Garcia F., 2013. An open platform to build, evaluate and stimulate integrated models of farming and agro-ecosystems. *Environmental Modelling and Software* 39 (1), 39-49.
- Bouman, B.A.M., van Keulen, H., van Laar, H.H., Rabbinge, R., 1996. The “School of de Wit” crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* 52, 171–198. doi:10.1016/0308-521X(96)00011-X
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, J., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy* 18, 309–332. doi:10.1016/S1161-0301(02)00110-7
- Campbell, C.A., Myers, R.J.K., Curtin, D., 1995. Managing nitrogen for sustainable crop production. *Fertilizer Research* 42, 277–296.
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 31, 132–140.
- Cohan, J.P., Bouthier, A., 2010. Engrais Azoté, pluie après l’apport: un facteur d’efficacité déterminant. *Perspectives Agricoles*, 364, 38-39.
- David, C., Jeuffroy, M.H., Recous, S., Dorsainvil, F., 2004. Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* 21, 249–266. doi:10.1016/j.eja.2003.09.003
- Douville, H., Terray, P., 2010. Réponse du cycle hydrologique aux for ages anthropiques, in : Braconnot, P., Dufresne, J.L., Salas y melia, D., Terray, L., Analyse et modélisation du changement climatique, 2 me  dition du Livre Blanc Escrime, 51-58.
- Doyen L, De Lara M. 2010. Stochastic viability and dynamic programming. *Systems & Control Letters* 59:629–634.

- Foulkes, M.J., Hawkesford, M.J., Barraclough, P.B., Holdsworth, M.J., Kerr, S., Kightley, S., Shewry, P.R., 2009. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. *Field Crops Research* 114, 329–342. doi:10.1016/j.fcr.2009.09.005
- Générmont, S., Cellier, P., 1998. Using a mechanistic model for evaluating ammonia emissions abatement techniques after organic fertilization, in: *Proceeding of the 8th International Conference of the FAO ESCORENA Network on Recycling of Agricultural, Municipal and Industrial Residues in Agriculture*, Rennes, France, 333–343.
- Hébert, J.C., 1969. La fumure azotée du blé. *Bulletin technique d'information*. 244, 755–766.
- ITCF 1978. La fertilisation azotée du blé. *Institut Technique des Céréales et Fourrages*, 28p.
- Jeuffroy, M.H., Bouchard, C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Science* 39, 1385–1393. doi:10.2135/cropsci1999.3951385x
- Jeuffroy, M.-H., Recous, S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European Journal of Agronomy* 10, 129–144.
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Machet, J.M., Thelier-Huché, L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74, 397–407. doi: 10.1006/anbo.1994.1133
- Jones, C., Brown, B.D., Engel, R., Horneck, D., Olson-Rutz, K., 2013. Management to minimize nitrogen fertilizer volatilization, *Montana State University Extension*, 4p.
- Kissel, D.E., Cabrera, M.L., Vaio, N., Craig, J.R., Rema, J.A., Morris, L.A., 2004. Rainfall timing and ammonia loss from urea in a loblolly pine plantation. *Soil Science Society of America Journal* 68, 1744. doi:10.2136/sssaj2004.1744
- Kusunose, Y., Mahmood, R., 2016. Imperfect forecasts and decision making in agriculture. *Agricultural Systems* 146, 103–110. doi:10.1016/j.agsy.2016.04.006
- Ledoux, E., Gomez, E., Monget, J.M., Viavattene, C., Viennot, P., Ducharne, A., Benoit, M., Mignolet, C., Schott, C., Mary, B., 2007. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS–MODCOU modelling chain. *Science of The Total Environment* 375, 33–47. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.002
- Lemaire, G. (Ed) 1997. *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 239 p.
- Lemaire, G., Meynard, J.M., 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical date, in: Lemaire, G., (Ed) *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 45–56.
- Limaux, F., Recous, S., Meynard, J.-M., Guckert, A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214, 49–59.
- Limaux, F., Meynard, J.M., Recous, S., 2001. Déclencher la fertilisation azotée du blé : bases théoriques et principes généraux. *Perspectives Agricoles*, 273, 62–70.
- Meyer, R.D., Olson, R.A., Rhoades, H.F., 1961. Ammonia losses from fertilized Nebraska soils. *Agronomy Journal* 53, 241–244.
- Meynard J.M., Aubry, C., Justes, E., Le Bail, M., 1997. Nitrogen diagnosis and decision support, in: Lemaire, G. (Ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer, Berlin, Heidelberg, 147–162
- Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817–829. doi:10.1051/agro:2002064
- Monteith J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747–766
- Mouysset L, Doyen L, Jiguet F, 2014. From population viability analysis to co-viability of farmland biodiversity and agriculture. *Conservation Biology*, 28, 187–201.
- Olf, H.W., Blankenau, K., Brentrup, F., Jasper, J., Link, A., Lammel, J., 2005. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 414–431. doi:10.1002/jpln.200520526

- Passioura, J.B., 1996. Simulation models: science, snake oil, education, or engineering? *Agronomy Journal* 88, 690. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050002x
- Powlson, D.S., Hart, P.B.S., Poulton, P.R., Johnston, A.E., Jenkinson, D.S., 1992. Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to winter wheat in spring. *The Journal of Agricultural Science* 118, 83. doi:10.1017/S0021859600068040
- Recous, S., Machet, J.M., 1999. Short-term immobilisation and crop uptake of fertiliser nitrogen applied to winter wheat: effect of date of application in spring. *Plant and Soil*, 206, 137-149. doi:10.1023/A:1004377006602
- Rossing, W.A., Meynard, J., van Ittersum, M., 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: case studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 7, 271–283. doi:10.1016/S1161-0301(97)00042-7
- Sabatier R, Doyen L, Tichit M., 2010. Modeling trade-offs between livestock grazing and water conservation in a grassland agroecosystem *Ecological Modelling* 221, pp. 1292-1300
- Sabatier, R., Oates, L.G., Jackson, R.D., 2015. Management flexibility of a grassland agroecosystem: A modeling approach based on viability theory. *Agricultural Systems* 139, 76–81. doi:10.1016/j.agsy.2015.06.008
- Samborski, S.M., Tremblay, N., Fallon, E., 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy Journal* 101 (4), 800-816. doi:10.2134/agronj2008.0162Rx
- Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J.S., 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 51–62. doi:10.1016/j.compag.2007.06.006
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289–307.
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., 2016. Indicators used by farmers to design agricultural systems: a survey. *Agronomy for Sustainable Development* 36. doi:10.1007/s13593-015-0340-z
- Woodward, S.J.R., Romera, A.J., Beskow, W.B., Lovatt, S.J. 2008. Better simulation modelling to support farming systems innovation: Review and synthesis. *New Zealand Journal of Agricultural Research*, 51 (3), 235-252. DOI : 10.1080/00288230809510452

Appendix 1. Robustness of the sequence of N fertilizer application times and rates with different threshold values of N losses



Chapitre V - Production de connaissances actionnables : Estimation de l'INN tout au long du cycle au moyen de la mesure de la teneur en chlorophylle des feuilles

Pour pouvoir mesurer l'INN régulièrement, nous avons besoin de trouver un indicateur facile à mesurer qui soit corrélé à l'INN. Les progrès technologiques des 30 dernières années ont permis de développer un panel d'outils permettant de mesurer des indicateurs plantes. Qu'ils soient basés sur la teneur en nitrate du jus de bas de tige, la teneur en chlorophylle des feuilles ou la réflectance du couvert, ils visent tous à donner une information en temps réel sur l'état du couvert en vue d'ajuster la fertilisation azotée. Lors des ateliers de conception ce point essentiel avait été discuté. Il fallait un indicateur simple à utiliser mais aussi dont le domaine de validité soit cohérent avec nos besoins : utilisable tout au long du cycle et discriminant même pour des niveaux d'INN faibles. Effectivement nous avons besoin de plus que d'un indicateur permettant de détecter la carence. Par exemple, la teneur en nitrate du jus de bas de tige permet de détecter des carences pendant la montaison ; les outils de mesure de réflectance peuvent difficilement s'utiliser en début de cycle où la faible couverture du sol par le couvert limite la capacité d'interprétation. Finalement, ce sont les outils de mesure de la teneur en chlorophylle qui sont ressortis: ils sont utilisables à n'importe quel moment du cycle et discriminent bien les niveaux d'INN faibles. Cependant, ces outils ont plutôt été utilisés pour faire des mesures en fin de cycle et gérer le dernier apport. A partir d'une revue de la littérature, nous montrons qu'il n'y a pas de consensus ni sur la meilleure relation entre INN et teneur en chlorophylle ni sur la forme de l'indicateur à savoir s'il faut mieux utiliser une valeur de teneur en chlorophylle absolue ou normalisée. Nous avons donc testé différents modèles de prédiction, dont les formes (linéaire, quadratique et exponentielle) et les variables d'entrées (biomasse, variété, stade de croissance) sont le plus souvent retrouvées dans la littérature, avec des valeurs de teneur en chlorophylle absolues et normalisées. Nous avons ensuite proposé une méthode de sélection du meilleur modèle en nous basant sur plusieurs critères statistiques : l'erreur moyenne du modèle avec la RMSE, l'erreur de prédiction du modèle avec la RMSEP et la vraisemblance du modèle avec l'AIC. Nous discutons le choix du meilleur modèle pour prédire l'INN à partir d'une teneur en chlorophylle mesurée à n'importe quel moment du cycle ; du début de l'élongation de la tige à la floraison.

Ce travail fera l'objet d'une publication scientifique.

Use of a chlorophyll meter to assess nitrogen nutrition index during the growth cycle in winter wheat

Clémence Ravier^{1,2*}, Miguel Quemada³, Marie-Hélène Jeuffroy¹

¹ UMR211 Agronomie, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, BP 01, 78850 Thiverval-Grignon, France

² Arvalis-Institut-du-Végétal, Station expérimentale de la Jaillière, 44370 La Chapelle Saint-Sauveur, France

³ Technical University of Madrid, Department of Agricultural Production, Avd. Complutense s/n, 28040 Madrid Spain.

*Corresponding author: Clémence Ravier

Postal address: Campus de Grignon, Bâtiment EGER, UMR Agronomie, 78850 Thiverval-Grignon, France

E-mail address: clemence.ravier@inra.fr

Highlights:

- We studied the relationship between CMR and NNI throughout the growth cycle
- The use of normalized CMR improves the predictive value of NNI
- Growth stage is highly influential, even with normalized measurements
- Biomass and cultivar effects should be taken into account when using absolute CMR

Abstract: We investigated the feasibility of predicting crop nitrogen nutrition index (NNI) from chlorophyll meter readings (CMRs) during the crop cycle, for the development of a fertilization method for winter wheat (*Triticum aestivum* L.) based on the regular monitoring of crop N status. The relationship between NNI and CMR has been studied before, but only for CMRs obtained late in the season. A literature review revealed an absence of consensus concerning the most accurate equation for predicting NNI from CMR. It remains unclear which variables are the most influential and the extent to which it might be possible to overcome these uncertainties by using a normalized chlorophyll meter reading. We therefore carried out multimodel selection, comparing goodness-of-fit, prediction accuracy and likelihood, for linear, quadratic and exponential models, taking into account only biomass, cultivar, biomass plus cultivar and growth stage effects. Models were fitted with absolute and normalized measurements. We also considered the possibility of predicting NNI with a single model or with different models for each growth stage. We found that normalized measurements limited the biomass and cultivar effects, but not the growth stage effect. Furthermore, the use of normalized measurements increased prediction accuracy. However, the prediction error remained very high if the well-fertilized strip was N-deficient (NNI < 0.9). Finally, the best compromise was found to be a model for each growth stage, using absolute measurements, but taking into account the effects of biomass and cultivar.

Key words: fertilization management, N crop status, soil N, multi-model selection, NNI, SPAD

1. Introduction

Competitiveness, environmental issues and market requirements for product quality are constraints that farmers must take into account when applying nitrogen fertilizer. These constraints have tightened in recent years, necessitating more accurate management and the adaptation of N fertilization during the growing season (Jeuffroy *et al.*, 2002). Efforts have focused on strategies based on in-season N applications taking soil and crop N status during the vegetative period into account, to improve the synchronization of soil N availability and crop N demand (Shanahan *et al.*, 2008; Olfs *et al.*, 2005). Fertilizer applications should be based on precise estimates of crop N requirements, so that the amount of nitrogen required can be applied, without excess, in conditions in which the N uptake capacity of the plant is high (Samborski *et al.*, 2009). This precise management of fertilizer applications necessitates regular monitoring of crop N status during the growing season. Crop N status is a function of both crop biomass and N concentration, and can be quantified by calculating the nitrogen nutrition index (NNI), a highly reliable indicator (Justes *et al.*, 1994). NNI is calculated relative to the critical nitrogen concentration, defined as the minimal crop N concentration required for maximal aerial dry matter production (Justes *et al.*, 1994). This critical nitrogen concentration corresponds to an NNI value of 1, and the value of NNI obtained for a particular crop therefore indicates whether the N nutrition status of the crop is limiting for maximal crop biomass production (Mistele and Schmidhalter, 2008). NNI can also be used to identify situations in which limiting N nutrition leads to yield loss relative to the local weather-dependent potential yield (Lemaire and Meynard, 1997; Jeuffroy and Bouchard, 1999). However, NNI determination requires destructive time-consuming measurements of plant N content and crop biomass for a plant sample. Various types of diagnostic tool have been developed for assessing the N status of a crop within the growing season, to provide farmers with decision support based on different measurements (Confalonieri *et al.*, 2015). Plant-sap nitrate concentration, leaf chlorophyll content and crop transmittance and reflectance are the most commonly used indicators on which N fertilizer recommendations are based (Olfs *et al.*, 2005; Samborski *et al.*, 2008). Hand-held chlorophyll meters are convenient instruments that can provide rapid results for diagnostic purposes. The relationship between chlorophyll meter reading (CMR) and crop N status has been extensively studied for various crops, including maize (Schepers *et al.*, 1992), apple trees (Nielsen *et al.*, 1995), cotton (Wood *et al.*, 1992), and wheat (Follet *et al.*, 1992; Reeves *et al.*, 1993; Fox *et al.*, 1994). Most studies on wheat have tried to find a relationship between CMR and grain yield that could be used to identify fields likely to display a grain yield response to additional N fertilizer and, therefore, for recommendations concerning fertilizer management (Follet *et al.*, 1992; Reeves *et al.*, 1993; Fox *et al.*, 1994; Bavec and Bavec, 2001; Arregui *et al.*, 2006). The possible use of late-season CMRs to achieve high grain quality has also been investigated (Matsunaka *et al.*, 1997; Le Bail *et al.*, 2005; Ortuzar-Iragorri *et al.*, 2005). It has generally been concluded that CMR is a relevant indicator of grain protein content, grain yield or the need for additional fertilizer

only for measurements taken late in the season. It is generally agreed that CMR may be affected by many external factors that can affect sensor performance, such as pests and diseases, leaf thickness, solar irradiance and water status (Samborski *et al.*, 2009). Many studies have, therefore, focused on the use of a normalized CMR measurement (nCMR) to improve the accuracy of these diagnosis tools (Arregui *et al.*, 2006; Debaeck *et al.*, 2006; Prost and Jeuffroy, 2007; Ziadi *et al.*, 2010). However, too little is known about the relationship between NNI and CMR to make it possible to use CMR to monitor crop N status at any time in the growing season, from the beginning of stem elongation to flowering.

We aimed to develop a fertilization method based on frequent regular monitoring of crop N status throughout the crop cycle. Our specific objectives were: i) to identify the best models for predicting NNI from CMR, and gaps in our knowledge, through a systematic literature review, ii) to determine whether the use of nCMR rather than absolute readings improved the predictive value of models over the study period, and iii) to determine whether a single model could predict NNI from CMR or nCMR at all growth stages, from the beginning of stem elongation to flowering.

2. Materials and Methods

We performed a literature review, to identify potentially relevant models for predicting NNI from CMR. This analysis revealed several variables of interest for inclusion in models and the need to compare the accuracy of models, for both CMR and nCMR. We then fitted a set of models to a set of experimental measurements of NNI and CMR at different growth stages, from the beginning of stem elongation to flowering, recorded in a database. We used the Akaike Information Criterion (AIC) (Akaike, 1973) to identify the best model of those tested (Kuha, 2004; Burnham and Anderson, 2004). We also compared the goodness-of-fit and prediction accuracy of the various models, using mean square error and prediction error to evaluate the predictive performances of the models.

2.1. Literature review

We identified relevant articles by searching the ISI Web Of Science database for articles with the TOPIC “Chlorophyll meter AND Nitrogen Nutrition Index”. This search identified 88 papers published from 1992 to the present. These studies concerned both C3 and C4 cereal crops, predominantly wheat, maize, rice, durum wheat and barley. One of the key aims of this literature review was the identification of published mathematical models linking CMR to crop variables. We focused on the definition of a set of models for predicting NNI from CMR over a large part of the growing season. Based on the titles and abstracts of the papers identified, we selected those focusing on the relationship between CMR and N status indicators for C3 cereal crops, and determined which models and equations were most relevant for testing with our database. We studied 21 articles in detail, prioritizing those on wheat, which accounted for 15 of these articles. For each article, we specified the species studied, the objectives of the study, the nature of the measurements, the growth

stage concerned, the models tested, the conclusion drawn by the authors about the relationship between CMR and nitrogen nutrition status and the perspectives suggested (i.e. other variables to be considered). We differentiated between studies on the basis of their objectives, the key variables used and the growth stages studied. We identified the various models and equations used in previous studies to fit CMR with NNI or other plant indicators.

2.2. Experimental data

We compiled a dataset from measurements obtained in previous experiments with winter wheat (*Triticum aestivum*). Experimental plots were established in six years (1994-1995, 1995-1996, 1996-1997, 1997-1998, 1998-1999, 2001-2002), at 20 different sites in France and the Navarra region of Spain (Table 1). Each experiment included three or four replicates. We gathered 757 treatments, each characterized by site, year, cultivar, total N rate, growth stage, measured CMR, calculated nCMR, and measured NNI (Table 1). Aerial crop biomass, the nitrogen concentration of aerial parts, and values from N-Tester® (in France) or SPAD-502® (in Spain) were obtained for each situation. Both N-Tester® and SPAD-502® measure leaf transmittance. The readings they supply are different, but highly correlated (Arregui *et al.*, 2006). We used the correlation described by Arregui *et al.* (2006) to standardize the values (N-Tester® reading = 15.2 SPAD® reading – 123.6; $R^2 = 0.98$). Measurements were carried out at different growth stages: beginning of stem elongation (GS₆ on the Feekes scale, corresponding to Z₃₁ on Zadoks' scale), two-node stage (GS₇, Z₃₂), ligule of the flag leaf visible (GS₉, Z₃₉), and flowering (GS₁₀, Z₆₀). Crop nitrogen concentrations were determined by the Dumas method (Horwitz *et al.*, 1975). In addition to CMR, a normalized CMR (nCMR) of treatment *i* in experiment *j* was calculated as follows:

$$nCMR_{i,j} = \frac{CMR_{i,j}}{CMR \text{ wellfertilized crop}_j} \quad Eq.(1)$$

We thus divided each $CMR_{i,j}$ by the CMR of the treatment receiving the largest amount of fertilizer in the same conditions (site, year, cultivar), measured at the same stage (Wang *et al.*, 2014). This method of calculating nCMR is convenient, but there seems to be a bias when $nCMR \geq 1$ (Prost and Jeuffroy, 2007), and when the most heavily fertilized treatment does not result in a $NNI \geq 1$ (Ziadi *et al.*, 2010).

Table 1. Characteristics of the experimental data. Each situation includes the year (sowing and harvest), the site (*département* number in brackets), the cultivar, the total amount of nitrogen (N) applied and the growth stage at which measurements (of CMR and NNI) were made

Year	Site	Cultivar	Total N rate (kg N ha ⁻¹)	Growth stage*	
1994 - 95	Bignan (56)	Ami, Forby, Soissons, Tremie	80, 200, 260	GS 6, 7, 9	
	Boulancourt (77)	Forby	100, 160, 220, 280	GS 6, 7, 9	
		Ami, Qualital, Soissons, Tremie	100, 160, 220, 280	GS 7, 9, 10	
	Cuperly (51)	Ami, Forby, Soissons, Tremie	0, 80, 140, 200, 260	GS 6, 7	
		Bourbon, Campremy, Haven, Qualital, Rialto, Scipion	0, 80, 200	GS 6, 7	
	Pigy (77)	Forby, Recital, Rialto, Soissons, Tremie	80, 160, 220	GS 7, 9	
	St Aubin (91)	Ami, Forby, Soissons, Tremie	0, 60, 120, 180, 240	GS 6, 7, 9	
1995 - 96	Bignan (56)	Ami, Forby, Soissons	140, 180, 220, 260	GS 7, 9, 10	
	Boulancourt (77)	Soissons (organic manure)	180, 220, 260	GS 7, 9, 10	
		Ami	120, 160, 200	GS 7, 9, 10	
		Forby, Soissons	160, 200, 240	GS 6, 9, 10	
		Sideral	160, 200, 240	GS 6, 9, 10	
		Qualital	150, 190, 230	GS 7, 9, 10	
	Le Magneraud (17)	Ami, Soissons	120, 160, 200, 240	GS 7, 9	
		Forby	80, 120, 160, 200, 240	GS 7, 9	
	Lussat (63)	Courtot, Soissons	110, 150, 190	GS 6, 7, 9	
	Villiers le Bâcle (91)	Ami, Forby, Soissons	60, 100, 140, 180	GS 7, 9, 10	
		Thesee	100, 140, 180	GS 7, 9	
1996 - 97	Bignan (56)	Ami, Forby, Soissons, Tremie	170, 220, 270	GS 7, 9, 10	
	Boulancourt (77)	Tremie (organic manure)	150, 200, 250	GS 7, 9, 10	
		Ami	130, 170, 210	GS 6, 7, 9	
		Forby	130, 170, 210, 250	GS 6, 7, 9, 10	
	La Jaillière (44)	Qualital, Sideral, Soissons	170, 210, 250	GS 6, 7, 9, 10	
		Soissons	0, 130, 170, 210, 250	GS 10	
		La Saussaye (27)	Soissons	0, 170	GS 5
	Le Magneraud (17)	Ami, Forby, Soissons	100,140, 180, 220	GS 7, 9	
	Montans (81)	Qualital	60, 120, 180, 240, 300	GS 7, 9	
	St Fort (44)	Soissons	160, 200, 240	GS 10	
	St Pierre Amilly (17)	Soissons	70, 100, 110, 140, 150, 180	GS 7, 9, 10	
	Thizay (37)	Sideral	110, 150, 190, 230	GS 10	
		Villexanton (41)	Qualital	160, 180, 200	GS 6, 7, 9, 10
		Vraignes (80)	Ami, Soissons	120, 160, 200	GS 10
	1997 - 98	Grossoeuvre (27)	Qualital	170, 210, 250	GS 10
			Shango	140, 180, 220	GS 7, 10
Soissons			120, 160, 200	GS 10	
Lusignan (86)		Isengrain	100, 140, 180, 220	GS 9, 10	
Montans (81)		Trémie	120, 160, 200, 240	GS 7, 9	
Rots (14)		Rossini	160, 200	GS 6, 9	
St Pierre d'Amilly (17)		Soissons	120, 160, 200, 240	GS 7	
		Soissons	100, 140, 180, 220	GS 10	
Urroz-MA (Spain)		Soissons	0, 180, 210, 250	GS 6, 7, 9, 10	
Urroz-ME (Spain)		Soissons	0, 180, 210, 250	GS 6, 7, 9, 10	
Urroz-T (Spain)		Soissons	180, 210, 250	GS 6, 7, 9, 10	
1998 - 99		Villexanton (41)	Aztec	100, 140, 180, 220, 260	GS 6, 9, 10
	Vraignes (80)	Shango	140, 180, 220	GS 7, 9, 10	
	Beriain (Spain)	Marius	0, 100, 140, 180, 220	GS 6, 7, 9, 10	
	Urroz-18 (Spain)	Soissons	0, 100, 140, 180, 220, 260	GS 6	
	2001 - 02	Tajonar (Spain)	Soissons	0, 120, 160	GS 6, 9

* Growth stage according to Feekes' scale

2.3. Set of models to be fitted to our database

Based on the various models and equations investigated in previous studies, we identified a number of models for testing to determine which best predicted NNI from a CMR. We chose mixed models, such as lme(). As such, we considered a random site-year effect to reflect the lack of independence of treatments from the same experiment, and we took into account the variability attributable to the site-year. We also compared all models fitted to normalized and absolute CMR data, to determine whether nCMR resulted in improved precision. We compared three types of relationship:

The linear model (L): It has been used to improve the prediction of NNI from CMR by dynamic crop models (Naud *et al.*, 2009) and it fits early growth stage measurements well (Arregui *et al.*, 2002). This model assumes that NNI increases steadily with CMR and is defined as follows:

$$Y_t = a + b \times CMR_t + e_t \quad Eq.(2)$$

where Y_t is the NNI for a treatment t , CMR_t is the CMR values measured for treatment t , a and b are the two parameters of the linear trend estimated by fitting the model to the data from experimental plots, and e_t is the residual error, equal to the difference between Y_t and the linear trend.

The quadratic model (Q): It has been less investigated in fewer studies. Reeves *et al.* (1993) found that the relationship between leaf N concentration and SPAD® readings, even at early growth stages, could be either linear or quadratic, depending on crop management. Ziadi *et al.* (2010) found a significant quadratic relationship between NNI and CMR, and Yang *et al.* (2014) suggested that the relationship between yield and NNI was quadratic at the booting stage. Unlike the linear model, the quadratic model does not assume that NNI increases steadily. It is defined as follows:

$$Y_t = a + b \times CMR_t + c \times CMR_t^2 + e_t \quad Eq.(3)$$

where a , b and c are three parameters estimated by fitting the model to the data.

The exponential model (E): It has been used to analyze the relationship between nCMR and NNI for the detection of N deficiency or as an alternative to the measurement of NNI at flowering (Debaeke *et al.*, 2006; Prost and Jeuffroy, 2007). The use of an exponential relationship between CMR and NNI has been shown to perform well at flowering for winter wheat (Prost and Jeuffroy, 2007) and during stem elongation in durum wheat (Debaeke *et al.*, 2006). Like the quadratic model, the exponential model does not assume a constant increase in NNI and is defined as follows:

$$Y_t = a + e^{b \times CMR_t} + e_t \quad Eq.(4)$$

where a and b are estimated by fitting the model to the data.

Residuals were plotted both as a distribution histogram and with the qqnorm.lme function from R software, to check that they were normally distributed. Plots of fitted values against residuals were used to confirm that the residuals were homogeneous and independent. The residual errors were assumed to be normally distributed and independent.

We tested the model with additional effects: cultivar, biomass and both. All models (with the various possible combinations of variables) were tested with and without a growth stage effect. We first fitted models to all the nCMR values calculated with Eq. (1); we then fitted the models to the set of experiments for which the maximum NNI value was at least 0.9. Placing such a constraint on NNI resulted in a smaller number of treatments being used to compare the models. Thus, AIC was not used to compare the results obtained with and without the imposition of this constraint (Mazerolle, 2004).

2.4. Comparison of models

2.4.1. Goodness-of-fit and prediction accuracy

Models were assessed on the basis of the quality of fit to the dataset obtained, assessed by calculating the root mean square error (RMSE), defined as follows:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N (Y_t - \hat{Y}_t)^2} \quad Eq.(5)$$

where Y_t is the NNI measured and $\hat{Y}_t$ is the NNI estimated, for situation t , with the model adjusted for all experimental situations. We investigated the performance of the model for the prediction of future values (Wallach, 2006), by calculating the RMSEP, with a leave-one-out cross validation method consisting of the extraction of one site-year from the dataset for the estimation of model parameters, and the use of the rest of the dataset to assess the model. RMSEP is defined as follows:

$$RMSEP(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{t=M-N+1}^M [Y_t - \hat{Y}_{pt}(k)]^2} \quad Eq.(6)$$

where $\hat{Y}_{pt}(k)$ is the NNI predicted for situation k with the model adjusted for $t-k$ experimental situations. $\hat{Y}_{pt}(k)$ is calculated by fitting the model to all experimental data minus one experimental situation (i.e. $t-k$ experimental situations). It was iteratively calculated until each of the 38 site-year combinations of the dataset had been used both to estimate the parameter and to validate the model (Wallach 2006).

2.4.2. Selection procedure

The Akaike information criterion (AIC; Akaike, 1973) is commonly used to compare multiple models fitted to similar datasets and simulating the same response variable (Anderson and Burnham, 2002). Given that models are approximations of reality, the AIC measures the likelihood of the models (Burnham and Andreson, 2004). Lower values of the AIC indicate that the model is closer to reality. In model selection, it is interesting to compare AIC between the different models (Mazerolle, 2004). AIC can be rescaled as:

$$\Delta_i = AIC_i - AIC_{\min} \quad Eq.(7)$$

where $AIC_{\min}$ is the minimum AIC observed for the entire set of R models tested. With this approach, $\Delta = 0$ for the best model, whereas the other models have positive values of Δ . Burnham and Anderson

(2004) proposed simple rules for the interpretation of Δ values. The relative likelihood can be interpreted through Akaike weights (w_i), calculated as follows:

$$w_i = \frac{\exp(-\Delta_i/2)}{\sum_{r=1}^R \exp(-\Delta_r/2)} \quad Eq.(8)$$

where w_i can be interpreted as the conditional probability of the model being the best of the R candidate models (Wagenmakers and Farrell, 2004; Mazerolle, 2004).

3. Results

3.1. Literature review

The information extracted from the 21 articles is presented in table 2. Chlorophyll meter readings (CMR) have been shown to provide information about the chlorophyll content of leaves (Ortiz-Iragorri *et al.*, 2005; Neukirchen and Lammel, 2002). Many studies have shown that CMR can be used to manage N fertilization. Recent studies have focused on optimization of the measurement procedure to improve the accuracy of CMR measurement, including determination of the best leaf number for measurements (Hoel, 1998) or the most appropriate number of measurements per leaf (Wang *et al.*, 2010). Most studies in the 1990s focused on the relationship between CMR and plant N indicators other than NNI, such as leaf N concentration, or whole plant N concentration, for the prediction of yield (Follet *et al.*, 1992) and grain protein content (Matsunake *et al.*, 1998; Le Bail *et al.*, 2005). The objectives of these previous studies were different from ours, but they are consistent with our understanding of the relationship between CMR and plant N status and they provide interesting information about the relevant models and variables (Reeves *et al.*, 1993; Peltonen *et al.*, 1995; Bavec and Bavec, 2001). For instance, many of these studies stressed the importance of year, site, growth stage and cultivar effects. Follet *et al.* (1992) concluded that the relationship between CMR and plant N status differed from site to site. We therefore incorporated a site-year random effect into our model. However, all the articles reporting a year and site effect also used lm or glm models.

A few studies have investigated the relationship between CMR and NNI with the aim of developing an indirect indicator for assessing crop N status. Nine articles focusing on the relationship between CMR and NNI were identified, five of which concerned winter wheat (Vouillot *et al.*, 1998; Arregui *et al.*, 2006; Prost and Jeuffroy, 2007; Houlés *et al.*, 2007; Naud *et al.*, 2009). From these articles, we identified the following models as potentially relevant: the exponential model of Prost and Jeuffroy (2007); the quadratic model of Arregui *et al.* (2006), and the linear model used by Vidal *et al.* (1999), Houlés *et al.* (2007) and Naud *et al.* (2009). Naud *et al.* (2009) focused on the possibility of improving NNI prediction through a soil-crop model by incorporating CMR into the model. Our approach was inspired by their results, although they did not focus on simulating NNI from CMR. We also drew inspiration from models proposed for crop species other than wheat. For instance, the work from Debaeke *et al.* (2006) and Ziadi *et al.* (2010) highlighted the need to compare linear, exponential and

quadratic models. Yang *et al.* (2001) highlighted the relevance of analyzing the growth stage effect, even with nCMR. These articles suggested many other factors to be taken into account to establish a relevant set of models for testing.

Many studies have aimed to improve the accuracy of CMR. The largest improvements were achieved by using nCMR to limit uncertainties due to factors other than N, such as cultivar (Debaeke *et al.*, 2006; Samborski *et al.*, 2009). It has been suggested that the relationship between CMR and crop N status is improved slightly by the use of nCMR values (Arregui *et al.*, 2006; Prost and Jeuffroy 2007; Wang *et al.*, 2014). The use of nCMR increased the accuracy of the model, as it made it possible to limit possible sources of error due to factors other than N, such as growth stage and cultivar (Debaeke *et al.*, 2006; Yuan *et al.*, 2016). However, there is no clear consensus on the relevance of using nCMR rather than CMR to assess NNI (Yang *et al.*, 2014). Debaeke *et al.* (2006) showed that the relationship to NNI was stronger for nCMR than for CMR, as they observed no significant effect of growth stage and variety. However, other studies have suggested that the gain in precision observed with nCMR rather than CMR might not be worth the implementation of a well-fertilized strip (Prost and Jeuffroy, 2007; Yang *et al.*, 2014). Uncertainty therefore remains about whether it is necessary to use nCMR to predict NNI accurately. The use of nCMR seems to be useful for assessments in conditions of N stress (Vouillot *et al.* 1998), but it does not appear to be indispensable for improving predictions of NNI (Naud *et al.*, 2009). We therefore decided to compare models fitted to both CMR and nCMR values, to determine whether or not nCMR improved prediction accuracy, with the aim of developing a model valid for a larger part of the growth cycle. Some studies have stressed that a bias occurs with nCMR if none of the treatments studied results in a $NNI \geq 0.9$. Ziadi *et al.* (2010) suggested that only experiments in which N nutrition is non-limiting should be retained. However, in practice, even a well-fertilized crop strip may be N-deficient ($NNI < 0.9$). We thus compared fitting quality and prediction accuracy between models fitted to the entire dataset, and models fitted to a reduced dataset from which well-fertilized strips with $NNI < 0.9$ had been removed. In their study of the relationships between NNI and both CMR and nCMR, Yang *et al.* (2014) concluded that growth stage influenced the relationship, for both indicators. The possibility of a growth stage effect should therefore be taken into account, and this led us to analyze all models with and without growth stage effects. Furthermore, as growth stage seems a highly influential factor, we thought it might be interesting to determine whether NNI is best predicted by a single model applicable from the beginning of stem elongation to whether it is better to use a different model for each growth stage. Most studies have focused on a specific growth stage, so the use of a single model fitted to heterogeneous data might account for the low prediction accuracies reported by these studies. Reeves *et al.* (1993) found that the best relationship between CMR and plant variables differed according to growth stage, and considering spectral measurement several authors emphasized on a growth stage calibration (Sembiring *et al.*, 2000; Mistele and Schmidhalter, 2008).

Table 2. Information concerning objectives, measurements and models tested in the 21 articles studied in detail

Sp	Reference	Title	Objectives	Measurements	Models	Results	Perspectives
	Follet <i>et al.</i> , 1992	Use of a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dry-land winter wheat	To detect N deficiency at GS5 to make recommendations To estimate N crop status and determine the need for additional N	CMR, Leaf [N], soil test at GS5	No equation	CMR correlated with grain yield, leaf [N] & soil NH ₄ -N plus NO ₃ -N	Analyze other factors
	Reeves <i>et al.</i> , 1993	Determination of wheat nitrogen status with a hand-held chlorophyll meter, influence of management practices	To predict yield and to determine the need for additional N	CMR, whole-plant samples at GS3 & 5 flag leaf samples at GS10	Linear or quadratic	CMR correlated with [N] & yield Best predictor of yield was N uptake at GS5 Dry matter should be used in the model Flag leaf CMR significantly correlated with [N] CMR use for the development of reliable methods to predict N fertilizer requirements CMR at GS5 more accurate than plant [N]	Combined with other simple measurements
	Fox <i>et al.</i> , 1994	Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat	To predict the need for additional N at GS5	CMR & plant [N] at GS5	Linear		Predict economic optimum N rates
	Peltonen <i>et al.</i> , 1995	Using a chlorophyll meter to optimize nitrogen fertilizer application for intensively managed small grain cereals	To predict N availability and the need for additional N To increase NUE	CMR & plant measurements at GS8 & 10	Quadratic	CMR accurately indicated plant N status CMR useful for identifying yield responsive and non-responsive factors at GS8 & 10	Diversified growing conditions
	Hoel, 1998	Use of a hand-held chlorophyll meter in winter wheat: Evaluation of different measuring positions on the leaves	To investigate the correlation with leaf [N], yield & GPC for different positions on the plant and leaf of CMR	CMR, total-N analysis, yield and GPC at GS6 & 10	No equation	Better relationship at GS10 than at GS6 At GS6, differences between N fertilizer treatments only when CMR measured at the midpoint of the last leaf Cultivar effect at GS49	Best position is the midpoint of the last fully expanded leaf
Winter wheat	Matsunake <i>et al.</i> , 1997	Prediction of grain protein content in winter wheat through leaf color measurements using a chlorophyll meter	To predict GPC and yield before harvest	GS 45	Linear	Leaf color could be used as an index for ranking GPC as low or high	Index to determine N application rate when low GPC is predicted.
	Vouillot <i>et al.</i> , 1998	Early detection of N deficiency in a wheat crop using physiological and radiometric methods	To detect N deficiency	Between GS6 & 10	No equation	Correlation between CMR & NNI CMR detects early N deficiency	To be confirmed in other conditions
	Bavec & Bavec, 2001	Chlorophyll meter readings of winter wheat cultivars and grain yield	To determine the effect of cultivar, growth stage and year on predictions of yield and quality	CMR at GS7 & GS10	Linear, quadratic & cubic	No strong correlation with yield before GS7 At GS 10, quadratic or cubic regression better explained the effect of CMR on yield. CMR for different cultivars did not affect crude protein levels at either growth stage Calibrated for given growth stage and a define leaf position Cultivar correction factor Significant differences between cultivars and trials at GS 6 and 10, no effect of year on HNT	Analyze other factors
	Neukirchen & Lammel, 2002	The chlorophyll content as an indicator for nutrient and quality management	Review on CMR as an indicator of crop N status to calibrate the HNT®	CMR at GS 6 and 10	No equation		Response curve + HNT to determine N rate for economic optimum yield CMR as index for ranking GPC
	Hoel, 2002	Chlorophyll meter readings in winter wheat: Cultivar differences and prediction of grain protein content	To determine differences in HNT values between cultivars To predict GPC				
	Le Bail <i>et al.</i> , 2005	Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions	To predict yield & GPC before harvest to anticipate segregation batches To test models with genotype effect	CMR after GS 10, NE	Linear & quadratic	Genotype effect NE effect to improve yield prediction accuracy Prediction accuracy of GPC is higher at GS 9 than GS10	Other measurements at GS10 to improve the prediction of GPC Test models in agricultural conditions

Arregui <i>et al.</i> , 2006	Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions	To predict the need for additional N for yield and GPC	GS6, 7, 9, 10	Quadratic	CMR at GS9 able to identify treatments likely to display a yield response to a third application	Different locations years and varieties
Houles <i>et al.</i> , 2007	Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations	To investigate the relationship with CMR and nCMR To build an indicator related to crop N status for N recommendations	Dry matter, GLAI, CMR & N uptake from end of winter to heading	Linear	Before GS9, yield prediction poor Relationship between N uptake and chlorophyll more stable with integrated quantities of chlorophyll in the canopy (g m ² soil) than with chlorophyll content (g cm ² leaf)	Improve economic and environmental aspects of N management
Prost & Jeuffroy, 2007	Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status	To test SPAD as an alternative to NNI at flowering	Around GS10	Exponential	Not -cultivar-dependent	Predict N status at flowering
Naud <i>et al.</i> , 2009	Leaf transmittance measurements can improve predictions of the nitrogen status for winter wheat crop	To evaluate correction of the Azodyn dynamic model using CMR to predict the NNI of a winter wheat crop.	CMR at GS 7	Linear	Prediction of NNI more accurate with measurement at GS 45; CMR is an indicator of N nutrition	Various conditions
Vial <i>et al.</i> , 1999	Nitrogen uptake and chlorophyll meter measurement in spring wheat	To evaluate CMR as a possible indicator of NNI for modeling	GS6, 9, 10	Linear	Detection of N deficiency & excess Most reliable information at GS 10	Various conditions
Ziadi <i>et al.</i> , 2010	Plant-based diagnostic tools for evaluating wheat nitrogen status	To use CMR to assess crop NNI and leaf [N]	During the growing season, from tillering	Quadratic & linear	CMR is related to NNI during the growing season nCMR reduced the site-year effect GS effect with CMR & nCMR Strong relationship between NNI & CMR	Need more experimentation
Debacke <i>et al.</i> , 2006	Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index:	To compare CMR & nCMR for predicting yield & GPC	From end of winter to flowering	Exponential & linear	nCMR and NNI closely related irrespective of year, cultivar and GS nCMR at flowering predicts yield & GPC accurately	Management of N status in low-input wheat crop
Wang <i>et al.</i> , 2014	Application to durum wheat Multiple leaf measurements improve effectiveness of chlorophyll meter for durum wheat nitrogen management	To determine whether multiple-leaf CMR on the same plant can improve the estimation of crop N status To test different models based on the number of measurements made on the same plant	GS 5, 10 & 10,5	Linear	The relationship between CMR & NNI varied with growing season, GS and cultivar nCMR better for predicting yield CMR taken between the second most recent and the most recent fully expanded leaves is as effective as nCMR	
Yang <i>et al.</i> , 2014	SPAD values and nitrogen nutrition index for the evaluation of rice nitrogen status	To establish a relationship between CMR & NNI for rice To apply CMR as a diagnostic tool to determine the need for additional N To develop a prediction model for diagnosing N status	Three different GS	Linear	Relationship varies with leaf position, GS & cultivar, also with nCMR More reliable yield response at the booting stage	nCMR also subject to limitations
Yuan <i>et al.</i> , 2016	Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyll meter readings		From tillering to heading stages	Linear	nCMR is the most reliable and generally applicable indicator Accurate N diagnosis from stem elongation to booting for rice	Different cultivars and site conditions

3.2. Model selection

The removal of experiments in which all NNI values were below 0.9 reduced the size of the dataset (from $n=757$ for the initial dataset to $n=545$). We first focused on the goodness-of-fit of the models and their prediction accuracy, to identify the conditions in which model quality was at its best. We then used AIC to identify the best model for predicting NNI from CMR or nCMR.

3.2.1. Model quality

The variability of goodness-of-fit (RMSE) between models was lower with the reduced dataset (Fig. 1): it ranged from 0 to 0.08 for the reduced dataset and from 0 to 0.17 for the initial dataset (Fig.1). Goodness-of-fit was best for nCMR values from the reduced dataset, taking a growth stage effect into account, and for models fitted to the CMR values of the initial data set without a growth stage effect. Goodness-of-fit was lowest (highest RMSE) for models fitted to the nCMR values from the initial dataset. Thus, the use of nCMR data for experiments without treatments with a $NNI \geq 0.9$ decreases the quality of fit of the models obtained.

Prediction accuracy (RMSEP) ranged from 0.2 to 0.36, indicating that prediction error remained rather high. The dataset used also strongly influenced the RMSEP (Fig.1): prediction accuracy was highest for models fitted to nCMR values for the reduced dataset, taking a growth stage effect into account. However, prediction accuracy was lowest for models fitted to nCMR values from the initial dataset, with or without a growth stage effect. Thus, the use of nCMR in conditions in which some well-fertilized strips are N-deficient can greatly decrease the prediction accuracy and quality of the model.

RMSEP was similar for models taking into account a growth stage effect fitted to nCMR values from the reduced dataset, regardless of the model considered, L, Q, E, and of any additional variables included. Thus, provided that the well-fertilized strip is not N-deficient ($NNI \geq 0.9$), the use of nCMR makes it possible to overcome biomass and cultivar effects, but not the growth stage effect. Models fitted to CMR data from the initial dataset, with and without a growth stage effect, had a slightly higher RMSEP (Fig 1.). In this case, RMSEP values were similar for all models with and without additional variables and a growth stage effect.

3.2.2. Model likelihood

Model selection based on AIC and AIC weights (w_i) identified different models depending on the dataset used (initial or reduced). However, for both datasets, the best AIC values were obtained when a growth stage effect was taken into account. With the initial dataset, the quadratic model, with both cultivar and biomass effects, fitted to CMR values (Qbc), had a $w_i=0.92$, indicating a high probability of this model being the best of the entire set of models tested (Table 3). With the reduced dataset, the best model of those tested was an exponential model with a biomass effect, fitted to nCMR values (nEb), with $w_i = 0.96$ (Table 3). For both the quadratic and exponential models, the residuals were normally distributed and independent (Appendix 1).

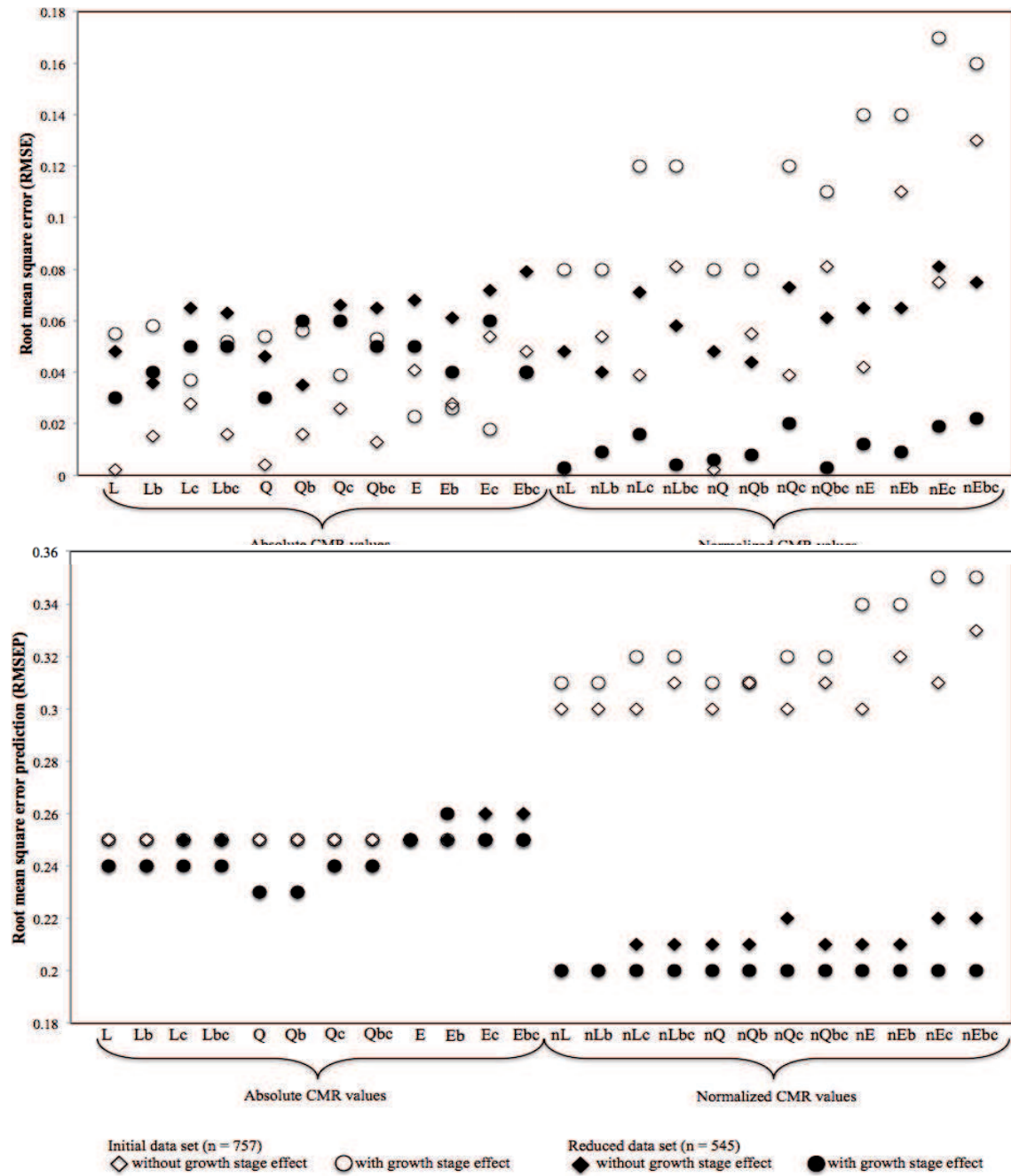


Fig. 1. RMSE and RSMEP for the different models: linear (L); quadratic (Q); exponential (E), with biomass (b); cultivar (c); biomass and cultivar (bc) or no additional variables, using both absolute and normalized (n) CMR values, by dataset (initial or reduced), with and without consideration of the growth stage effect

Provided that the well-fertilized strip is not N-deficient, the use of nCMR values with an exponential model taking biomass and growth stage effects into account seems to be the most appropriate and accurate way to predict NNI. However, prediction by this method is poor if the well-fertilized strip is N-deficient (Fig. 1). An interesting alternative approach to the prediction of NNI involves the use of a quadratic model with cultivar, biomass and growth stage effects. This model was found to give the most realistic and accurate prediction based on absolute value (Fig.1). However, it requires more parameters.

Table 3. Comparison of AIC, Δ AIC and Wi values for the models L (linear), Q (quadratic), and E (exponential), with b (biomass), or c (cultivar) effects, fitted to CMR () or nCMR (n), with and without a growth stage effect

	Models	Initial dataset			Reduced dataset		
		AIC	Δ AIC	Wi	AIC	Δ AIC	Wi
No growth stage effect	L	-479	43	0	-313	290	0
	Lb	-479	43	0	-311	292	0
	Lc	-495	27	0	-338	265	0
	Lbc	-494	28	0	-336	267	0
	Q	-485	37	0	-320	283	0
	Qb	-485	37	0	-319	284	0
	Qc	-506	16	0	-341	262	0
	Qbc	-506	16	0	-339	264	0
	E	-342	180	0	-309	294	0
	Eb	-341	181	0	-307	296	0
	Ec	-369	153	0	-344	259	0
	Ebc	-368	154	0	-343	260	0
	nL	-465	57	0	-527	76	0
	nLb	-480	42	0	-525	78	0
	nLc	-444	78	0	-509	94	0
	nLbc	-457	65	0	-508	95	0
	nQ	-464	58	0	-540	63	0
	nQb	-480	42	0	-538	65	0
	nQc	-444	78	0	-522	81	0
	nQbc	-457	65	0	-521	82	0
	nE	-319	203	0	-593	10	0.006
	nEb	-346	176	0	-591	12	0.002
	nEc	-298	224	0	-575	28	0
	nEbc	-322	200	0	-573	30	0
Growth stage effect	L	-487	35	0	-311	292	0
	Lb	-487	35	0	-308	295	0
	Lc	-506	16	0	-336	267	0
	Lbc	-511	11	0.004	-334	269	0
	Q	-492	30	0	-318	285	0
	Qb	-492	30	0	-316	287	0
	Qc	-517	5	0.08	-339	264	0
	Qbc	-522	0	0.92	-337	266	0
	E	-350	172	0	-307	296	0
	Eb	-354	168	0	-306	297	0
	Ec	-382	140	0	-343	260	0
	Ebc	-395	127	0	-342	261	0
	nL	-483	39	0	-528	75	0
	nLb	-482	40	0	-528	75	0
	nLc	-461	61	0	-511	92	0
	nLbc	-459	63	0	-512	91	0
	nQ	-482	40	0	-541	62	0
	nQb	-481	41	0	-542	61	0
	nQc	-461	61	0	-524	79	0
	nQbc	-459	63	0	-525	78	0
	nE	-347	175	0	-596	7	0.03
	nEb	-348	174	0	-603	0	0.96
	nEc	-325	197	0	-579	24	0
	nEbc	-325	197	0	-583	20	0

3.3. Growth stage effect

Using the initial dataset, we grouped treatments into four categories for growth stage (growth stages 6, 7, 9 and 10 on Feekes' scale) including 138, 235, 223 and 161 treatments, respectively.

The linear model with no biomass or cultivar effect gave the lowest RMSEP at all four growth stages considered (Table 4). However, a different pattern was observed for the AIC: at GS 6 and 7, the maximum likelihood was obtained with a quadratic model with biomass and cultivar effects, whereas, at GS 9 and 10, the maximum likelihood was attained with models fitted to nCMR values (Table 4). However, these models had unsatisfactory prediction accuracies (lower than the lowest RMSEP achieved with a single model). At GS 6, 7 and 9, the quadratic model Q (without biomass and cultivar effects) had a satisfactory prediction accuracy, with a better AIC than the linear model L (which had the lowest RMSEP at the four growth stages considered). The quadratic model is, thus, the most appropriate model for predicting NNI at these growth stages. At flowering, the lowest RSMEP was achieved with the linear model (Table 4). This finding is consistent with those of Debeake *et al.* (2006), who showed that the relationship between CMR and NNI was linear at flowering.

With the reduced dataset, there were 70, 183, 159 and 133 treatments for growth stages 6, 7, 9 and 10 on Feekes' scale, respectively. Better RMSEP and AIC values were obtained with nCMR than with CMR. The best model at GS 6 was not the best model at GS 7, 9, 10. At the beginning of the crop cycle, a simple quadratic model (without biomass or cultivar) yielded the highest prediction accuracy, whereas, GS 7 onward, prediction accuracy was highest for a simple linear model. The best AIC was achieved with exponential models taking into account the effect of biomass, cultivar or both (Table 4), consistent with the results of Prost and Jeuffroy (2007).

We found that nCMR was more accurate than CMR only if the well-fertilized strips were not N-deficient. The most realistic models were the most "complex", with biomass or cultivar effects, in both cases. The models with the best prediction accuracy were less likely to be identified as "true" on the basis of AIC (Burnham and Anderson, 2004). At the beginning of the crop cycle, the correlation between CMR and NNI was highly satisfactory. Later in the crop cycle, CMR became increasingly dependent on cultivar, biomass and growth stage. This finding is consistent with those of Yang *et al.* (2014), who showed that normalized values were more strongly correlated with NNI at later stages of development. Finally, better results are obtained with different growth stage-based models with CMR, whereas the use of nCMR, with a single model, seems to be more appropriate if the well-fertilized strips are not N-deficient. There may be an increase in the prediction of precision if the dataset is categorized, but the models are less realistic.

Table 4. Fitting quality (RMSE), prediction accuracy (RMSEP) and likelihood (AIC) of models L, Q, E with and without biomass (b), cultivar (c), and biomass plus cultivar (bc) effects, fitted to CMR and nCMR data from both the initial and reduced datasets, for each growth stage (stages 6, 7, 9 and 10 on Feekes' scale)

	Data	Model	Variable	GS 6			GS 7			GS 9			GS 10		
				RMSE	RMSEP	AIC	RMSE	RMSEP	AIC	RMSE	RMSEP	AIC	RMSE	RMSEP	AIC
INITIAL DATASET	CMR	L	no variable ()	0.02	0.19	-135	0.02	0.23	-170	0.01	0.29	-130	0.02	0.24	-142
			biomass (b)	0.16	0.29	-144	0.23	0.32	-186	0.15	0.33	-142	0.26	0.36	-156
			cultivar (c)	0.02	0.2	-136	0.05	0.24	-229	0.03	0.29	-124	0.05	0.25	-141
			biomass + cultivar (bc)	0.18	0.29	-150	0.31	0.38	-262	0.31	0.42	-162	0.3	0.39	-157
		Q		0.03	0.19	-143	0.02	0.23	-174	0.01	0.29	-128	0.01	0.26	-148
			b	0.17	0.29	-152	0.23	0.32	-189	0.16	0.34	-141	0.26	0.37	-163
			c	0.01	0.2	-154	0.04	0.24	-243	0.03	0.3	-123	0.05	0.27	-148
			bc	0.19	0.29	-172	0.31	0.37	-278	0.33	0.44	-166	0.3	0.4	-166
		E		0.04	0.2	-93	0.05	0.23	-133	0.04	0.3	-98	0.04	0.26	-146
			b	0.17	0.29	-100	0.25	0.34	-149	0.21	0.37	-117	0.26	0.37	-163
			c	0.01	0.19	-102	0.06	0.24	-212	0.07	0.3	-93	0.06	0.27	-142
			bc	0.18	0.29	-122	0.3	0.37	-248	0.34	0.45	-152	0.3	0.39	-166
	nCMR	L		0.03	0.32	-111	0.05	0.3	-200	0.001	0.31	-163	0.03	0.25	-137
			b	0.26	0.43	-134	0.29	0.42	-227	0.12	0.33	-171	0.31	0.4	-155
			c	0.11	0.32	-99	0.07	0.3	-191	0.03	0.31	-157	0.1	0.27	-131
			bc	0.31	0.44	-121	0.4	0.49	-239	0.2	0.37	-168	0.37	0.46	-153
		Q		0.03	0.32	-112	0.05	0.3	-206	0.001	0.31	-161	0.03	0.26	-161
			b	0.25	0.42	-133	0.32	0.44	-239	0.12	0.34	-169	0.3	0.4	-178
			c	0.11	0.32	-101	0.07	0.31	-196	0.03	0.32	-156	0.11	0.28	-155
			bc	0.3	0.43	-120	0.42	0.52	-254	0.2	0.38	-167	0.38	0.46	-177
		E		0.08	0.33	-82	0.1	0.31	-176	0.06	0.32	-151	0.07	0.26	-152
			b	0.24	0.42	-102	0.3	0.43	-202	0.19	0.37	-165	0.3	0.4	-172
			c	0.12	0.33	-70	0.11	0.32	-172	0.07	0.33	-148	0.13	0.28	-143
			bc	0.28	0.42	-95	0.38	0.48	-225	0.24	0.4	-165	0.36	0.44	-170
REDUCED DATASET	CMR	L	no variable ()	0.02	0.17	-65	0.02	0.22	-138	0.01	0.26	-79	0.03	0.24	-119
			biomass (b)	0.11	0.18	-64	0.19	0.28	-148	0.23	0.36	-94	0.27	0.37	-126
			cultivar (c)	0.01	0.17	-75	0.004	0.23	-197	0.06	0.28	-70	0.06	0.25	-131
			biomass + cultivar (bc)	0.03	0.17	-73	0.32	0.37	-227	0.43	0.55	-96	0.34	0.42	-145
		Q		0.03	0.19	-65	0.02	0.22	-136	0.002	0.26	-79	0.03	0.24	-120
			b	0.15	0.41	-65	0.19	0.28	-146	0.22	0.36	-92	0.25	0.36	-127
			c	0.02	0.2	-84	0.002	0.3	-196	0.06	0.28	-69	0.06	0.25	-130
			bc	0.01	0.22	-84	0.32	0.37	-227	0.45	0.58	-95	0.34	0.42	-144
		E		0.03	0.19	-73	0.008	0.24	-129	0.02	0.29	-73	0.05	0.25	-129
			b	0.13	0.25	-73	0.22	0.31	-140	0.28	0.41	-96	0.28	0.37	-140
			c	0.01	0.2	-100	0.01	0.26	-207	0.07	0.31	-68	0.06	0.25	-143
			bc	0.01	0.18	-99	0.34	0.4	-204	0.46	0.55	-110	0.34	0.42	-166
	nCMR	L		0.09	0.14	-83	0.003	0.2	-224	0.01	0.21	-158	0.02	0.21	-153
			b	0.18	0.23	-90	0.23	0.31	-205	0.15	0.27	-166	0.2	0.29	-156
			c	0.15	0.19	-72	0.006	0.2	-249	0.01	0.21	-155	0.08	0.23	-153
			bc	0.27	0.3	-77	0.34	0.4	-249	0.24	0.35	-168	0.29	0.36	-160
		Q		0.01	0.15	-87	0.002	0.21	-212	0.01	0.22	-170	0.02	0.21	-154
			b	0.25	0.28	-102	0.27	0.35	-242	0.16	0.28	-182	0.21	0.3	-159
			c	0.18	0.21	-80	0.01	0.2	-214	0.01	0.22	-173	0.08	0.23	-154
			bc	0.43	0.43	-98	0.38	0.44	-273	0.22	0.35	-185	0.31	0.38	-164
		E		0.02	0.15	-102	0.02	0.21	-219	0.03	0.22	-187	0.04	0.21	-168
			b	0.2	0.24	-114	0.26	0.34	-245	0.21	0.31	-206	0.23	0.31	-176
			c	0.15	0.19	-97	0.01	0.21	-223	0.02	0.22	-187	0.09	0.23	-167
			bc	0.29	0.31	-108	0.37	0.42	-290	0.29	0.4	-212	0.31	0.37	-181

4. Discussion

4.1. Multimodel selection procedure

Classical selection model procedures, mostly based on stepwise selection, testing of null hypotheses and p -values, may not be appropriate for multimodel selection (Mundry and Nunn, 2009; Anderson and Burnham, 2002). Two alternative methods are reputed to be more suitable for multimodel inference: information-theory selection based on Kullback-Leiber (K-L) information loss assessed with the Akaike information criterion (AIC), and Bayesian selection based on the Bayesian information criterion (BIC). These approaches aim to identify the simplest model (i.e. the best model with the smallest number of parameters) from a set of plausible models compared on the basis of quantitative information (Burnham and Anderson, 2004). Both criteria can be used, but the underlying theories are different, and the choice between the AIC and the BIC depends on what is considered to be the “best” model. The BIC aims to identify the model with the highest probability of being the true model (assuming that one of the models considered is indeed the true model), whereas the AIC deliberately ignores the concept of the “true” model, instead it describes the degree to which a model is supported by the data. The degree to which the model is realistic will then depend on the representativeness of the data and the diversity and appropriateness of the models. The AIC estimates the distance between the model and reality and aims to identify the model with the smallest loss of information (Burnham and Anderson, 2004). The difficulties achieving a consensus as to the relationship between CMR and plant indicators in previous studies probably reflect the undeniably uncertainty that the true model is actually among the models tested. We used the AIC to identify the model from among those tested that minimized the loss of information. We therefore judged the models relative to each other.

4.2. CMR or nCMR for predicting NNI

A comparison of goodness-of-fit and prediction accuracy highlighted the error introduced by including data from experiments in which none of the treatments had a $NNI \geq 0.9$. The elimination of such experiments from the sample resulted in a better fit and better prediction with nCMR. The best model, with the best goodness-of-fit, prediction accuracy and AIC was the exponential model fitted to nCMR values from the reduced dataset with a biomass and growth stage effect. However, the use of nCMR makes it necessary to take many precautions with the dataset used to determine the model parameter, and it is also essential to ensure that the well-fertilized strip is not N-deficient. In the experimental treatments for our dataset, a $NNI \geq 0.9$ was not obtained in some situations, even after the application of large amounts of nitrogen. The use of models based on nCMR to predict NNI in situations in which the well-fertilized strip is N-deficient may lead to a prediction error of about 0.34. This finding highlights the need to check the well-fertilized strip, by destructive NNI measurement if nCMR values are to be used. Thus, the use of nCMR may be subject to constraints in practice (Prost and Jeuffroy, 2007). Finally, although associated with a slight decrease in prediction accuracy, the risk of error can

be prevented by using a model for each growth stage fitted to CMR data, in situations in which the well-fertilized strip is nitrogen-deficient.

Our results are consistent with published findings: nCMR increases the prediction accuracy of models (Prost and Jeuffroy, 2007; Debaeke *et al.*, 2006) and reduces the effects of cultivar and biomass (Arregui *et al.*, 2006; Samborski *et al.*, 2009). However, our findings did not confirm the results of Debaeke *et al.* (2006) for durum wheat suggesting that NNI predictions from nCMR were independent of growth stage. A better AIC was obtained for models taking a growth stage effect into account, whatever the dataset, for both nCMR and CMR. Our results are in line with those on spectral reflectance (Sembiring *et al.*, 2000; Mistele and Schmidhalter, 2008) highlighting that growth stage calibration is required and with those of Yang *et al.* (2014) on rice, suggesting that the effect of development stage should be taken into account even with normalized values.

5. Conclusion

The literature review revealed an absence of consensus concerning the best model for predicting NNI from CMR and the lack of a single model valid from the beginning of stem elongation to flowering. The literature review highlighted the improvement in prediction accuracy achieved through the use of nCMR, which also limited cultivar, biomass and growth stage effects. We confirmed that nCMR improved predictive quality provided that the well-fertilized strip had a $NNI > 0.9$. However, we found that, even if nCMR data are used, a growth stage effect should be considered. Our findings thus suggest that it is better to use separate models for each growth stage rather than a single model to predict NNI, to achieve a satisfactory quality of prediction from absolute values of CMR. However, the use of absolute CMR data makes it necessary to take biomass and cultivar effects into account. Finally, we conducted this study with a view to developing a fertilization method based on regular NNI monitoring. We will now need to assess the sensitivity of the new fertilization method we have developed to the prediction error linked to the models used. Further work is required to find the most convenient way of implementing this method based on the regular monitoring of crop N status. It may be easier to work directly with CMR values rather than determining NNI, and to investigate whether changes in CMR during crop growth can be used to manage N fertilization so as to improve the synchronization of N fertilizer application, soil N supply and N crop demand. In addition, our new fertilization method is based on the regular monitoring of crop N status, starting at the end of winter (during tillering). However, the earliest measurements were taken at the beginning of stem elongation. So, we must either extrapolate the model used to predict NNI at Z6 on Feekes' scale to predict NNI values at earlier growth stages, or experiments must be performed to determine NNI and CMR early in the growth cycle and to identify the best prediction model.

Acknowledgments

We thank Arvalis-Institut-du-végétal and YARA for providing the data. We thank David Makowski

and Tamara Ben Ari for their helpful comments and suggestions about models and the selection procedure. We thank Arvalis-Institut-du-végétal, and the ADEME (*Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie*) for funding. This study was part of the REACCTIF project. We thank Julie Sappa from Alex Edelman & Associates for reviewing the English.

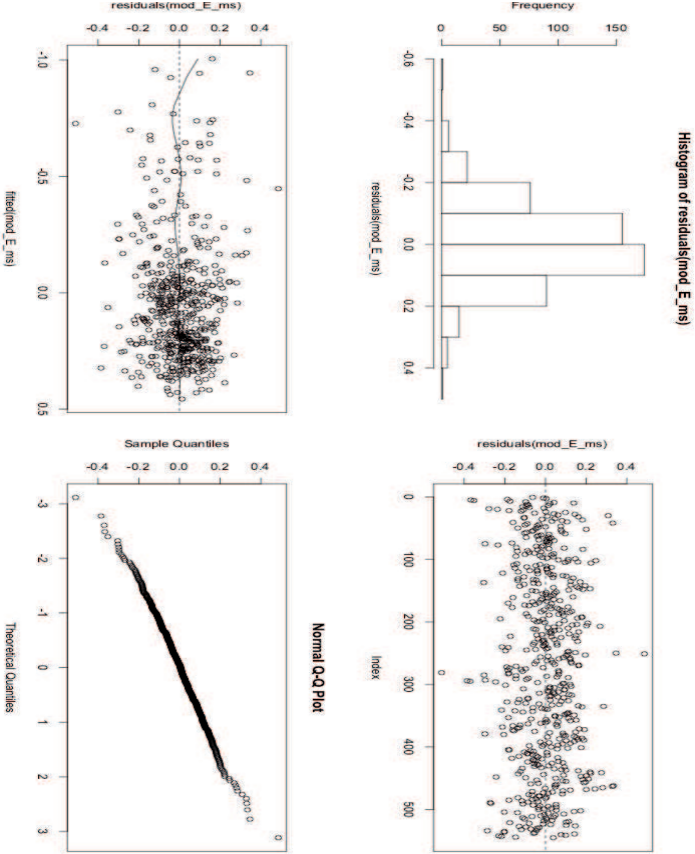
References

- Akaike, H. (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *Proceedings of the Second International Symposium on Information Theory* (eds Petrov, B.N. and Csaki, F.), Akademiai Kiado, Budapest, 267–281.
- Anderson, D.R., Burnham, K.P., 2002. Avoiding pitfalls when using information-theoretic methods. *The Journal of Wildlife Management* 66, 912. doi:10.2307/3803155
- Arregui, L.M., Lasa, B., Lafarga, A., Irañeta, I., Baroja, E., Quemada, M., 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 24, 140–148. doi:10.1016/j.eja.2005.05.005
- Arregui, L.M., Merina, M., Iraneta, I., Lafarga, A., Baroja, E., Quemada, M., 2002. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirement of winter cereals. VII congress of the European Society for Agronomy, Cordoba, Spain, 15-18 July 2002, 663-668
- Bavec, F., Bavec, M., 2001. Chlorophyll meter readings of winter wheat cultivars and grain yield prediction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 2709–2719. doi:10.1081/CSS-120000956
- Burnham, K.P., 2004. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in model selection. *Sociological Methods & Research* 33, 261–304. doi:10.1177/0049124104268644
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 31, 132–140.
- Confalonieri, R., Paleari, L., Movedi, E., Pagani, V., Orlando, F., Foi, M., Barbieri, M., Pesenti, M., Cairati, O., La Sala, M.S., Besana, R., Minoli, S., Bellocchio, E., Croci, S., Mocchi, S., Lampugnani, F., Lubatti, A., Quarteroni, A., De Min, D., Signorelli, A., Ferri, A., Ruggeri, G., Locatelli, S., Bertoglio, M., Dominoni, P., Bocchi, S., Sacchi, G.A., Acutis, M., 2015. Improving *in vivo* plant nitrogen content estimates from digital images: Trueness and precision of a new approach as compared to other methods and commercial devices. *Biosystems Engineering* 135, 21–30. doi:10.1016/j.biosystemseng.2015.04.013
- Crews, T.E., Peoples, M.B., 2005. Can the synchrony of nitrogen supply and crop demand be improved in legume and fertilizer-based agroecosystems? A review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 101–120. doi:10.1007/s10705-004-6480-1
- Debaeke, P., Rouet, P., Justes, E., 2006. Relationship between the normalized SPAD index and the nitrogen nutrition index: Application to durum wheat. *Journal of Plant Nutrition* 29, 75–92. doi:10.1080/01904160500416471
- Eitel, J.U.H., Magney, T.S., Vierling, L.A., Brown, T.T., Huggins, D.R., 2014. LiDAR-based biomass and crop nitrogen estimates for rapid, non-destructive assessment of wheat nitrogen status. *Field Crops Research* 159, 21–32. doi:10.1016/j.fcr.2014.01.008
- Follett, R.H., Follett, R.F., Halvorson, A.D., 1992. Use of a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23, 687–697. doi:10.1080/00103629209368619
- Fox, R.H., Piekielek, W.P., Macneal, K.M., 1994. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25, 171–181. doi:10.1080/00103629409369027
- Hoel, B.O., 2002. Chlorophyll meter readings in winter wheat: cultivar differences and prediction of grain protein content. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 52, 147–157. doi:10.1080/090647103100004843

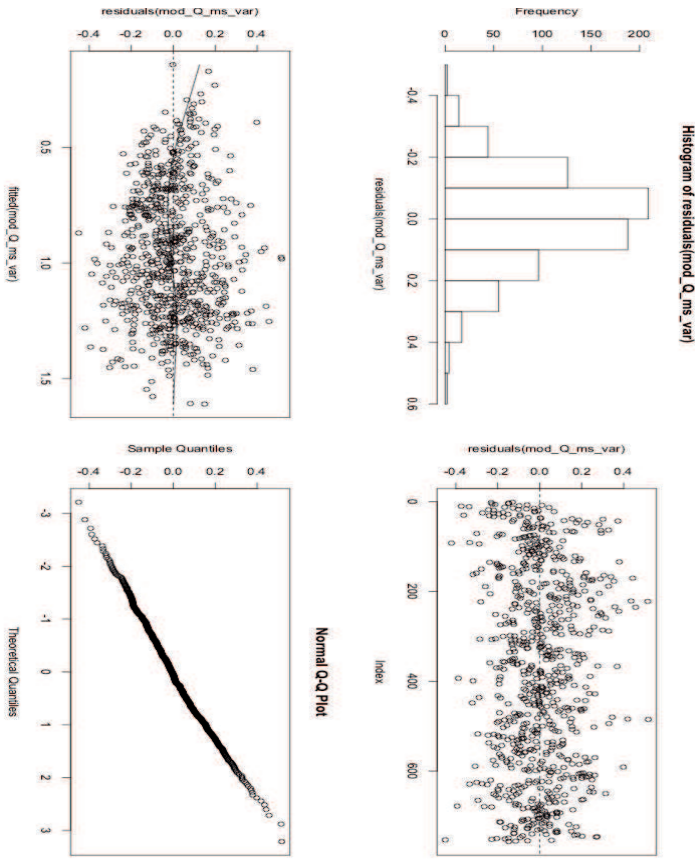
- Hoel, B.O., 1998. Use of a hand-held chlorophyll meter in winter wheat: Evaluation of different measuring positions on the leaves. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 48, 222–228. doi:10.1080/09064719809362502
- Houlès, V., Guérif, M., Mary, B., 2007. Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations. *European Journal of Agronomy* 27, 1–11. doi:10.1016/j.eja.2006.10.001
- Horwitz, W., Senzel, A., Reynolds, H., Park, D.L. (Eds) 1975. *Official Methods of Analysis*, 12th ed. AOAC, Washington DC.
- Jeuffroy, M.H., Ney, B., Ourry, A., 2002. Integrated physiological and agronomic modelling of N capture and use within the plant. *J. Exp. Bot.* 53, 809–823.
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.-M., Machet, J.-M., Thelier-Huché, L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annal of Botany*, 74, 397-407. doi: 10.1006/anbo.1994.1133
- Kuha, J., 2004. AIC and BIC: Comparisons of assumptions and performance. *Sociological Methods & Research* 33, 188–229. doi:10.1177/0049124103262065
- Le Bail, M., Jeuffroy, M.-H., Bouchard, C., Barbottin, A., 2005. Is it possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurements? *European Journal of Agronomy* 23, 379–391. doi:10.1016/j.eja.2005.02.003
- Lemaire, G., Meynard, J.-M., 1997. Use of the nitrogen nutrition index for the analysis of agronomical data, in: Lemaire, G. (Eds), *Diagnosis of the nitrogen status in crops*. Lemaire, G., (Eds), 45-55.
- 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. doi:10.1080/00380768.1997.10414721
- Mazerolle, M.J., 2004. Appendix 1: Making sense out of Akaike's information criterion (AIC): its use and interpretation in model selection and inference from ecological data. *Mouvements et Reproduction des Amphibiens en Tourbières Perturbées* 174–190.
- Mistele, B., Schmidhalter, U., 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *European Journal of Agronomy* 29, 184–190. doi:10.1016/j.eja.2008.05.007
- Mohammed, Y.A., Kelly, J., Chim, B.K., Rutto, E., Waldschmidt, K., Mullock, J., Torres, G., Desta, K.G., Raun, W., 2013. Nitrogen fertilizer management for improved grain yield and quality in winter wheat in Oklahoma. *Journal of Plant Nutrition* 36, 749–761. doi:10.1080/01904167.2012.754039
- Mundry, R., Nunn, C.L., 2009. Stepwise model fitting and statistical inference: Turning noise into signal pollution. *The American Naturalist* 173, 119–123. doi:10.1086/593303
- Naud, C., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H., 2009. Leaf transmittance measurements can improve predictions of the nitrogen status for winter wheat crop. *Field Crops Research* 110, 27–34. doi:10.1016/j.fcr.2008.06.012
- Neilsen, D., Hogue, E.J., Neilsen, G.H., Parchomchuk, P., 1995. Using SPAD-502 values to assess the nitrogen status of apple trees. *Hortscience*, 30, 508-512.
- Neukirchen, D., and J. Lammel. 2002. The chlorophyll content as an indicator for nutrient and quality management. *Nawozy i Nawozenie – Fertilizers and Fertilization* 11:89–109.
- Olf, H.-W., Blankenau, K., Brentrup, F., Jasper, J., Link, A., Lammel, J., 2005. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 414–431. doi:10.1002/jpln.200520526
- Olivier, M., Goffart, J.-P., Ledent, J.-F., 2006. Threshold value for chlorophyll meter as decision tool for nitrogen management of potato. *Agronomy Journal* 98, 496. doi:10.2134/agronj2005.0108

- Ortuzar-Iragorri, M.A., Alonso, A., Castellón, A., Besga, G., Estavillo, J.M., Aizpurua, A., 2005. N-Tester use in soft winter wheat. *Agronomy Journal* 97, 1380. doi:10.2134/agronj2004.0268
- Peltonen, J., Virtanen, A., Haggren, E., 1995. Using a chlorophyll meter to optimize nitrogen fertilizer application for intensively managed small-grain cereals. *Journal of Agronomy and Crop Science* 174, 309–318.
- Prost, L., Jeuffroy, M.-H., 2007. Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 321–330. doi:10.1051/agro:2007032
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Lukina, E.V., Thomason, W.E., Schepers, J.S., 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal* 93, 131–138.
- Reeves, D.W., Mask, P.L., Wood, C.W., Delaney, D.P., 1993. Determination of wheat nitrogen status with a hand-held chlorophyll meter: Influence of management practices ¹. *Journal of Plant Nutrition* 16, 781–796. doi:10.1080/01904169309364574
- Samborski, S.M., Tremblay, N., Fallon, E., 2009. Strategies to make use of plant sensors-based diagnostic information for nitrogen recommendations. *Agronomy Journal* 101, 800. doi:10.2134/agronj2008.0162Rx
- Sembiring H., Lees H.L., Raun W.R., Johnson G.V., Solie J.B., Stone M.L., DeLeon M.J., Lukina E.J., Cossey D.A., LaRuffa J.M., Woolfolk C.W., Phillips S.B., Thomason W.E. 2000. Effect of growth stage and variety on spectral radiance in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 23:1, 141-149, DOI: 10.1080/01904160009382003
- Schepers, J.S., Francis, D.D., Vigil, M., Below, F.E., 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23, 2173–2187. doi:10.1080/00103629209368733
- Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J.S., 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 51–62. doi:10.1016/j.compag.2007.06.006
- Vidal, I., Longeri, L., Hétier, J.M., 1999. Nitrogen uptake and chlorophyll meter measurements in spring wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55, 1–6.
- Vouillot, M.O., Huet, P., Boissard, P., 1998. Early detection of N deficiency in a wheat crop using physiological and radiometric methods. *Agronomie* 18, 117–130. doi:10.1051/agro:19980202
- Wagenmakers, E.-J., Farrell, S., 2004. AIC model selection using Akaike weights. *Psychonomic Bulletin & Review* 11, 192–196.
- Wang, G., Bronson, K.F., Thorp, K.R., Mon, J., Badaruddin, M., 2014. Multiple leaf measurements improve effectiveness of chlorophyll meter for durum wheat nitrogen management. *Crop Science* 54, 817. doi:10.2135/cropsci2013.03.0160
- Wood, C.W., Tracy, P.W., Reeves, D.W., Edmisten, K.L., 1992. Determination of cotton nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. *Journal of Plant Nutrition* 15, 1435–1448. doi:10.1080/01904169209364409
- Yang, H., Yang, J., Lv, Y., He, J., 2014. SPAD Values and nitrogen nutrition index for the evaluation of rice nitrogen status. *Plant Production Science* 17, 81–92. doi:10.1626/pp.s.17.81
- Yuan, Z., Ata-Ul-Karim, S.T., Cao, Q., Lu, Z., Cao, W., Zhu, Y., Liu, X., 2016. Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyll meter readings. *Field Crops Research* 185, 12–20. doi:10.1016/j.fcr.2015.10.003
- Ziadi, N., Bélanger, G., Claessens, A., Lefebvre, L., Tremblay, N., Cambouris, A.N., Nolin, M.C., Parent, L.-É., 2010. Plant-based diagnostic tools for evaluating wheat nitrogen status. *Crop Science* 50, 2580. doi:10.2135/cropsci2010.01.0032

Appendix 1. Analysis of residuals



Analysis of residuals of the exponential model with a biomass effect fitted to normalized CMR values, identified as the most likely model for the reduced dataset



Analysis of residuals of the quadratic model with a biomass and cultivar effect, fitted to absolute CMR values, identified as the most likely model for the initial dataset.

**Discussion, Perspectives
&
Conclusion générale**

Discussion et perspectives

1. Un monopole de la méthode du bilan, qui structure les activités mais n'intègre pas les évolutions de contexte

La méthode du bilan est unanimement considérée en France et dans plusieurs pays européens comme LA bonne manière de raisonner la fertilisation. Or, on peut légitimement se demander si, paradoxalement, la façon dont la méthode du bilan s'est ancrée dans la R&D agricole n'est pas un facteur explicatif majeur des difficultés à maîtriser les fuites d'azote, vers l'air et les aquifères. En l'abordant du point de vue d'un agronome, on peut en effet discuter l'existence d'effets de fixation autour de la méthode du bilan, qui verrouillent la possibilité d'améliorer le raisonnement de la fertilisation azotée. Nous l'avons vu en introduction, au cours du temps, le raisonnement de la fertilisation azotée s'est organisé, de la recherche à la pratique, autour de la méthode du bilan. Un fait marquant de ce consensus est la mise en avant de cette méthode lorsque les thématiques environnementales émergent dans les années 80 (Carlotti, 1992). Portée par la recherche agronomique, les organismes professionnels agricoles, le « comité français pour l'étude et le développement de la fertilisation raisonnée » (COMIFER), et la réglementation, elle est privilégiée par tous, devenue incontournable pour le raisonnement de la fertilisation azotée.

Par sa logique additive, la méthode du bilan s'est parfaitement introduite dans le schéma d'une recherche segmentée autour de thématiques spécialisées où chacun raffine de manière indépendante « son » terme de l'équation. La méthode du bilan a notamment généré des besoins de connaissances sur les fournitures en azote du sol et les mécanismes de pertes en azote (Recous et al., 1997 ; Cellier et al., 2013). La production de modèles dynamiques, permettant une estimation plus fine des doses d'engrais, résulte aussi de ce consensus (Jeuffroy & Recous, 1999; Machet et al., 2008). Mais, alors que de nouvelles connaissances sur les relations plante-azote ont été produites, elles ont été mises de côté, parce qu'elles n'étaient pas en adéquation avec le formalisme de la méthode du bilan. La notion de carence tolérable par exemple : à la fin des années 90, Jeuffroy & Bouchard (1999) montrent que toutes les carences en azote ne sont pas préjudiciables ; quelques années plus tard, Arvalis-Institut-du-végétal conduira plus d'une centaine d'essais qui confirment ces travaux (Jeuffroy et al., 2013), mais ces résultats restent peu connus, car le paradigme de la fertilisation azotée repose sur l'exigence d'absence de carence tout au long du cycle de la culture (Hébert, 1976). De la même manière, les travaux de Plas (1992) ou Limaux (1999) montrent qu'en comparaison aux pratiques habituelles, l'efficacité d'utilisation de l'engrais est améliorée lorsque les apports sont réalisés plus tardivement dans le cycle. Ces connaissances remettent en cause le cadre de raisonnement de la méthode du bilan de manière trop profonde pour être intégrables dans le paradigme dominant.

Le réseau des organismes professionnels agricoles, incluant les instituts techniques, les chambres d'agriculture et les coopératives agricoles, a massivement investi dans l'expérimentation pour adapter le paramétrage du modèle dominant à quasiment toutes les situations agronomiques possibles, puis dans les outils de calcul et de pilotage pour offrir aux agriculteurs un conseil technique rigoureux, qui répond aux exigences de la réglementation. La maîtrise des fuites d'azote a été recherchée par la massification de l'usage du bilan sur le territoire, via le développement d'outils automatisés. Dans un tel contexte de quasi-monopole, difficile de faire émerger des modèles de raisonnement alternatifs ! Par exemple, alors que les connaissances sur les effets du fractionnement de l'engrais ont montré que certaines stratégies de fertilisation, avec des apports équivalents mais plus tardifs, permettaient d'améliorer la teneur en protéines des grains (Limaux, 2002 ; Meynard et al., 2002 ; Zebarth et al., 2007), la question de l'amélioration de la teneur en protéines du blé a été traitée récemment par un ajustement à la hausse du terme b de l'équation du bilan, augmentant ainsi les besoins, et donc la dose appliquée (Eq.1) (Noël, 2016).

Légitimée par le consensus scientifique, la prédominance du modèle est aussi renforcée par la réglementation. Présente dans le guide des bonnes pratiques agricoles pour la mise en œuvre de la Directive Nitrates depuis les années 90, la méthode du bilan est devenue un outil règlementaire depuis 2012. Les Groupes Régionaux d'Expertise Nitrate (GREN) avaient explicitement pour mission de travailler sur la méthode du bilan : « *[La règle de calcul de la dose prévisionnelle] devra prioritairement prendre la forme d'une écriture simplifiée de la méthode du bilan prévisionnel selon les méthodes développées par le COMIFER* », (Extrait de la lettre de mission envoyée par les préfets aux membres désignés des GREN). A ce moment-là, implicitement, on inscrit dans le marbre que la méthode du bilan permet de garantir l'équilibre de la fertilisation azotée et on renforce l'idée émise en 1992 (Carlotti, 1992) qu'elle est la solution pour gérer les problèmes de pollution environnementale. Alors que les GREN auraient pu être une opportunité unique de discuter collectivement des choix méthodologiques et des moyens d'améliorer la gestion de la fertilisation azotée, l'enjeu de ces groupes s'est concentré sur la recherche d'un consensus entre les différents acteurs sur la manière de fixer les différents termes de l'équation de la méthode du bilan. Par exemple, alors que la fixation de l'objectif de rendement a fait l'objet de débats vifs dans la grande majorité des GREN, et que les experts ont clairement exprimé un désaccord sur la manière de le fixer, aucune discussion n'a été ouverte sur le concept lui-même. Ainsi que le montre le chapitre 1, les GREN ont seulement débattu de la meilleure façon de fixer les valeurs par défaut afin de ne pas pénaliser les agriculteurs. Ils n'étaient pas missionnés pour proposer la meilleure manière de raisonner la fertilisation azotée, mais pour approuver des références qui seraient juridiquement opposables pour la mise en œuvre règlementaire de la méthode du bilan.

La méthode du bilan structure également l'activité cognitive des agriculteurs. Avec ce modèle, ceux-ci peuvent simplifier le raisonnement de la fertilisation autour d'une dose planifiée à l'avance, ainsi que

l'a confirmé le diagnostic des usages (chapitre 1). Les ajustements en cours de culture portent principalement sur les modalités de fractionnement de cette dose, calées sur des dates ou des stades. La méthode du bilan permet de mettre en place une procédure de routine (Cerf, 1996) qui, *in fine*, limite la capacité d'ajustement de la fertilisation azotée à l'année en cours : la dose calculée, c'est l'assurance de ne pas prendre de risque vis-à-vis de la nutrition azotée des cultures. Dans la pratique, il devient difficile d'accepter d'apporter une dose d'engrais plus faible que la dose bilan, quitte à apporter dans des conditions de valorisation sub-optimales. Les repères, calés sur des dates ou des stades, conduisent implicitement à poursuivre l'objectif d'apporter une certaine dose d'engrais autour d'une date, sans tenir compte de la situation climatique de l'année, ni des besoins instantanés de la plante. L'analyse de la manière de raisonner la fertilisation azotée par les agriculteurs confirme l'effet de fixation autour de la méthode du bilan, qui offre un cadre confortable et satisfaisant pour l'organisation des interventions de fertilisation azotée. Cependant, en détaillant et en explicitant les pratiques et les prises de décision des agriculteurs, on entrevoit des limites à ce cadre. S'il rassure, il laisse parfois sans réponse certaines questions que se posent les agriculteurs : quelle efficience de mon apport ? Quelles conséquences sur la production si je n'apporte pas tout de suite ? Est-ce que c'est vraiment tous les ans au même moment que les besoins en azote sont forts ? On trouve beaucoup de questionnements relatifs aux choix des dates d'apports. La méthode du bilan ne prévoit pas cette dimension du raisonnement, pourtant essentielle pour l'agriculteur. La question de la gestion du risque de sécheresse (période longue durant laquelle les conditions météorologiques ne sont pas favorables à la valorisation de l'engrais) est également récurrente dans le discours des utilisateurs.

Finalement ce modèle est confortable pour tout le monde : sa structure facilite le partage du travail dans un cadre d'amélioration incrémentale ; il rend possible le déploiement massif d'outils (de calcul et de pilotage), il facilite pour les agriculteurs une planification de la fertilisation azotée, et aujourd'hui simplifie le contrôle des pratiques agricoles relativement à la mise en œuvre de la directive nitrate. Cependant, une hypothèse qui a initié puis guidé le travail de thèse est que ce système, si bien rodé, empêche l'exploration d'autres modes de raisonnement de la fertilisation azotée par des effets de fixation. Nous avons pris soin d'identifier les points faibles de cette méthode, lorsqu'elle est mise en œuvre sur le terrain, pour initier une nouvelle manière de raisonner la fertilisation azotée:

- Les principes fondamentaux sur lesquels repose la méthode du bilan, qui sont révélateurs de divergence entre la théorie et la pratique ;
- Le besoin d'accompagner la prise de décision en temps réel pour mieux gérer la répartition de l'engrais durant le cycle de croissance, en lien avec les besoins instantanés du couvert ;
- La nécessité de prendre en compte les risques, tant de production que de pollution, dans le raisonnement de la fertilisation azotée.

Sans prétendre à l'exhaustivité, une méthode qui intègre ces dimensions, pourrait éventuellement permettre de dépasser le cadre de la méthode du bilan et se positionner comme une alternative

intéressante pour intégrer enjeux environnementaux et pratiques agricoles dans le raisonnement de la fertilisation azotée.

2. Un renouvellement du paradigme du raisonnement de la fertilisation azotée

La différence entre la méthode que nous avons explorée et le paradigme actuel se situe sur 1) les objectifs poursuivis et les principes de raisonnement, 2) les indicateurs mobilisés et la manière de les utiliser, et 3) son intérêt pour susciter des apprentissages.

2.1. Objectifs et principes

Dès le début de la conception de la nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée, nous avons mis en avant que la fixation de l'objectif de rendement cristallisait un antagonisme entre enjeux environnementaux et économiques : le formalisme de la méthode du bilan ne permet pas de gérer les arbitrages entre ces objectifs parfois contradictoires. Nous avons donc mis au cœur de nos réflexions, la possibilité d'explorer une méthode qui permette un compromis entre les objectifs de maintien des niveaux de production (rendement) et de leur qualité (teneur en protéine) tout en minimisant les pertes vers l'environnement.

Au fil de la conception, la notion de carence utile est devenue centrale, se positionnant comme un objectif à poursuivre. L'idée était de ne pas pénaliser les performances de la culture tout en ayant suivi une trajectoire de nutrition azotée du couvert avec des périodes de nutrition azotée sub-optimale. On passe donc d'une méthode qui poursuit un objectif d'apporter une dose permettant d'atteindre un rendement (espéré, potentiel ou moyen) à une méthode qui poursuit un objectif de non-baisse de la production : on s'attache à ce que l'azote ne soit pas en cause dans une éventuelle baisse de production, par le maintien de l'état de nutrition au-dessus d'un seuil dont on sait qu'il n'engendre pas de pertes de rendement par rapport aux potentialités permises par le climat de l'année. On va même plus loin dans le principe de carences tolérables, puisqu'on met en avant qu'en acceptant des carences, on pourra apporter l'engrais plus tard, et ainsi en maximiser l'efficacité d'utilisation (Limaux et al, 2001). De plus, on sait que les carences azotées précoces permettent de limiter les risques de verse et de certaines maladies (oïdium, septoriose), ce qui pourra aussi contribuer à la maîtrise du rendement, voire aux économies d'intrants (Loyce et al., 2008).

Pour illustrer le changement dans la manière de gérer les doses d'engrais qu'apportait la méthode Jubil®, François Laurent, aujourd'hui responsable du service Agronomie, Economie, Environnement d'Arvalis-Institut-du-végétal, utilisait une image qui nous semble également bien adaptée dans notre cas : *« il y a plusieurs façon de s'y prendre pour saler la soupe, disait-il : on peut déterminer une quantité de sel à apporter en prenant en compte le volume de la soupe et la teneur en sel souhaité (c'est la méthode du bilan), ou alors goûter, saler un peu et re-goûter jusqu'à ce que la soupe soit*

salée à notre goût ». Avec la méthode de raisonnement que nous avons explorée, nous allons encore plus loin que les outils de pilotage comme Jubil®, puisqu'ici nous avons abandonné la notion de dose totale *a priori* et proposons de baser la gestion de la fertilisation azotée sur un suivi régulier, dès les stades précoces, de l'état de nutrition azotée du couvert, pour :

- 1) déclencher un apport en condition optimum de valorisation de l'engrais, c'est-à-dire seulement lorsque sont réunies : des conditions météorologiques favorables pour la valorisation de l'engrais, une demande en azote du couvert forte et une fourniture en azote du sol faible.
- 2) apporter la dose d'engrais suffisante pour maintenir l'état de nutrition azotée au dessus d'un niveau minimum, tout en limitant les pertes vers l'environnement.

Depuis plusieurs années, la fréquence d'épisodes de sécheresse au printemps a conduit les agriculteurs à anticiper les apports, et un épisode pluvieux avant la date d'apparition du stade épi 1 cm est devenu un facteur prédominant de déclenchement des apports. Pour éviter un risque de carence lié à la sécheresse, les agriculteurs prennent un risque de baisse de l'efficacité d'utilisation de l'engrais à cause d'apports trop précoces. Dans la démarche de conception d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée, on s'est attaché à ce que le formalisme du prototype intègre, de manière aussi transparente que possible, les choix de risques à opérer. Dans la méthode du bilan, il y a un choix de pondération des risques implicite, et qui est celui de l'agronome (Meynard, 1998). Nous avons vu dans le chapitre 3, dédié à la trajectoire d'INN minimum, que lorsqu'on compare les niveaux de sensibilité et de spécificité des différentes trajectoires d'INN, la trajectoire correspondant à l'objectif d'éviter toute période de carence, est très spécifique mais peu sensible. Ce qui s'interprète comme une minimisation du risque de perte de rendement due à un défaut d'azote. Makowski (1996) avait déjà montré que le bilan prévisionnel conduisait plus souvent à sur-fertiliser qu'à sous-fertiliser. Au travers de l'objectif de poursuivre une nutrition azotée non limitante, le formalisme de la méthode du bilan suggère implicitement que l'agriculteur est averse au risque de sous-fertilisation. Mais peut-on partir de ce postulat ? Plusieurs études passées convergent pour dire que le niveau d'aversion au risque influence les choix stratégiques (Rossing et al., 1994 ; Meynard, 1998 ; Cacho et al., 1999 ; Woodward et al., 2008). Sommes-nous légitimes, nous agronomes et scientifiques, pour imposer notre représentation du risque dans les modèles ? Et si oui, quel arbitrage adopter, entre le risque de pertes de rendement et le risque de pertes vers l'environnement ? Rappelons que la controverse sur l'objectif de rendement, identifiée dans le chapitre 1, montrait que ce choix de risque faisait débat au sein de la communauté des agronomes. Dans la construction du prototype de méthode de fertilisation, la possibilité d'adapter les règles de décision au choix d'un niveau minimal de robustesse a été pensée comme un moyen de laisser la possibilité à l'utilisateur de fixer son niveau de risque, en fonction de sa propre représentation et de ses conditions.

2.2. Les indicateurs et la manière de les utiliser

Cette nouvelle méthode repose largement sur le contrôle de l'état de nutrition azotée de la plante. C'est l'indicateur central dans notre raisonnement puisqu'il nous informe en instantané du statut azoté des plantes et en dynamique de la biodisponibilité de l'azote du sol. La méthode du bilan est historiquement issue d'une équipe (la station agronomique de l'INRA de Laon) spécialisée sur l'azote du sol. Les rencontres organisées tous les 2 ans par le COMIFER, associé au GEMAS (Groupement d'Etudes Méthodologiques et d'Analyses des Sols), montrent la prédominance des indicateurs « sol » dans le raisonnement de la fertilisation. Non seulement nous proposons un raisonnement basé sur le contrôle d'indicateurs « plante », mais nous proposons également une nouvelle manière d'utiliser les indicateurs au service de la prise de décision. Ainsi, un indicateur « sol », phare de la méthode du bilan, est la quantité d'azote minéral dans le sol à la sortie de l'hiver (R_i), quantifié par une analyse de sol : la mesure du reliquat sortie hiver (RSH). Le 1^{er} chapitre a rappelé que cette mesure était, non seulement, lourde à réaliser par les agriculteurs, mais également source d'incertitudes. De plus, elle est mal valorisée pour le raisonnement de la fertilisation, puisqu'elle n'est utilisée que pour estimer le terme R_i de l'équation du bilan (Eq 1), alors qu'elle pourrait être un indicateur pour le fractionnement, avec des règles simples d'interprétation : si l'azote contenu dans le sol à la date de l'analyse est de $X \text{ kg N ha}^{-1}$, alors j'ai un stock suffisant pour alimenter la plante pendant Y jour(s), donc je n'apporterai pas mon premier apport avant ce moment. Dans la nouvelle méthode que l'on propose, on se munit de règles d'interprétation pour mettre à profit l'indicateur plante dans la prise de décision. On peut imaginer qu'un agriculteur ou un conseiller soit plus réceptif à une mesure qu'il pourra interpréter et qui lui donne des pistes pour décider de sa gestion de la fertilisation azotée, plutôt qu'à une mesure qui ne lui donne qu'une information ponctuelle sur l'azote dans le sol et qu'il n'interprète pas en dehors du cadre de la méthode du bilan. De plus, les indicateurs sols, comme le RSH, nécessitent l'intervention d'un laboratoire pour analyser l'échantillon de sol prélevé, ce qui crée des lourdeurs et des délais incompressibles dans la disponibilité de l'information. Il existe des outils permettant une plus grande autonomie comme le Nitracheck® pour réaliser soi-même des analyses de teneur en azote dans la solution du sol, mais ces outils restent délicats à mettre en œuvre et ne dispensent pas des prélèvements de sol. Du côté des indicateurs plante, la gamme d'outils de mesure actuellement disponible est bien plus large: par réflectance (au sol avec le N-pilot®, par des images satellites avec Farmstar®, des capteurs embarqués avec le N-Sensor®), par transmittance (estimation de la teneur en chlorophylle avec pince N-tester®), ou par le biais de la mesure de la teneur en nitrate de la plante avec la mallette Jubil®. L'agriculteur a, à disposition, une palette d'outils suffisamment large pour choisir, et certains offrent la possibilité de réaliser des mesures en toute autonomie (à condition de disposer des abaques pour interpréter les résultats). Jusqu'ici, ces outils ont été sous-valorisés. Alors qu'on sait que les plus grosses pertes ont lieu lors des apports précoces, mal valorisés par la plante, on n'utilise pas les innovations technologiques relatives aux indicateurs « plante » pour minimiser ces pertes et mieux maîtriser ces apports précoces. L'étude réalisée sur la relation entre les indicateurs de

nutrition azotée de la plante et les outils de mesure de la teneur en chlorophylle sur le blé (chapitre 5) illustre bien ce point : jusque là, il n'y avait pas eu de travaux sur une relation qui soit valable tout au long du cycle. Et vraisemblablement, s'il n'y a pas eu de nécessité à établir cette relation, c'est parce qu'on a surtout cherché à utiliser la technologie pour prédire le rendement (Follet et al., 1992 ; Reeves et al., 1993) ou la teneur en protéines (Matsunaka et al., 1997 ; Le Bail et al., 2005). Or, en début de cycle, la teneur en chlorophylle n'est pas corrélée au rendement. Ces technologies ont été mises au service du pilotage du seul dernier apport, en vue d'assurer une nutrition azotée non limitante pour le rendement, et une teneur en protéine élevée.

Nous suggérons enfin, ainsi que cela a été souligné dans les ateliers de conception (chapitre 2), que la maîtrise, grâce à l'indicateur « plante », de l'installation d'une carence précoce, peut permettre de se dispenser de la mesure du RSH : en effet, si un peuplement est carencé au début de la montaison, alors que son enracinement n'est pas loin d'atteindre sa profondeur définitive, c'est bien qu'il aura consommé l'azote minéral à sa disposition dans le sol : comme pour le colza en fin d'hiver (Colnenne et al., 2002), l'azote minéral du sol sera alors suffisamment bas pour qu'il n'y ait pas d'utilité à le mesurer pour estimer la fourniture ultérieure du sol.

2.3. La fonction d'apprentissage

Finalement, ainsi que le montre le test d'usage (chapitre 2), un point clé, qui change par rapport au paradigme actuel, est la capacité de la nouvelle méthode à alimenter des dynamiques d'apprentissage.

La méthode du bilan semble moins favorable aux apprentissages. Bien qu'il y ait eu des tentatives pour produire des outils basés sur l'analyse du bilan a posteriori (voir par exemple Bockstaller et al., 2008), leur impact sur les apprentissages est resté limité à cause de la difficulté d'expliquer les écarts de rendement par rapport à l'objectif. La quantité d'azote contenu dans le sol à la sortie de l'hiver pourrait aussi être un indicateur pour l'amélioration des pratiques à l'échelle de la rotation culturale (un reliquat sortie hiver élevé peut être révélateur d'un reliquat post récolte élevé). Cependant, pour analyser les sources potentielles d'excès d'azote sur la rotation, l'utilisation d'un indicateur visuel basé sur l'état d'une culture intermédiaire piège à nitrates (CIPAN) serait a priori plus pertinente (Paravano et al., 2016).

On a vu, lors du test d'usage du prototype, que les agriculteurs utilisaient les mesures du N-Tester® non seulement pour mettre en œuvre le prototype et décider de leur fertilisation, mais aussi pour mieux connaître la dynamique de l'azote dans leur parcelle. Si l'INN baisse, ça veut dire qu'il n'y a plus assez d'azote à disposition ; si l'INN monte, alors la plante absorbe activement l'azote du sol ou de l'engrais. Ils ont utilisé la mesure du N-tester® pour questionner leurs pratiques en comparant des parcelles conduites selon leur méthode de fertilisation habituelle et la bande test qui n'avait pas été fertilisée. Lorsqu'ils n'ont pas constaté de différence, ils se sont interrogés sur la valorisation de

l'azote apporté sur la parcelle. Et après le test, ils ont envisagé d'adapter leur stratégie de fertilisation l'année prochaine sur l'ensemble des parcelles pour éviter des apports mal valorisés.

Les conseillers ont quant à eux très bien accueilli la nouvelle méthode et ont perçu l'utilité de celle-ci pour formuler un conseil technique. En temps réel, couplé à l'information sur la trajectoire de nutrition minimale, l'INN ou tout indicateur corrélé apparaissent pertinents pour conseiller les agriculteurs. Pour les conseillers, suivre l'INN est aussi un moyen d'apprendre à gérer la fertilisation azotée de manière à apporter l'engrais en fonction des besoins de la plante. L'INN est une information concrète sur l'état du champ, qui intègre la variabilité annuelle. Ils peuvent le mobiliser pour expliquer pourquoi, par exemple, l'azote n'a pas bien été valorisé, et formaliser un conseil pour améliorer les pratiques l'année suivante.

Lorsque les outils d'aide à la décision sont conçus pour favoriser les apprentissages, leurs chances de mise en œuvre sont maximisées (McCown, 2002 ; Woodward et al., 2008). On peut faire l'hypothèse que la diffusion de la méthode passera donc aussi par l'intérêt de sa fonction d'apprentissage pour les agriculteurs et les conseillers.

3. Trois étapes qui s'articulent et se complètent pour intégrer le point de vue des utilisateurs dans la conception.

Nous avons combiné plusieurs méthodes de travail complémentaires, qui nous ont permis d'aboutir à un prototype qui réponde aux enjeux de maximisation de l'efficacité de l'engrais, tout en intégrant les problématiques liées à la mise en œuvre sur le terrain.

3.1. Combiner diagnostic des usages et atelier de conception

3.1.1. Le diagnostic des usages : un outil pour la conception innovante

L'étape de diagnostic est essentielle dans un processus d'innovation agronomique (Doré et al., 1997 ; Meynard et al., 2001). Les solutions proposées suite à des démarches avec diagnostic sont différentes des solutions proposées lorsque l'agronome décide a priori ce dont les agriculteurs ont besoin. Le fait de réaliser un diagnostic, et la manière de le réaliser, influencent la nature des objets agronomiques conçus. Qu'il repose sur l'analyse des raisons d'adoption et non-adoption d'innovations (Osty, 1978, Fujisaka, 1994), sur l'analyse agronomique des pratiques agricoles (Byerlee et al., 1991) ou sur l'analyse des sources de variabilité de la production dans une région agricole (Doré et al., 1997), il vise à orienter la recherche de solutions innovantes. Le diagnostic des usages que nous avons proposé est quelque peu différent des diagnostics habituellement réalisés en agronomie (Cerf et al., 2012). Des travaux précédents ont esquissé les fondements théoriques de la manière dont le diagnostic des usages permet de nourrir la conception en agronomie (Lecomte, 2005 ; Cerf et Meynard, 2006 ; Prost, 2012 ; Cerf et al., 2012). Par exemple, on sait qu'on peut en tirer des éléments pour alimenter, ou même orienter la conception (Cerf et Meynard, 2006 ; Cerf et al., 2012). Cependant, jusqu'ici, les modalités

d'articulation entre le diagnostic des usages et la conception ont peu été travaillées. On peut évoquer les travaux de Berthet (2013, 2016), qui portaient sur la mise place d'une action collective pour la protection de la biodiversité dans une zone d'agriculture intensive : une étude rétrospective des actions de conservation menées sur le territoire a été réalisée en combinant une analyse documentaire et des entretiens avec les acteurs impliqués, et c'est la différence entre les voies possibles identifiées lors de cette analyse et la proposition initiale des acteurs qui a motivé la réalisation d'un atelier de conception, pour éviter les effets de fixation et explorer des alternatives innovantes. Dans notre cas, étant donné le consensus marqué autour de la méthode du bilan, nous avons anticipé la possibilité d'être confrontés à des effets de fixation. Le diagnostic a donc été pensé de manière à identifier, tôt dans la conception, les éléments qui seraient utiles pour déclencher des explorations au-delà des connaissances et solutions classiquement mobilisées. Nous avons réalisé ce diagnostic sans avoir d'*a priori* sur l'objet à concevoir, et c'est finalement par une analyse fine du paradigme actuel que nous avons décelé ses limites et mis en avant les principes à questionner en conception. Nous proposons donc ici un exemple qui montre comment démarrer un processus de conception innovante d'un outil d'aide à la décision, à partir d'une analyse de l'usage des méthodes et des outils existants.

Au-delà de l'intérêt certain du diagnostic pour s'approprier la problématique, comprendre le contexte dans lequel on va positionner l'innovation, et commencer à identifier de nouvelles voies, notre diagnostic des usages avait donc clairement l'ambition de limiter les effets de fixation au cours des ateliers de conception. Il a ainsi apporté différents éléments utiles pour affiner la formulation des concepts projecteurs, en les liant à ce que les utilisateurs font actuellement. Il a aussi été mobilisé pour convaincre les participants aux ateliers de l'intérêt d'explorer ces concepts projecteurs. Les participants aux ateliers étaient des chercheurs et des ingénieurs impliqués au quotidien dans la thématique de la gestion de l'azote, maîtrisant de très nombreuses connaissances scientifiques et pratiques, de fait orientées « méthode du bilan ». Dans un tel groupe où les effets de fixation auraient pu être importants, le couplage entre le diagnostic des usages et les ateliers de conception a créé des conditions favorables pour l'exploration de concepts innovants. Le diagnostic des usages est bien un outil pour la conception innovante.

3.1.2. Identifier des usages innovants avec le diagnostic des usages

Une des fonctions du diagnostic est d'identifier des usages innovants nés d'une nécessité d'adapter la méthode ou l'outil à une situation singulière (Cerf & Meynard, 2006). Cependant, lors de notre diagnostic, nous n'avons pas réussi à identifier d'usages innovants de la méthode du bilan. Il est possible que l'ancrage de la méthode du bilan dans le tissu agricole et dans la réglementation française, limitent l'émergence d'usages déviants. Cependant, la construction même du guide d'entretien (Annexe 1) pourrait également expliquer que toutes les nuances d'usage pour un même individu ou entre individus n'aient pas été perçues. On peut se demander si l'entrée par le raisonnement de la fertilisation azotée sur une parcelle, par laquelle on se focalise très rapidement sur

l'usage des outils au niveau de la parcelle et de l'année, ne réduit pas abusivement l'espace d'usage de la méthode du bilan. Il aurait peut-être été plus pertinent de démarrer l'enquête par une question plus ouverte ne réduisant pas le système à une parcelle de blé, une année, pour capter l'ensemble des raisonnements de l'utilisateur des méthodes et outils, avant de converger sur les niveaux de la parcelle et de l'année pour récupérer une information plus fine. Un deuxième biais pouvant expliquer que nous n'ayons pas capté d'usages déviants est lié à la démarche d'échantillonnage. Nous avons adopté une démarche d'échantillonnage en « boule de neige », conduite en demandant à chaque conseiller agricole : connaissez-vous des agriculteurs ou des conseillers agricoles qui ne font pas comme vous ? Cette démarche est bien adaptée aux questions de traque aux innovations en agriculture (Salembier et al., 2016), mais il n'est pas sûr qu'elle soit pertinente pour la mise en œuvre d'une méthode de raisonnement de la fertilisation. En rentrant dans le réseau d'acteurs par les conseillers agricoles, on a ciblé de facto des agriculteurs qui raisonnent avec des outils maîtrisés par le conseiller, donc limité les chances de rencontrer des usages innovants. Certains conseillers nous ont conduits vers des agriculteurs dont ils ne connaissaient pas exactement le raisonnement, pensant avoir à faire à des usages atypiques. Mais même dans ces quelques situations, la méthode du bilan était toujours utilisée, de la même manière, et avec les mêmes difficultés, quels que soient la région, et le système de production.

3.2. Elaborer un prototype de nouvelle méthode en combinant ateliers de conception, modélisation et usage

Dans notre démarche, la construction du prototype de la méthode s'est échelonnée dans le temps. La confrontation des propositions à des regards extérieurs mais impliqués a été une source d'enrichissement pour la conception. En suivant les propositions d'animation d'ateliers KCP (Berthet et al., 2015 ; Hooge, 2016), nous avons consacré le premier atelier aux phases K et C. Cet atelier a été riche et a permis d'identifier puis de produire une nouvelle connaissance sur la trajectoire d'INN minimum. Pour préparer l'atelier suivant consacré à la phase P, de formalisation d'un prototype, nous avons utilisé Azodyn pour faire une proposition concrète de mise en œuvre d'une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée, reposant sur le principe de maintien d'un état de nutrition azotée au dessus de la trajectoire minimum, incluant des périodes de carence. Ainsi Azodyn nous a permis 1) d'illustrer la formalisation de règles de décision permettant de mettre en œuvre la méthode de raisonnement de la fertilisation explorée, et 2) de mettre en discussion la nature des informations nécessaires pour ne déclencher des apports que lorsqu'il y a un risque que l'INN passe sous la trajectoire minimum, avant que les conditions météorologiques redeviennent favorables à la réalisation d'un apport d'engrais. Il s'agissait d'amorcer les discussions collectives sur la manière de prendre en compte les conditions météorologiques et le risque associé dans la formalisation des règles de décision.

Nous souhaitons profiter de cette discussion de thèse pour revenir sur un tâtonnement dans la mise au point des règles de décision, dont nous n'avons pas fait part dans les résultats, mais qui pose bien, nous semble-t-il, la difficulté de construire des règles à partir d'un modèle. Dans un premier temps, les règles de décision du prototype ont été formulées comme suit :

- *Lorsque les conditions météorologiques sont favorables à la réalisation d'un apport d'engrais, alors contrôler l'indicateur d'état de nutrition azotée (INN ou indicateur corrélé) du couvert ;*
- *Si l'INN est inférieur à la valeur minimum à respecter à cette date, alors déclencher un apport.*
- *Si l'INN est supérieur à la valeur minimum à respecter à cette date, alors calculer la probabilité que l'INN reste supérieur à la valeur minimum à respecter à la prochaine date avec des conditions météorologiques favorables ;*
- *Si la probabilité de maintenir l'INN au dessus de la trajectoire minimum jusqu'à la prochaine date avec des conditions favorables est supérieure à 0.95, alors ne pas déclencher d'apport ;*
- *Si la probabilité est inférieure à 0.95, alors déclencher un apport.*

Dans les cas où on déclenche un apport, la dose à apporter correspond à la dose suffisante pour que l'INN reste au dessus de la valeur minimum à respecter jusqu'à la prochaine date avec des conditions favorables.

Tout ce raisonnement reposait sur l'estimation de la date suivante, à partir de la date du contrôle, avec des conditions météorologiques favorables pour réaliser un apport d'engrais. Nous la fixions à partir d'une analyse fréquentielle climatique, comme la date jusqu'à laquelle il est nécessaire d'attendre pour être quasiment sûr (19 années sur 20) de retrouver des conditions favorables à la réalisation d'un apport. C'était la manière de prendre en compte le risque de sécheresse qui nous paraissait la plus appropriée.

Pour chaque jour de l'année et chaque valeur de l'INN susceptible d'être observée ce jour là, plusieurs séries de simulations basées sur Azodyn étaient lancées : d'abord pour déterminer la date d'apport i.e. la date à partir de laquelle la probabilité de maintenir l'INN au dessus de la trajectoire minimum était inférieure à 0.95 ; puis pour estimer la dose à apporter, i.e. la dose suffisante pour maintenir l'INN au dessus de la trajectoire minimum jusqu'à la prochaine date de conditions météorologiques favorables. Cette approche, lourde et coûteuse en temps, n'était pas optimisée pour répéter la construction de règles de décision dans différentes situations agronomiques. Mais surtout, lors du test du prototype, nous nous sommes rendus compte, en échangeant avec les conseillers, que nous imposions notre représentation de l'incertitude sur les conditions météorologiques, avec un niveau de risque fixé arbitrairement, qui plus est sans prise en compte des risques environnementaux induits par des apports trop précoces. Et le résultat était très sensible à la manière de fixer le risque d'apport en conditions

sèches: entre un risque très faible (19 années sur 20) et un risque plus élevé (15 années sur 20), les doses conseillées étaient très différentes.

La théorie de la viabilité nous a offert une autre manière de prendre en compte l'incertitude météorologique et de mieux gérer, nous semble-t-il, les arbitrages entre risque de production et risques environnementaux (chapitre 4). Si la construction du plan de simulation est un peu plus lourde, puisqu'il faut simuler toutes les combinaisons de dates et doses d'apport d'engrais possibles, le traitement des données et la construction des règles de décision est beaucoup plus efficace. Ensuite, l'analyse des sorties avec les contraintes de viabilité permet de prendre en compte à la fois les objectifs environnementaux (en fixant une limite aux pertes qu'on autorise) et économiques (en imposant le respect de la trajectoire minimum chaque jour du cycle). Nous pouvons donc concilier aisément les deux objectifs dans la détermination des doses à apporter à chaque date. Et finalement, le fait de travailler sur un niveau de robustesse et non pas une solution unique rend possible la fixation d'un risque propre à chaque utilisateur.

La théorie de la viabilité nous permet d'adopter une démarche multicritères via la définition des contraintes de viabilités. Par rapport à la méthode du bilan qui tend à privilégier la minimisation des risque de pertes de rendement (Makowski, 1996 ; Meynard, 1998), on propose une manière de concilier les objectifs environnementaux et économiques avec des règles de décision pouvant être ajustées selon différents niveaux de préférences du risque lié à ces deux objectifs.

La construction des règles de décision pour la mise en œuvre du prototype est ainsi passée par différentes phases : de la non prise en compte de la contrainte météorologique, à la proposition issue du deuxième atelier, qui intègre une analyse fréquentielle climatique, mais trouve ses limites dans l'arbitrage des risques, et finalement à l'utilisation des algorithmes de la théorie de la viabilité. Dans ce processus itératif, la manière d'utiliser le modèle s'est posée comme une question essentielle. En sciences agronomiques, les thématiques qui font le plus souvent appel à des démarches de prototypage par modélisation concernent la conception de systèmes de culture ou de systèmes agricoles innovants. Les modèles sont alors utilisés pour identifier des solutions techniques satisfaisantes (Bergez et al., 2010 ; McCown, 2001). Mais la manière de construire le modèle, puis de l'utiliser n'est que très rarement discutée dans les démarches de conception (Prost et al., 2012). On peut penser que, si nous n'avions pas été dans une démarche de conception participative intégrant les attentes des futurs utilisateurs, le résultat aurait été complètement différent. Dans notre démarche, le modèle se positionne comme un outil pour nourrir un processus de co-conception de longue haleine, basé sur des interactions, à différentes étapes, avec les acteurs. Et, même si la réalisation et l'analyse des simulations a pris du temps, on peut dire que le modèle n'a pas joué un rôle moins central que les ateliers participatifs dans la conception de la nouvelle méthode.

3.3. Questionner la pertinence du prototype dans les pratiques agricoles

Pour vérifier la pertinence du prototype du point de vue des utilisateurs, nous avons suivi les propositions de Cerf et al. (2012) et mis en place un test en situation d'usage. Ce test vise à identifier, dès que possible au cours du processus de conception, les divergences de représentations cognitives entre les concepteurs et les utilisateurs (Cerf, 1996 ; Cerf & Meynard, 2006). Ce mode d'évaluation est différent de celui habituellement mobilisé en agronomie, qui repose sur des expérimentations pour évaluer les performances agronomiques. Le test d'usage est une étape à part entière de la conception puisque le prototype n'est qu'une étape de la conception, un objet intermédiaire visant à faciliter l'interaction avec les utilisateurs. Il ne s'agit pas d'un outil finalisé, la fonction du prototype est de mettre en mouvement le nouveau paradigme pour en évaluer la pertinence du point de vue des utilisateurs (Cerf et al., 2012). Il est nécessaire pour le test que le prototype soit suffisamment concret pour permettre sa mise en œuvre, mais aussi suffisamment flexible pour que l'on puisse y apporter des modifications, à l'issue du test.

L'organisation et l'animation de ce test sont des éléments clés pour en tirer des enseignements. Nous avons identifié plusieurs étapes importantes pour lesquelles une réflexion sur les choix méthodologiques mériterait d'être développée. Par exemple, le choix des individus qui testeront la méthode peut influencer la qualité des retours. D'abord, par le nombre d'individus qui vont poursuivre la démarche jusqu'au bout : dans notre test, nous avons eu deux groupes d'agriculteurs, accompagnés chacun d'un conseiller. Le premier groupe avait été identifié lors de la phase de diagnostic, il y a eu des échanges avec ce groupe tout au long des trois années, et ils ont très rapidement émis le souhait d'aller jusqu'au test de la méthode qu'on allait concevoir. Sur les 15 agriculteurs présents à la première réunion de présentation, seulement 2 n'ont pas mené le test jusqu'au bout, mais tous étaient présents au débriefing collectif. Le deuxième groupe n'avait pas été enquêté dans le cadre du diagnostic des usages, mais souhaitait optimiser l'utilisation des outils de pilotage sur le blé. Sur les 10 agriculteurs présents à la réunion de présentation, la moitié a abandonné le test en cours de campagne. Ce type de test demande à l'agriculteur, avant toute chose, une solide motivation, car il doit s'approprier un nouvel outil et une nouvelle manière de raisonner, en acceptant que tout ne soit pas forcément parfaitement bien calibré (parce qu'on teste un prototype en conception). Il doit aussi recueillir un certain nombre d'informations en cours de campagne. Sur les 25 agriculteurs initialement investis dans les tests, nous n'avons pu collecter les informations prévues que pour 12 d'entre eux. Mais les informations précises données par ces 12 agriculteurs ont servi de support à des échanges riches avec l'ensemble des agriculteurs lors des débriefings collectifs.

Notons enfin que les deux groupes se différenciaient dans les pratiques et le niveau d'intensification. La convergence, entre les deux groupes, des résultats du test d'usage suggère que le principe de la méthode peut s'appliquer à différentes formes d'agriculture, au moins les deux rencontrées dans notre cas, l'agriculture conventionnelle et l'agriculture intégrée. Il serait intéressant de tester si le principe

de raisonnement pourrait être extrapolé à l'agriculture biologique (pour l'apport d'engrais organiques riches en azote), d'autant plus que le modèle Azodyn, utilisé pour construire les règles de décision, a déjà été adapté à l'agriculture biologique (David et al., 2004).

La manière dont les utilisateurs vont au premier abord percevoir et comprendre le prototype influence la manière dont ils vont utiliser l'outil. Les réunions de présentation du prototype doivent permettre aux testeurs de poser des questions sur le prototype et les modalités de mise en œuvre. Il est primordial qu'ils perçoivent les limites, ce qui n'est pas encore forcément stabilisé ou ce sur quoi on attend leur avis. Ce premier contact avec l'outil permet aussi de les familiariser avec le suivi qu'ils vont devoir mettre en place, de prendre conscience des enjeux autour de ce test et de s'appropriier les connaissances scientifiques sur lesquelles repose la méthode. C'est aussi l'opportunité pour les agriculteurs et le conseiller qui les accompagnera d'échanger, ce qui est favorable à créer une cohésion autour du groupe, importante pour la bonne réalisation du test.

3.4. Formalisation d'une démarche d'ingénierie, pour la mise en œuvre de la méthode dans des situations agronomiques diverses.

La procédure mise en œuvre avec Azodyn et la théorie de la viabilité est automatisable pour pouvoir dupliquer la construction des règles de décision sur une grande diversité de situations agronomiques. Pour passer de la preuve de concept, que constitue ce travail de thèse, à une mise en œuvre pratique de la méthode de fertilisation, plusieurs points seraient à mieux prendre en compte.

Premièrement, un travail sur les variables d'entrée pour décrire la situation agronomique pourrait améliorer la précision des règles de décision ; en particulier, la prise en compte de la biomasse. Les travaux sur la trajectoire d'INN minimum ouvrent sur la possibilité d'affiner les valeurs seuils, notamment en début de cycle, en intégrant l'information sur la biomasse (Chapitre 3). Une carence en début de cycle peut provoquer l'arrêt du tallage, et la régression de talles (Meynard, 1985 ; Lemaire & Gastal, 2009). Si, dans certaines situations, l'arrêt du tallage permet de se prémunir contre une accumulation de biomasse excédentaire (Alcoz et al., 1993 ; Sylvester-Bradley et al., 1997), dans des situations à faible biomasse, ce n'est pas souhaitable. On peut donc faire l'hypothèse que l'intensité de la carence tolérable varie selon l'état de biomasse du couvert. Sous cette hypothèse, on pourrait envisager de modifier les règles de décision, en remontant le niveau d'INN seuil, pour les couverts de faible biomasse. La mesure de la biomasse pourrait aussi alimenter les règles de décision à un autre niveau : la prédiction de l'INN à partir d'une mesure de la teneur en chlorophylle (Chapitre 5) semble en effet améliorable par la donnée de la biomasse. Dans le cadre de la thèse, prendre en compte la biomasse aurait cependant augmenté la complexité de notre problème. Cela aurait impliqué de démultiplier le nombre de simulations pour couvrir une large gamme de biomasse aux différents périodes du cycle de croissance. De plus, il était difficile de prévoir une mesure de biomasse (en plus de la mesure de l'INN) pour le test, nous avons donc pris le parti de conduire la conception en laissant de côté cette covariable. Maintenant que la procédure est clarifiée, rendant possible l'automatisation

des simulations et des traitements des sorties, il serait envisageable d'intégrer la biomasse comme variable d'entrée dans la mise en œuvre de la méthode de fertilisation, en vue d'améliorer sa précision. Restant que cela ne sera pertinent que si l'information est facilement accessible pour les utilisateurs tout au long du cycle. Ce qui serait envisageable avec les technologies existantes, comme la télédétection mobilisée dans l'outil Farmstar® par exemple (Coquil et al., 2005).

Une analyse de sensibilité des règles de décision à des variations de paramétrage serait également nécessaire. En effet, les résultats présentés dans les chapitres 2 et 4 ne portent que sur une région et une condition agronomique (sol, région, précédent), et pour le test d'usage, nous avons travaillé sur 2 régions mais avec un très petit nombre de situations agronomiques, caractérisée par les combinaisons de sol et de précédent cultural les plus courants. Analyser l'effet de la variabilité des types de sol ou du précédent cultural permettra de déterminer comment ces caractères doivent être pris en compte dans la formalisation des règles de décision.

Deuxièmement, les nouvelles questions qui se sont posées durant la conception, ont conduit à identifier certaines limites, pour l'utilisation d'Azodyn, tel qu'il est aujourd'hui. Certaines faiblesses ont été corrigées : le fait de prendre en compte, dans la conception, les conditions de valorisation de l'engrais nous a conduit à proposer des améliorations dans le modèle pour mieux prendre en compte les formes d'engrais et l'humidité du sol. Concernant les effets des carences, le modèle est basé sur les travaux de Jeuffroy et Bouchard (1999), dans lesquels il est proposé qu'au-delà d'un certain niveau d'ICDC (qui est le produit de l'intensité de la carence et de sa durée), il y a effectivement une perte de nombre de grains, et donc de rendement. Du fait des différences de formalisation des effets des carences entre le modèle et la trajectoire seuil, il est tout à fait possible que certaines carences temporaires aient eu un effet négatif sur les rendements simulés, alors que l'INN est resté au-dessus de la trajectoire minimum, dans une zone que nous supposons non préjudiciable au rendement. Une analyse fine de la comparaison entre les 2 formalismes serait nécessaire pour mieux apprécier les limites du travail réalisé. Cette question de l'amélioration du modèle induite par la conception amène une autre question plus transversale: notre démarche met en avant les indicateurs plante pour raisonner la fertilisation azotée, mais la construction de nos règles de décision s'appuie aussi sur la modélisation de l'azote du sol. Donc, bien que l'on inscrive notre méthode dans un nouveau paradigme qui ne repose pas sur l'analyse de sol pour estimer les doses d'engrais, nous devons garder en tête que l'amélioration de notre capacité à modéliser la fourniture en azote d'un sol cultivé sera un moyen d'améliorer la précision de notre méthode. On en revient au principe de base, le raisonnement de la fertilisation azotée reste dépendant des études relatives à l'azote du sol, mais la mise en œuvre du raisonnement de la fertilisation azotée est appelée à s'ouvrir à de nouveaux indicateurs.

Et finalement pour accompagner le développement de cette nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée, une validation au champ sera nécessaire. Les modalités de cette validation expérimentale et les critères d'évaluation devront être soigneusement pensés pour éviter, encore ici les

effets de fixation. Pour l'évaluation d'une nouvelle règle de décision, il est courant de mettre en place une expérimentation comparative de différentes règles de décision (Meynard et al, 1996). Dans le cadre de la méthode que nous proposons, nous pensons qu'une comparaison avec une mise en œuvre selon la méthode du bilan ne sera pas suffisante. Un protocole permettant de suivre les pertes à chaque apport pourrait être intéressant pour mesurer l'efficience atteignable avec la méthode proposée. Le protocole pourrait aussi être orienté sur le test de variantes des règles de décision pour en tester la robustesse.

3.5. Une production de connaissances originales directement liée à la conception.

La combinaison du diagnostic des usages, des ateliers participatifs, du prototypage assisté par modèle, ainsi que l'intégration des utilisateurs dans la conception, ont conduit à produire des connaissances originales. C'est le processus de conception qui a guidé l'expansion de l'espace des connaissances. Un des enjeux dans la conception d'outils d'aide à la décision est de passer des connaissances scientifiques à des connaissances actionnables, c'est-à-dire des connaissances qui permettent de décider des actions (McCown, 2001 ; Geetersman et al., 2016). Par exemple, en identifiant le besoin d'une connaissance de la trajectoire minimum de nutrition azotée tolérable, nous avons proposé une alternative à l'analyse courante des effets des carences en azote. Nous avons analysé des essais anciens, déjà exploités (par exemple : Jeuffroy & Bouchard, 1999) avec un regard nouveau et des objectifs différents, et produit une nouvelle connaissance, la trajectoire plancher de l'INN, qui permet d'interpréter un indicateur mesuré et de prendre une décision. La conception pose d'autres questions concernant la relation sol-plante-azote, et ouvre donc la voie à de nouvelles recherches sur les processus : par exemple l'amélioration d'Azodyn via l'affinement de la modélisation de la dynamique de l'azote dans le sol et des pertes gazeuses, ou l'influence de la biomasse du couvert sur la réponse à l'engrais. Les seuils à partir desquels on constate systématiquement des pertes devront être validés de manière expérimentale.

Concrètement, dans le projet, le travail sur l'espace U des utilisateurs (Cerf et al. 2012) « encadre » la phase d'exploration de nouveaux concepts, avec en amont un diagnostic des usages des méthodes et outils de raisonnement de la fertilisation azotée existants, et en aval le test d'un prototype en cours de conception, avec de potentiels futurs utilisateurs. On a ainsi produit des connaissances sur les difficultés de mise en œuvre de la méthode du bilan, mais également sur les processus décisionnels des agriculteurs (par exemple, sur l'anticipation des apports, liée à l'aversion au risque de sec). On a aussi produit des connaissances sur les effets de la réglementation, qui pourront être remobilisées directement dans des processus de conception de réglementation, relatives en particulier à la gestion de la fertilisation azotée, mais aussi pour des mesures agri-environnementales.

4. Quels enseignements pour la réglementation ?

Le raisonnement de la fertilisation azotée s'inscrit dans un cadre réglementaire. C'est d'ailleurs par là que nous avons démarré le projet. L'analyse des travaux des groupes régionaux d'expertise nitrates (GREN), qui n'était pas initialement prévue, s'est avérée être une source d'information très riche avec un caractère assez spécifique : les GREN ont fait un travail unique de concertation de l'ensemble des acteurs de la filière agricole et des pouvoirs publics sur la manière de raisonner la fertilisation azotée à l'échelle d'une région. De cette analyse, nous avons tiré des enseignements très utiles pour la démarche de conception. Il nous semble également intéressant d'ouvrir la discussion sur les modalités de l'action publique : choix d'une réglementation orientée sur la mise en œuvre d'une méthode de calcul des doses d'engrais, enseignements concernant la place de la nouvelle méthode dans un contexte très réglementé...

La réglementation concernant la gestion de la fertilisation azotée dans le cadre de la Directive Nitrates s'opère selon un schéma d'obligation de moyens. La méthode du bilan, munie des paramètres régionaux validés par les GREN, permet d'estimer les doses maximales qui doivent être épandues. De fait, les pouvoirs publics ont tout misé sur la manière d'estimer les différents termes de l'équation pour atteindre les objectifs de protection des eaux visés par la Directive Nitrates. A contrario, la réglementation ne met pas l'enjeu sur la manière de raisonner le fractionnement de l'engrais. Or, notre travail de conception d'une nouvelle méthode de raisonnement de la fertilisation azotée confirme que le choix des dates d'apports est déterminant pour concilier objectifs environnementaux et économiques. Dans le chapitre 4, nous montrons par exemple que, même avec une dose totale plus faible, le fait de ne pas ajuster les dates d'apports par rapport aux conditions spécifiques de l'année et à l'état du couvert peut engendrer des pertes d'azotes vers l'environnement non négligeables. Donc, à moins d'imposer aussi des dates d'apport, ce qui est inenvisageable d'un point de vue pratique, l'obligation de moyens portant sur les doses n'est pas une bonne solution pour réduire les fuites d'azote vers l'environnement.

De plus, nous l'avons vu dans le chapitre 1, le fait d'imposer la méthode du bilan comme un moyen de répondre aux exigences de la Directive Nitrates a des effets pervers non souhaités. Par exemple, nous avons mis en avant le risque de limiter la capacité d'innovation et la recherche de solutions alternatives pour répondre à ces enjeux de limitation des pertes d'engrais vers l'environnement. Mais cela a aussi pour effet de desservir la fonction d'outil de raisonnement qu'a la méthode du bilan. Alors que la méthode du bilan était jusqu'ici utilisée par les conseillers agricoles comme une entrée technique pour communiquer avec les agriculteurs sur les questions de gestion de la fertilisation azotée, la mise en œuvre réglementaire a fait glisser la fonction d'accompagnement vers une prestation de contrôle. La méthode du bilan n'est plus perçue comme un outil pour raisonner la fertilisation azotée mais comme un « carcan réglementaire » ; les conseillers utilisent le bilan avec les agriculteurs non plus pour les aider à raisonner la fertilisation azotée, mais pour s'assurer que la dose calculée par

l'agriculteur est juridiquement opposable. Durant les enquêtes avec les utilisateurs des méthodes et outils de raisonnement de la fertilisation azotée, certains témoignages déplorent avec une certaine amertume ce glissement d'un outil d'accompagnement vers un outil réglementaire « *On est rentré dans une démarche où on accompagne les agriculteurs par des prestations de contrôle de ce qu'ils ont fait. Ils ont tellement besoin d'être sécurisés par rapport au contrôle réglementaire qu'ils viennent demander la vérification de la cohérence de leurs cahier de fertilisation et de leur plan de fumure. Ce qui veut dire que, dans le face à face qu'on a avec eux, on n'est plus une interface de conseil, mais on est là pour regarder si tous les chiffres mis dans les cases sont cohérents par rapport à un certain nombre d'indicateurs. On fait du plan de fumure réglementaire et on n'a plus cette approche de conseil et d'accompagnement qu'on avait il y a 20-30 ans. C'est regrettable d'être entré dans ce type d'accompagnement* » (Coordinateur environnement, Chambre d'Agriculture Régionale de Bretagne).

Sachant que les mesures basées sur des obligations de moyens ont peu de chances d'entraîner des changements de pratiques agricoles et une amélioration de la qualité de l'eau (Kay et al., 2012), il est souhaitable que la nouvelle méthode que nous proposons ne soit pas perçue seulement comme un outil pour répondre aux exigences de la Directive Nitrates. Cela n'induirait pas l'effet escompté sur les pratiques agricoles et la réduction des pollutions d'origine agricole. Il ne s'agit pas d'utiliser la méthode seulement pour limiter les doses d'engrais, mais aussi pour repenser son rôle dans l'accompagnement des changements de pratiques agricoles, en vue d'atteindre les résultats souhaités en terme de protection des eaux. Elle doit être reçue comme un moyen pour chaque utilisateur d'apprendre, dans sa propre situation, comment limiter les pertes d'engrais.

On sait que les réglementations basées sur des obligations de résultats permettent de donner plus de flexibilité aux agriculteurs dans le choix des technologies, des outils et des pratiques qu'ils peuvent mettre en œuvre (Schwarz et al., 2008 ; Ravier et al., 2015) et de valoriser les connaissances qu'ont les agriculteurs de leur propre exploitation (Hasund, 2013) permettant la mise en œuvre des pratiques adaptées à leurs situations (Sabatier et al., 2012 ; Burton and Schwarz, 2013). Basés sur l'obligation d'atteindre un résultat, indépendamment des pratiques mises en œuvre pour y arriver, de tels schèmes ont prouvé leur efficacité pour atteindre des performances écologiques et environnementales souhaitées (Matzdorf & Lorenz, 2010 ; Sabatier et al., 2012 ; de Sainte Marie, 2014). De plus, ces mesures encouragent les agriculteurs à innover, à mobiliser leurs connaissances et leurs savoir-faire pour atteindre ces objectifs ainsi qu'à rechercher de nouvelles connaissances et compétences (Burton & Schwarz, 2013). De telles mesures réglementaires peuvent conduire à des changements de pratiques durables, que l'agriculteur maîtrise parce qu'il a construit et adapté ses connaissances pour les mettre en œuvre et les améliorer. L'enjeu autour de la limitation des externalités négatives de l'agriculture serait donc de passer du formalisme réglementaire actuel, basé sur des obligations de moyens dont l'efficacité pour améliorer la qualité de l'eau est discutée (Barnes et al., 2009 ; Howarth, 2011), à des réglementations d'obligation de résultats qui permettent de concilier les bonnes conditions pour opérer

des changements de pratiques (de Sainte Marie, 2014; Burton & Schwarz, 2013). Nous avons montré dans les chapitres 3 et 4 que la méthode explorée avait le potentiel de réduire les pertes vers l'environnement en favorisant un raisonnement en temps réel pour positionner les apports dans des conditions optimales de valorisation ; le test d'usage présenté dans le chapitre 2 a également montré qu'elle avait le potentiel de favoriser les apprentissages. Elle pourrait donc être très utile dans des démarches de changement de pratiques, collectives ou individuelles, visant à limiter les effets négatifs des pratiques de fertilisation sur l'environnement. On peut donc souhaiter que l'émergence de cette nouvelle méthode soit l'occasion de déclencher une réflexion autour d'une réglementation d'obligation de résultat pour la gestion de la fertilisation azotée.

Conclusion générale

Ce travail visait à proposer une méthode de raisonnement de la fertilisation azotée innovante, qui réponde aux évolutions des contextes socio-économique et environnemental, en valorisant un panel de connaissances plus large que le bilan, et en intégrant son usage dès le début de la conception. La méthode que nous proposons s'appuie sur des connaissances existantes, comme la notion de carence temporaire, le suivi de l'état de nutrition azotée avec des outils de pilotage ou encore la modélisation de la fourniture en azote du sol, pour certaines mal valorisées dans le paradigme actuel. Elle repose sur des principes innovants, qui proposent une rupture complète avec le modèle de raisonnement standard : favoriser des trajectoires avec des périodes (non préjudiciables à la production) de carence en azote, qui permettent de maximiser l'efficacité des apports mais aussi de s'affranchir des analyses de sol ; piloter la fertilisation dès les stades précoces ; ne pas calculer de dose totale a priori mais plutôt s'appuyer sur l'interprétation de l'état de nutrition azotée via des règles de décision dynamiques pour décider, en temps réel des dates et des doses d'apport. Le test d'usage de cette méthode innovante a montré qu'elle était adaptée au raisonnement des agriculteurs, leur permettant de modifier leurs pratiques, tout en suivant en temps réel les conséquences de cette modification, et de construire leurs apprentissages pour mieux adapter la fertilisation azotée à leur contexte agronomique. Les règles de décision construites pour la mise en œuvre de la méthode proposent une manière de prendre en compte les risques environnementaux, en cherchant un compromis entre des enjeux économiques et environnementaux, ce qui est une réelle avancée par rapport au modèle de raisonnement actuel, qui tend à privilégier le risque de pertes de rendement au dépend du risque de fuites d'azote.

L'énorme investissement fait pour développer, améliorer et diffuser la méthode du bilan auprès du monde agricole a permis d'acquérir un niveau de technicité et une maîtrise considérable de la méthode, partagée par l'ensemble des acteurs de la filière. Dans ce contexte, on peut souligner la difficulté de changer le mode de raisonnement de tous les acteurs, et pas seulement les agriculteurs : depuis les conseillers qui devront s'approprier les démarches de réalisation et d'interprétation de diagnostics de nutrition azotée, jusqu'aux pouvoirs publics qui trouvent commode d'utiliser le bilan comme outil réglementaire.

La nouvelle méthode de fertilisation azotée, dont nous avons posé les bases par ce travail de thèse, a été conçue en cohérence avec les activités des agriculteurs. Elle est en phase avec les progrès agronomiques de ces dernières années et s'appuie sur des outils de mesure d'indicateurs plante, de mieux en mieux maîtrisés et de plus en plus prisés par le secteur agricole. Elle s'inscrit dans une démarche de développement d'agriculture dite numérique, appuyée sur la mesure d'indicateur plante, répétée au moyen de capteurs, permettant ainsi d'aller jusqu'à la modulation des doses d'engrais à l'échelle intraparcellaires. La méthode pourra largement bénéficier de tous les acquis sur la méthode

du bilan puisque le calcul des doses d'engrais à appliquer résulte de la dynamisation des postes de fournitures en azote du sol.

Nous avons vu que ses possibilités d'utilisation restaient diverses, avec des propositions laissant plus ou moins d'autonomie aux décideurs. Pour les acteurs de la fertilisation azotée, les prochaines étapes consisteront à élaborer, en routine, des règles de décision pour une diversité de situations agronomiques, à valider les performances atteignables avec cette nouvelle méthode ainsi que les principes sur lesquels la méthode repose, notamment la trajectoire de nutrition azotée minimum et la mise en œuvre des règles de décision, puis à valoriser les principes de raisonnement à d'autres cultures. Pour les acteurs de la recherche agronomique, la démarche de conception mobilisée dans cette thèse pourra être mise en œuvre pour explorer des solutions alternatives sur d'autres thématiques que la fertilisation, en particulier lorsqu'existe un antagonisme analogue entre objectifs économiques et environnementaux, comme par exemple la réduction des produits phytosanitaires ou dans des approches multi-acteurs comme la coexistences de filières ou la construction de programmes d'action à l'échelle d'un territoire.

Références

- Abbate, P.E., Andrade, F.H., Culot, J.P., 1995. The effect of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *The Journal of Agricultural Science* 124 (3), 351-360. <http://dx.doi.org/10.1017/S0021859600073317>
- Accatino, F., Sabatier, R., De Michele, C., Ward, D., Wiegand, K., Meyer, K.M., 2014. Robustness and management adaptability in tropical rangelands: a viability-based assessment under the non-equilibrium paradigm. *Animal* 8, 1272–1281.
- Akaike, H. (1973) Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. *Proceedings of the Second International Symposium on Information Theory* (eds Petrov, B.N. and Csaki, F.), Akademiai Kiado, Budapest, 267–281.
- Agogué M., Arnoux, F., Brown, I., Hooge, S., 2013. Introduction à la conception innovante: éléments théoriques et pratiques de la théorie C-K, 2013. . Presses des Mines-Transvalor, Paris. 58 p.
- Agogué, M., Hooge, S., 2014. Conception, Recherche, Innovation. Centre de Gestion Scientifique, Mines Paris Tech, 24-28 Mars, 2014.
- Alcoz, M.M., Hons, F.M., Haby, V.A., 1993. Nitrogen fertilization timing effect on wheat production, nitrogen uptake efficiency, and residual soil nitrogen. *Agronomy Journal* 85, 1198–1203. doi:10.2134/agronj1993.00021962008500060020x
- Anderson, D.R., Burnham, K.P., 2002. Avoiding Pitfalls When Using Information-Theoretic Methods. *The Journal of Wildlife Management* 66, 912. doi:10.2307/3803155
- Arregui, L.M., Merina, M., Iraneta, I., Lafarga, A., Baroja, E., Quemada, M., 2002. Use of a chlorophyll meter to predict sidedress nitrogen requirement of winter cereals. VII congress of the European Society for Agronomy, Cordoba, Spain, 15-18 July 2002, 663-668
- Arregui, L.M., Lasa, B., Lafarga, A., Irañeta, I., Baroja, E., Quemada, M., 2006. Evaluation of chlorophyll meters as tools for N fertilization in winter wheat under humid Mediterranean conditions. *European Journal of Agronomy* 24, 140–148. doi:10.1016/j.eja.2005.05.005
- Arvalis, Institut du végétal, 2013. Plan protéines : Remonter le niveau des protéines des blé français. Améliorer la fertilisation des céréales. 161 p.
- Arvalis, Institut du végétal, 2015. Besoins unitaires, ou coefficients b, variétaux sur blé tendre, hors variétés améliorantes. Consulté le 5/12/2016. https://www.arvalis-infos.fr/les-besoins-unitaires-en-azote-des-varietes-de-ble-tendre-reactualises-pour-2016-@/file/galleryelement/pj/98/5d/a0/f9/varietes_coeff_b_bth_2016_diffusion5061196532697608991.pdf
- Arvalis, Institut du végétal, 2016. Produire plus et mieux. Les vrai-faux de la fertilisation azotée du blé. Arvalis (Ed), 2016.
- Aubin J-P. 1991. Viability Theory. Birkhäuser Boston, Boston. Available from <http://link.springer.com/10.1007/978-0-8176-4910-4> (accessed December 4, 2015).
- Aubry, C., Papy, F., Capillon, A., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56, 45–65. doi:10.1016/S0308-521X(97)00034-6
- Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., Jeuffroy, M.-H., 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat. *Crop Science* 45, 1141-1150. doi:10.2135/cropsci2003.0361
- Barnes, A.P., Willock, J., Hall, C., Toma, L., 2009. Farmer perspectives and practices regarding water pollution control programmes in Scotland. *Agricultural Water Management* 96, 1715–1722. doi:10.1016/j.agwat.2009.07.002
- Bavec, F., Bavec, M., 2001. Chlorophyll meter readings of winter wheat cultivars and grain yield prediction. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 2709–2719. doi:10.1081/CSS-120000956
- Beaudoin, N., Saad, J.K., Van Laethem, C., Machet, J.M., Maucorps, J., Mary, B., 2005. Nitrate leaching in intensive agriculture in Northern France: Effect of farming practices, soils and crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 111, 292–310. doi:10.1016/j.agee.2005.06.006
- Béguin, P., 2003. Design as a mutual learning process between users and designers. *Interacting with Computers* 15, 709–730. doi:10.1016/S0953-5438(03)00060-2

- Bellocchi, G., Donatelli, M., Monotti, M., Carnevali, G., Corbellini, M., Scudellari, D., 2006. Balance sheet method assessment for nitrogen fertilization in winter wheat: II. alternative strategies using the CropSyst simulation model. *Italian Journal of Agronomy* 1, 343. doi:10.4081/ija.2006.343
- Bergez, J.E., Colbach, N., Crespo, O., Garcia, F., Jeuffroy, M.H., Justes, E., Loyce, C., Munier-Jolain, N., Sadok, W., 2010. Designing crop management systems by simulation. *European Journal of Agronomy* 32, 3–9. doi:10.1016/j.eja.2009.06.001
- Bergez J.E., Chabrier P., Gary C., Jeuffroy M.H., Makowski D., Quesnel G., Ramat E., Raynal H., Rousse N., Wallach D., Debaeke P., Duru M., Dury J., Faverdin P., Gascuel-Odoux C., Garcia F., 2013. An open platform to build, evaluate and stimulate integrated models of farming and agro-ecosystems. *Environmental Modelling and Software* 39 (1), 39-49.
- Berthet, E., 2013. Contribution à une théorie de la conception des agro-écosystèmes. Fonds écologique et inconuu commun. Thèse de doctorat, MinesParisTech, 256 p.
- Berthet, E.T.A., Barnaud, C., Girard, N., Labatut, J., Martin, G., 2016. How to foster agroecological innovations? A comparison of participatory design methods. *Journal of Environmental Planning and Management* 59, 280–301. doi:10.1080/09640568.2015.1009627
- Billen G., Garnier J., Benoît M., Anglade J., 2013. La cascade de l'azote dans les territoires de grande culture du Nord de la France. *Cahiers Agricultures* 22, 272-281.
- Blanchet, A., 1991. Dire et faire dire, l'entretien. Armand Colin (Ed), Paris, 173 p.
- Blanchet, A., Gotman, A., 2001. L'enquête et ses méthodes: l'entretien. Collection Sociologie Nathan Université, pp 115.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Keichinger, O., Girardin, P., Galan, M.-B., Gaillard, G., 2008. Comparison of methods to assess the sustainability of agricultural systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 223–235. doi:10.1051/agro:2008058
- Boiffin, J., Caneill, J., Meynard, J.M., Sebillotte, M., 1981. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse I. –Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional. *Agronomie*, 1 (7), 549-558.
- Borghi, B., Corbellini, M., Minoia, C., Palumbo, M., Di Fonzo, N., Perenzin, M., 1997. Effects of Mediterranean climate on wheat bread-making quality. *European Journal of Agronomy* 6, 145–154. doi:10.1016/S1161-0301(96)02040-0
- Bouchard, C., Laurent, F., Guérin, O., Jeuffroy, M.H., 2006. Une décoloration indique un apport azoté nécessaire, mais pas urgent. *Perspectives agricoles*, 319, 8-13.
- Bouma, J., 2008. In: Discussion of Schröder, J.J., Neeteson, J.J., 2008. Nutrient management regulations in The Netherlands (with Discussion). *Geoderma* 144, 418-425. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.12.010
- Bouma, J., van Altvorst, A. C., Eweg, R., P. J. A. M. Smeets, P.J.A.M., van Latesteijn H.C., 2011. The Role of Knowledge When Studying Innovation and the Associated Wicked Sustainability Problems in Agriculture. *Advances in Agronomy* 113, 285-315
- Bouma, J., 2016. The importance of validated ecological indicators for manure regulations in the Netherlands. *Ecological Indicators* 66, 301–305. doi:10.1016/j.ecolind.2016.01.050
- Bouman, B.A.M., van Keulen, H., van Laar, H.H., Rabbinge, R., 1996. The “School of de Wit” crop growth simulation models: A pedigree and historical overview. *Agricultural Systems* 52, 171–198. doi:10.1016/0308-521X(96)00011-X
- Brisson, N., Bruno, M., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Baret, F., Antonioletto, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delécolle, R., 1998. STICS : a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie* 18, 311-346.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi re, F., Cabidoche, Y., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudill re, J., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy* 18, 309–332. doi:10.1016/S1161-0301(02)00110-7

- Brisson, N., Gate, P., Gouache, D., Charmet, G., Oury, F.-X., Huard, F., 2010. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France. *Field Crops Research* 119, 201–212. doi:10.1016/j.fcr.2010.07.012
- Buckley, C., Carney, P., 2013. The potential to reduce the risk of diffuse pollution from agriculture while improving economic performance at farm level. *Environmental Science & Policy* 25, 118–126. doi:10.1016/j.envsci.2012.10.002
- Burnham, K.P., 2004. Multimodel Inference: Understanding AIC and BIC in Model Selection. *Sociological Methods & Research* 33, 261–304. doi:10.1177/0049124104268644
- Burton, R.J.F., Schwarz, G., 2013. Result-oriented agri-environmental schemes in Europe and their potential for promoting behavioural change. *Land Use Policy* 30, 628–641. doi:10.1016/j.landusepol.2012.05.002
- Byerlee, D., Triomphe, B., Sebillotte, M., 1991. Integrating Agronomic and Economic Perspectives into the Diagnostic Stage of On-farm Research. *Experimental Agriculture* 27, 95. doi:10.1017/S0014479700018767
- Cacho, O.J., Bywater, A.C., Dillon, J.J., 1999. Assessment of production risk in grazing models. *Agricultural Systems*, 60, 87–98.
- Campbell, C.A., Myers, R.J.K., Curtin, D., 1995. Managing nitrogen for sustainable crop production. *Fertilizer research* 42, 277–296.
- Carlotti, B., Mission Eau-Nitrates, CORPEN, 1992. Recueil des bases de préconisations de la fertilisation des cultures. Ministère de l'Environnement (Ed), Paris (France) 136 p.
- Cartelat, A., Cerovic, Z.G., Goulas, Y., Meyer, S., Lelarge, C., Prioul, J.-L., Barbottin, A., Jeuffroy, M.-H., Gate, P., Agati, G., Moya, I., 2005. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Field Crops Research* 91, 35–49. doi:10.1016/j.fcr.2004.05.002
- Cassman, K.G., Dobermann, A., Walters, D.T., 2002. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. *AMBIO: A Journal of the Human Environment* 31, 132–140.
- Cellier, P., Rochette, P., Hénault, C., Genermont, S., Laville, P., Loubet, B., 2013. Gaseous emissions at different space scales in the nitrogen cycle: A review. *Cahiers Agricultures* 22, 258–271.
- Cerf, M., Meynard, J.M., 1988. Enquête sur la mise en œuvre des méthodes de fertilisation raisonnée. *Comifer-Gemas* (3), 5–12.
- Cerf, M., 1996. Approche cognitive de pratiques agricoles : intérêts et limites pour les agronomes. *Nature Sciences Sociétés*, 4 (4), 327–340.
- Cerf, M., Meynard, J.M., 2006. Les outils de pilotage des cultures : diversité de leurs usages et enseignements pour leur conception. *Natures Sciences Sociétés* 14, 19–29. doi:10.1051/nss:2006004
- Cerf, M., Jeuffroy, M.H., Prost, L., Meynard, J.M., 2012. Participatory design of agricultural decision support tools: taking account of the use situations. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 899–910. doi:10.1007/s13593-012-0091-z
- Chantre, E., Guichard, L., Ballot, R., Jacquet, F., Jeuffroy, M.-H., Prigent, C., Barzman, M., 2016. Co-click'eau, a participatory method for land-use scenarios in water catchments. *Land Use Policy* 59, 260–271. doi:10.1016/j.landusepol.2016.09.001
- Cohan, J.P., Bouthier, A., 2010. Engrais Azoté, pluie après l'apport: une facteur d'efficacité déterminant. *Perspectives Agricoles*, 364, 38–39.
- Coïc, Y., 1956. La nutrition et la fertilisation azotée du blé d'hiver. I. Les besoins en azote du blé d'hiver, conséquences agronomiques. *Annales Agronomiques* 5, 115–131.
- Coïc, Y., 1974. Engrais, environnement et production. *Nuisances et Environnement*, Aout/Septembre, 41–46.
- Colnenne, C., Meynard, J.M., Roche, R., Reau, R., 2002. Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape. *European journal of agronomy* 17, 11–28.
- COMIFER, 2013. Calcul de la fertilization azote. Guide méthodologique pour l'établissement des prescriptions locales. Cultures annuelles et prairies. http://www.comifer.asso.fr/images/stories/publications/brochures/BROCHURE_AZOTE_20130705web.pdf

- Confalonieri, R., Paleari, L., Movedi, E., Pagani, V., Orlando, F., Foi, M., Barbieri, M., Pesenti, M., Cairati, O., La Sala, M.S., Besana, R., Minoli, S., Bellocchio, E., Croci, S., Mocchi, S., Lampugnani, F., Lubatti, A., Quarteroni, A., De Min, D., Signorelli, A., Ferri, A., Ruggeri, G., Locatelli, S., Bertoglio, M., Dominoni, P., Bocchi, S., Sacchi, G.A., Acutis, M., 2015. Improving in vivo plant nitrogen content estimates from digital images: Trueness and precision of a new approach as compared to other methods and commercial devices. *Biosystems Engineering* 135, 21–30. doi:10.1016/j.biosystemseng.2015.04.013
- Coquil, B., Bordes, J. P., Stafford, J. V., 2005. FARMSTAR: an efficient decision support tool for near real time crop management from satellite images. *Precision agriculture*, 5, 873-880.
- Crews, T.E., Peoples, M.B., 2005. Can the Synchrony of Nitrogen Supply and Crop Demand be Improved in Legume and Fertilizer-based Agroecosystems? A Review. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 72, 101–120. doi:10.1007/s10705-004-6480-1
- Crook, M.J., Ennos, A.R., 1995. The effect of nitrogen and growth regulators on stem and root characteristics associated with lodging in two cultivars of winter wheat. *Journal of Experimental Botany* 46, 931–938. doi:10.1093/jxb/46.8.931
- David, C., Jeuffroy, M.-H., Recous, S., Dorsainvil, F., 2004. Adaptation and assessment of the Azodyn model for managing the nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* 21, 249–266. doi:10.1016/j.eja.2003.09.003
- De Sainte Marie, C., 2014. Rethinking agri-environmental schemes. A result-oriented approach to the management of species-rich grasslands in France. *Journal of Environmental Planning and Management* 57, 704–719. doi:10.1080/09640568.2013.763772
- Debaeke, P., Rouet, P., Justes, E., 2006. Relationship Between the Normalized SPAD Index and the Nitrogen Nutrition Index: Application to Durum Wheat. *Journal of Plant Nutrition* 29, 75–92. doi:10.1080/01904160500416471
- Delcour, D., Balny, P., Rathouis, P., Guillet, M., Roussel, F., 2013. Plan d'action relatif à une meilleure utilisation de l'azote en agriculture. Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt.
- Delgado, J.A., Ristau, R.J., Dillon, M.A., Duke, H.R., Stuebe, A., Follett, R.F., Shaffer, M.J., Riggensbach, R.R., Sparks, R.T., Thompson, A., Kawanabe, L.M., Kunugi, A., Thompson, K., 2001. Use of innovative tools to increase nitrogen use efficiency and protect environmental quality in crop rotations. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, 1321–1354. doi:10.1081/CSS-100104115
- Demotes-Mainard, S., Jeuffroy, M.-H., 2004. Effects of nitrogen and radiation on dry matter and nitrogen accumulation in the spike of winter wheat. *Field Crops Research* 87, 221–233. doi:10.1016/j.fcr.2003.11.014
- Douville, H., Terray, P., 2010. Réponse du cycle hydrologique aux forçages anthropiques, in : Braconnot, P., Dufresne, J.L., Salas y melia, D., Terray, L., Analyse et modélisation du changement climatique, 2ème édition du Livre Blanc Escrire, 51-58.
- Doré, T., Sebillotte, M., Meynard, J.M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agricultural Systems* 54, 169–188. doi:10.1016/S0308-521X(96)00084-4
- Doyen L, De Lara M. 2010. Stochastic viability and dynamic programming. *Systems & Control Letters* 59:629–634.
- Eitel, J.U.H., Magney, T.S., Vierling, L.A., Brown, T.T., Huggins, D.R., 2014. LiDAR based biomass and crop nitrogen estimates for rapid, non-destructive assessment of wheat nitrogen status. *Field Crops Research* 159, 21–32. doi:10.1016/j.fcr.2014.01.008
- Elmqvist, M., Segrestin, B., 2009. Sustainable development through innovative design: lessons from the KCP method experimented with an automotive firm. *International Journal of Automotive Technology and Management* 9, 229. doi:10.1504/IJATM.2009.026399
- Felix, I., Reau, R., 1995. Pratiques de fertilisation : un constat paradoxal. *Perspectives agricoles* 207, 74-85.
- Ferguson, R.B., Gotway, C.A., Hergert, G.W., Peterson, T.A., 1996. Soil Sampling for Site-Specific Nitrogen Management. *Precision Agriculture*, 13-22. doi:10.2134/1996.precisionagproc3.c2
- Fluss, R., Faraggi, D., Reiser, B., 2005. Estimation of the Youden index and its associated cutoff point. *Biometrical Journal* 47, 458–472. doi:10.1002/bimj.200410135
- Follett, R.H., Follett, R.F., Halvorson, A.D., 1992. Use of a chlorophyll meter to evaluate the nitrogen status of dryland winter wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23, 687–697. doi:10.1080/00103629209368619

- Foulkes, M.J., Hawkesford, M.J., Barraclough, P.B., Holdsworth, M.J., Kerr, S., Kightley, S., Shewry, P.R., 2009. Identifying traits to improve the nitrogen economy of wheat: Recent advances and future prospects. *Field Crops Research* 114, 329–342. doi:10.1016/j.fcr.2009.09.005
- Fox, R.H., Piekielek, W.P., Macneal, K.M., 1994. Using a chlorophyll meter to predict nitrogen fertilizer needs of winter wheat. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 25, 171–181. doi:10.1080/00103629409369027
- Franzen, D.W., Cihacek, L.J., Hofman, V.L., 1996. Variability of soil Nitrate and Phosphate under different landscapes. *Precision Agriculture*, 521-529. doi:10.2134/1996.precisionagproc3.c56
- Fujisaka, S., 1994. Learning from six reasons why farmers do not adopt innovations intended to improve sustainability of upland agriculture. *Agricultural Systems* 46, 409–425. doi:10.1016/0308-521X(94)90104-N
- Gate, P., 1998. Blé : des modèles pour prévoir le rendement. *Perspectives agricoles*, 178, 56-58
- Geertsema, W., Rossing, W.A., Landis, D.A., Bianchi, F.J., van Rijn, P.C., Schaminée, J.H., Tschardtke, T., van der Werf, W., 2016. Actionable knowledge for ecological intensification of agriculture. *Frontiers in Ecology and the Environment* 14, 209–216. doi:10.1002/fee.1258
- Générmont, S., Cellier, P., 1998. Using a mechanistic model for evaluating ammonia emissions abatement techniques after organic fertilization, in : *Proceeding of the 8th International Conference of the FAO ESCORENA Network on recycling of Agricultural, Municipal and Industrial residues in Agriculture*, Rennes, France, 333-343.
- Giller, T., Piat, G., Roussel, B., Truchot, P., 2010. Managing innovation fields in a cross industry exploratory partnership with C-K design theory. *Journal of product innovation management*, 27 (6), 883-896.
- Goos, R.J., Prunty, L., 1990. Yield variability and the yield goal decision, in: J.L. Havlin (Eds), *Proceedings of the Great Plain Soil Fertility Conference*. Denver, CO, March 6-7, 1990, Kansas, State University, Manhattan, 187-189.
- Hasund, K.P., 2013. Indicator-based agri-environmental payments: A payment-by-result model for public goods with a Swedish application. *Land Use Policy* 30, 223–233. doi:10.1016/j.landusepol.2012.03.011
- Hatchuel, A., Weil, B., 2002. La théorie C-K : fondements et usages d’une théorie unifiée de la conception. *Colloque Sciences de la conception*, Lyon 15-16 Mars, 2002. 24p.
- Hatchuel, A., Weil, B., 2009. C-K design theory: an advanced formulation. *Research in Engineering Design* 19, 181–192. doi:10.1007/s00163-008-0043-4
- Hatchuel, A., Le Masson, P., Weil, B., 2009. Design theory and collective creativity : a theoretical framework to evaluate KCP process. *International conference on engineering design, ICED’09*, August 2009, Stanford University, Stanford, CA, USA, 277-288
- Hébert, J.C., 1969. La fumure azotée du blé. *Bulletin technique d’information*. 244, 755-766.
- Hébert, J.C., 1976. Pour obtenir des hauts rendements, connaître la physiologie du blé. *Fermes modernes*, n° hors série, le blé, céréale d’avenir, 83-88.
- Hébrard, J.P., 1999. Outils de pilotage. *Perspectives Agricoles*, 244, 88-89.
- Hénin, S., 1980. Rapport du groupe de travail “Activités agricoles et qualité des eaux”, Ministère de l’agriculture (1974-1988), Ministère de l’environnement et du cadre de vie. (Eds), 294 p.
- Hoel, B.O., 1998. Use of a hand-held chlorophyll meter in winter wheat: Evaluation of different measuring positions on the leaves. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B - Soil & Plant Science* 48, 222–228. doi:10.1080/09064719809362502
- Hoel, B.O., 2002. Chlorophyll Meter Readings in Winter Wheat: Cultivar Differences and Prediction of Grain Protein Content. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 52, 147–157. doi:10.1080/090647103100004843
- Hooge, S., Agogué, L., Gillier, T., 2012. A new methodology for advanced engineering design : lessons from experimenting C-K theory driven tools. *International design conference – Design 2012*, Dubrovnik, Croatia, May 21-24, 2012.
- Hooge, S., Béjean, M., Arnoux, F., 2016. Organisation for radical innovation: the benefits of the interplay between cognitive and organisational processes in KCP workshops. *International Journal of Innovation Management* 20, 1640004. doi:10.1142/S1363919616400041

- Horwitz, W., Senzel, A., Reynolds, H., Park, D.L. (Eds) 1975. *Official Methods of Analysis*, 12th ed. AOAC, Washington DC.
- Houlès, V., Guérif, M., Mary, B., 2007. Elaboration of a nitrogen nutrition indicator for winter wheat based on leaf area index and chlorophyll content for making nitrogen recommendations. *European Journal of Agronomy* 27, 1–11. doi:10.1016/j.eja.2006.10.001
- Houot, S., Pons, M.N., Pradel, M., Savini, I., Tibi, A., 2014. Valorisation des matières fertilisantes d'origine résiduaire sur les sols à usage agricole ou forestier. Impacts agronomiques, environnementaux, socio-économiques. Synthèse de l'expertise scientifique collective. 108p.
- Howarth, W., 2011. Diffuse water pollution and diffuse environmental laws tackling diffuse water pollution in England, Report by the Comptroller and Auditor General, HC 186 Session 2010–2011, 6 July 2010. *J. Environ. Law* 23, 129–141.
- Hughes, G., McRoberts, N., Burnett, F.J., 1999. Decision-making and diagnosis in disease management. *Plant Pathology* 48, 147–153. DOI: 10.1046/j.1365-3059.1999.00327.x
- Institut de l'élevage, ITAVI, ITCF, ITP, 2001. Fertiliser avec les engrais de ferme. 201 p.
- ITCF 1978. La fertilisation azotée du blé. Institut Technique des Céréales et Fourrages, 28p.
- Jeuffroy, M.H., Meynard, J.M., Sevat, B., 1987. Identification des obstacles à la mise en œuvre des méthodes de fertilisation vulgarisée : une enquête réalisée par le COMIFER avec les lycées agricoles. *Bulletin Technique d'Information*, 420, 241-245.
- Jeuffroy M.H., Meynard J.M., 1997. Azote: production agricole et environnement, in : Morot-Gaudry J.F. (Ed.), *Assimilation de l'azote chez les plantes, aspects physiologiques, biochimique et moléculaire*, pp. 369-380.
- Jeuffroy, M.H., Bouchard, C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Science* 39, 1385-1393. doi:10.2135/cropsci1999.3951385x
- Jeuffroy, M.H., Recous, S., 1999. Azodyn: a simple model simulating the date of nitrogen deficiency for decision support in wheat fertilization. *European journal of Agronomy* 10, 129–144.
- Jeuffroy, M.H., Bouchard, C., Meynard, J.M., Recous, S., 2001. AZODYN : a tool to adapt N-Fertilization strategies to farmers' objectives, in : *Proceeding of the 11th N-Workshop*, Reims, 465-466.
- Jeuffroy, M.H., Ney, B., Ourry, A., 2002. Integrated physiological and agronomic modelling of N capture and use within the plant. *J. Exp. Bot.* 53, 809–823.
- Jeuffroy, M.H., Gate, P., Machet, J.M., Recous, S., 2013. Gestion de l'azote en grandes cultures : les connaissances et outils disponibles permettent-ils de concilier exigences agronomiques et environnementales ? *Cahiers Agricultures*, 22 (4), 249-257.
- Justes, E., 1993. Diagnostic de la nutrition azotée du blé à partir de la teneur en nitrate de la base de la tige. Application au raisonnement de la fertilisation azotée. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.-M., Machet, J.-M., Thelier-Huché, L., 1994. Determination of a critical nitrogen dilution curve for winter wheat crops. *Annals of Botany*, 74, 397-407. doi: 10.1006/anbo.1994.1133
- Justes, E., Meynard, J.M., Mary, B., Plénet, D., 1997a. Diagnosis using stem base extract: Jubil Method, in: Lemaire, G. (Ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in crops*. Springer, Berlin, 73-92.
- Justes, E., Jeuffroy, M.-H., Mary, B., 1997b. Wheat, Barley and Durum Wheat, in: Lemaire, G. (Ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in crops*. Springer, Berlin, 73-92.
- Jones, C., Brown, B.D., Engel, R., Horneck, D., Olson-Rutz, K., 2013. Management to minimize nitrogen fertilizer volatilization, Montana State University Extension, 4p.
- Kay, P., Grayson, R., Phillips, M., Stanley, K., Dodsworth, A., Hanson, A., Walker, A., Foulger, M., McDonnell, I., Taylor, S., 2012. The effectiveness of agricultural stewardship for improving water quality at the catchment scale: Experiences from an NVZ and ECSFDI watershed. *Journal of Hydrology* 422-423, 10–16. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.12.005
- Kissel, D.E., Cabrera, M.L., Vaio, N., Craig, J.R., Rema, J.A., Morris, L.A., 2004. Rainfall Timing and Ammonia Loss from Urea in a Loblolly Pine Plantation. *Soil Science Society of America Journal* 68, 1744. doi:10.2136/sssaj2004.1744

- Kusunose, Y., Mahmood, R., 2016. Imperfect forecasts and decision making in agriculture. *Agricultural Systems* 146, 103–110. doi:10.1016/j.agsy.2016.04.006
- Kuha, J., 2004. AIC and BIC: Comparisons of Assumptions and Performance. *Sociological Methods & Research* 33, 188–229. doi:10.1177/0049124103262065
- Ladha, J.K., Pathak, H., Krupnik, T.J., Six, J., van Kessel, C., 2005. Efficiency of fertilizer nitrogen in cereal production: Retrospects and prospects. *Advances in Agronomy* 87, 85-156. doi:10.1016/S0065-2113(05)87003-8
- Lanquetuit D., Sebillotte M., 1997. Protection de l’eai. Le guide Ferti-Mieux pour évaluer les modifications de pratiques des agriculteurs. Anda, Paris, 179p.
- Laurent, F.; Castillon, P., 1987. Le reliquat azoté sortie hiver. *Perspectives Agricoles*, 115: 47-57.
- Laurent F., Makowski D., 2007. Quels sont les effets du prix du blé et de l’engrais azote? *Perspectives Agricoles*, 339, 46-50.
- Le Bail, M., Jeuffroy, M.-H., Bouchard, C., Barbottin, A., 2005. Is it possible to forecast the grain quality and yield of different varieties of winter wheat from Minolta SPAD meter measurements? *European Journal of Agronomy* 23, 379–391. doi:10.1016/j.eja.2005.02.003
- Le Gall, 1997. Evaluation et amélioration du logiciel PC Azote en Champagne Berrichone. Mémoire Mastère Ingénierie Agronomique, INA-PG, 90p.
- Le Gouis, J., Béghin, D., Heumez, E., Pluchard, P., 2000. Genetic differences for nitrogen uptake and nitrogen utilisation efficiencies in winter wheat. *European Journal of Agronomy* 12, 163–173. doi:10.1016/S1161-0301(00)00045-9
- Le Masson, P., Weil, B., Hatchuel, A., 2006. Les processus d’innovation: conception innovante et croissance des entreprises, Collection Stratégie et management. Hermes science publications 471 p.
- Le Masson, P., Hatchuel, A., Weil, B., 2007. The emergence of innovation field management in companies : from NPD to new design strategies. *European Academy of management*, Paris, 28-31 August.
- Le Masson, P., Hatchuel, A., Weil, B., 2011. The interplay between creativity issues and design theories: A new perspective for design management studies? *Creativity and Innovation management*, 20(4):217-237.
- Lecomte, C., 2005. L’évaluation expérimentale des innovations variétales, proposition d’outils d’analyse de l’interaction génotype - milieu adaptés à la diversité des besoins et des contraintes des acteurs de la filière semences. Thèse de doctorat, Institut National Agronomique Paris-Grignon, 262 p.
- Lecomte, C., Prost, L., Cerf, M., Meynard, J.-M., 2010. Basis for designing a tool to evaluate new cultivars. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 667–677. doi:10.1051/agro/2009042
- Ledoux, E., Gomez, E., Monget, J.M., Viavattene, C., Viennot, P., Ducharme, A., Benoit, M., Mignolet, C., Schott, C., Mary, B., 2007. Agriculture and groundwater nitrate contamination in the Seine basin. The STICS–MODCOU modelling chain. *Science of The Total Environment* 375, 33–47. doi:10.1016/j.scitotenv.2006.12.002
- Lemaire, G. (Ed) 1997 . *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. 239 p.
- Lemaire, G., Gastal, F., 1997. N uptake and distribution in plant canopies, in Lemaire, G., (Ed) *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 3-43.
- Lemaire, G., Nicolardot, B. (Eds) 1997. *Maîtrise de l’azote dans les agrosystèmes*. Les colloques de l’INRA, 83, 336 p.
- Lemaire, G., Meynard, J.M., 1997. Use of the Nitrogen Nutrition Index for the analysis of agronomical date, in : Lemaire, G., (Ed) *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 45-56.
- Lemaire, G., van Oosterom, E., Jeuffroy, M.-H., Gastal, F., Massignam, A., 2008. Crop species present different qualitative types of response to N deficiency during their vegetative growth. *Field Crops Research* 105, 253–265. doi:10.1016/j.fcr.2007.10.009
- Lemaire, G., Gastal, F., 2009. Quantifying crop responses to nitrogen deficiency and avenues to improve nitrogen use efficiency, in: *Crop Physiology: Applications for Genetic Improvement and Agronomy*. Academic Press San Diego, pp. 171–211.

- Limaux, F., Aubry, C., Bourzeix, A. Constant J.B., 1993. Fertilisation azotée du blé en Lorraine : constat et propositions pour de nouvelles pratiques. *Perspectives Agricoles*, 179, 58-73.
- Limaux, F., 1994. Modélisation des besoins du blé en azote, de la fourniture du sol et de l'utilisation de l'engrais. Application au raisonnement de la fertilisation en Lorraine. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Lorraine, 179p.
- Limaux, F., Recous, S., Meynard, J.-M., Guckert, A., 1999. Relationship between rate of crop growth at date of fertiliser N application and fate of fertiliser N applied to winter wheat. *Plant and Soil* 214, 49–59.
- Limaux, F., Meynard, J.M., Recous, S., 2001. Déclencher la fertilisation azotée du blé : bases théoriques et principes généraux. *Perspectives Agricoles*, 273, 62-70.
- Limaux, F., 2002. Intérêt du témoin « double densité » pour déclencher la fertilisation azotée du blé d'hiver : bases théoriques, principes généraux et résultats. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 88 (7).
- Limon-Ortega, A., Sayre, K.D., Francis, C.A., 2000. Wheat nitrogen use efficiency in a bed planting system in northwest Mexico. *Agronomy Journal* 92, 303-308. DOI: 10.1007/s100870050037
- Link, A., Panitzki, M., Reusch, S., Robert, P. C., 2003. Hydro N-Sensor: tractor-mounted remote sensing for variable nitrogen fertilization, in: *Proceedings of the 6th International Conference on Precision Agriculture and Other Precision Resources Management*, Minneapolis, MN, USA, 14-17 July, 2002. American Society of Agronomy, 1012-1017.
- Loyce, C., Meynard, J.M., Bouchard, C., Rolland, B., Lonnet, P., Bataillon, P., Bernicot, M.H., Bonnefoy, M., Charrier, X., Debote, B., Demarquet, T., Duperrier, B., Félix, I., Heddadj, D., Leblanc, O., Leleu, M., Mangin, P., Méausoone, M., Doussinault, G., 2008. Interaction between cultivar and crop management effects on winter wheat diseases, lodging, and yield. *Crop Protection* 27, 1131–1142. doi:10.1016/j.cropro.2008.02.001
- Luebs, R.E., Laag, A.E., 1967. Nitrogen effect on leaf area, yield, and nitrogen uptake of barley under moisture stress. *Agronomy Journal* 59, 219–222. doi:10.2134/agronj1967.00021962005900030004x
- 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 First Congress of the European Society of Agronomy, FRANCE, Colmar, 05-07 December 1990*.
- Machet, J.M., Dubrulle, P., Damay, N., Philippon, E., 2008. Azofert. Plaquette téléchargeable depuis : <http://www.npc.inra.fr/Le-centre-Les-recherches/Impacts-environnementaux/Azofert-une-aide-pour-raisonner-la-fertilisation-des-cultures>
- Makowski, D., 1996. Modélisation de l'incertitude de la réponse à l'azote et évaluation de stratégies de fertilisation. Application au blé d'hiver. Mémoire DEA INA-P-G / Paris VI / Paris XI.
- Makowski, D., Wallach, D., Meynard, J.M., 2001. Statistical methods for predicting responses to applied nitrogen and calculating optimal nitrogen rates. *Agronomy Journal*, 93, 531–539.
- Makowski, D., Taverne, M., Bolomier, J., Ducarne, M., 2005. Comparison of risk indicators for sclerotinia control in oilseed rape. *Crop Protection* 24, 527–531. doi:10.1016/j.cropro.2004.10.003
- Makowski, D., Tichit, M., Guichard, L., Van Keulen, H., Beaudoin, N., 2009. Measuring the accuracy of agro-environmental indicators. *Journal of Environmental Management* 90, S139–S146. doi:10.1016/j.jenvman.2008.11.023
- Mariotti, A., 1997. Quelques réflexions sur le cycle biogéochimique de l'azote dans les agrosystèmes, in: Lemaire, G., Nicolardot, B. (Eds) *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Les colloques de l'INRA*, 83, 9–22.
- Mary, B., Beaudouin, N., Justes, E., Machet, J.M., 1999. Calculation of nitrogen mineralization and leaching in fallow soil using a simple dynamic model. *European Journal of Soil Science*, 50, 549-566.
- 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. doi:10.1080/00380768.1997.10414721
- Matthews, K.B., Schwarz, G., Buchan, K., Rivington, M., Miller, D., 2008. Wither agricultural DSS? *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 149–159. doi:10.1016/j.compag.2007.11.001
- Matzdorf, B., Lorenz, J., 2010. How cost-effective are result-oriented agri-environmental measures? An empirical analysis in Germany. *Land Use Policy* 27, 535–544. doi:10.1016/j.landusepol.2009.07.011

- Mazerolle, M.J., 2004. Appendix 1: Making sense out of Akaike's Information Criterion (AIC): its use and interpretation in model selection and inference from ecological data. *Mouvements et Reproduction des Amphibiens en Tourbières Perturbées* 174–190.
- McCown, R.L., 2001. Learning to bridge the gap between science-based decision support and the practice of farming: evolution in paradigms of model-based research and intervention from design to dialogue. *Crop and Pasture Science* 52, 549–572.
- McCown, R.L., 2002. Changing systems for supporting farmers' decisions : problems, paradigms and prospects. *Agricultural Systems*, 74 (1), 179-220.
- Meyer, R.D., Olson, R.A., Rhoades, H.F., 1961. Ammonia losses from fertilized Nebraska soils. *Agronomy Journal* 53, 241–244.
- Meynard, J. M., Boiffin, J., Caneill, J., Sebillotte, M., 1981. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse. II. - Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie*, 1 (9), 795-806.
- Meynard, J.-M., Boiffin, J., Caneill, J., Sebillotte, M., 1982. Elaboration du rendement et fertilisation azotée du blé d'hiver en Champagne crayeuse II. -Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel. *Agronomie* 1(9), 795-806. doi: 10.1051/agro:19820503
- Meynard, J.M., 1985a. Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver. Thèse de doctorat. Institut National Agronomique Paris-Grignon, 297 p.
- Meynard, J.M., 1985b. Les besoins en azote du blé d'hiver jusqu'au début de la montaison. *Agronomie* 5 (7), 576-589.
- Meynard, J.-M., Limaux, F., 1987. Prévision des rendements et conduite de la fertilisation azotée. Cas du blé d'hiver. *Compte-Rendu de l'Académie d'Agriculture de France* 73 (3), 117-132
- Meynard, J.M., 1995. La fertilisation azotée dans les nouveaux itinéraires techniques, in: Ignazi, J.-C., Riou, P. (Eds), *Analyser et fertiliser en toute connaissance, Comifer-Gemas* (2), 33-42.
- Meynard, J.M., Girardin, P., 1992. Produire autrement. *Courrier de la Cellule Environnement de l'INRA*, 15, 1-19.
- Meynard J.M. ; Reau R. ; Robert D. ; Saulas P. ; 1996. Evaluation expérimentale des itinéraires techniques, in : « Expérimenter sur les conduites de culture : un nouveau savoir-faire au service d'une agriculture en mutation ». *DERF-ACTA*, Paris, pp ; 63-72.
- Meynard, J.M., Justes, E., Machet, J.M., Recous, S., 1997a. Fertilisation azotée des cultures annuelles de plein champs, in : Lemaire, G., Nicolardot, B. (Eds) *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Les colloques de l'INRA*, 83, 183-200.
- Meynard J.M., Aubry, C., Justes, E., Le Bail, M., 1997b. Nitrogen diagnosis and decision support, in: Lemaire, G. (Ed), *Diagnosis of the Nitrogen Status in crops*. Springer, Berlin, 147-162.
- Meynard, J.M., 1998. La modélisation du fonctionnement de l'agrosystème, base de la mise au point d'itinéraires techniques et de systèmes de culture, in: Biarnès, A. (Ed) *La Conduite du champ cultivé: points de vue d'agronomes*, Collection Colloques et séminaires, 29-54
- Meynard, J.M., Doré, T., Habib, R., 2001. L'évaluation et la conception de systèmes de culture pour une agriculture durable. *Comptes rendus de l'Académie d'agriculture de France*, 87(4), 223-236.
- Meynard, J.-M., Cerf, M., Guichard, L., Jeuffroy, M.-H., Makowski, D., 2002. Which decision support tools for the environmental management of nitrogen? *Agronomie* 22, 817–829. doi:10.1051/agro:2002064
- Meynard, J.M., Dedieu, B., Bos, B., 2012. Re-design and co-design of farming systems. An overview of methods and practices, in : Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B., (Eds.) *Farming systems research into the 21st century : The new dynamic*. Springer, Berlin, 405-429.
- Mischler, P., Lheureux, S., Dumoulin, F., Menu, P., Sene, O., Hopquin, J.P., Cariolle, M., Reau, R., Munier-Jolain, N., Faloya, V., Boizard, H., Meynard, J.M., 2009. En Picardie, 8 fermes de grande culture engagées en Production Intégrée réduisent fortement les pesticides sans baisse de marge. *Le courrier de l'environnement de l'INRA*, 57, 73–91
- Ministère de l'Ecologie, Arrêté du 19 décembre 2011 relatif au programme d'actions national à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole. NOR: DEVL1134069A. Version du 24 juin 2015.

- Mistele, B., Schmidhalter, U., 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *European Journal of Agronomy* 29, 184–190. doi:10.1016/j.eja.2008.05.007
- Mohammed, Y.A., Kelly, J., Chim, B.K., Rutto, E., Waldschmidt, K., Mullock, J., Torres, G., Desta, K.G., Raun, W., 2013. Nitrogen fertilizer management for improved grain yield and quality in winter wheat in Oklahoma. *Journal of Plant Nutrition* 36, 749–761. doi:10.1080/01904167.2012.754039
- Monteith J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9, 747-766
- Morvan, T., Le Houéron, B., Martinez, J., Hacala, S., 1997. La valorisation des effluents d'élevage, in : Lemaire, G., Nicolardot, B. (Eds) *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes. Les colloques de l'INRA*, 83, 233-254.
- Morvan, T., Beff, L., Germain, P., Chaussod, R., Valé, M., Louis, B., Lambert, Y., 2016. Soil nitrogen mineralization : reliability of a multi-component approach, 19th Nitrogen Workshop, Skara, Sweden, June 2016.
- Mouysset L, Doyen L, Jiguet F, 2014. From population viability analysis to co-viability of farmland biodiversity and agriculture. *Conservation Biology*, 28, 187-201.
- Mundry, R., Nunn, C.L., 2009. Stepwise Model Fitting and Statistical Inference: Turning Noise into Signal Pollution. *The American Naturalist* 173, 119–123. doi:10.1086/593303
- Naud, C., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H., 2009. Leaf transmittance measurements can improve predictions of the nitrogen status for winter wheat crop. *Field Crops Research* 110, 27–34. doi:10.1016/j.fcr.2008.06.012
- Neilsen, D., Hogue, E.J., Neilsen, G.H., Parchomchuk, P., 1995. Using SPAD-502 values to assess the nitrogen status of apple-trees. *Hortscience*, 30, 508-512.
- Neukirchen, D., and J. Lammel. 2002. The chlorophyll content as an indicator for nutrient and quality management. *Nawozy i Nawozenie – Fertilizers and Fertilization* 11:89–109.
- Newman, S., Lynch, T., Plummer, A.A. 1999. Success and failure of decision support systems : learning as we go. *Proceedings of the American society of Animal science*, 12 p.
- Noël, V., 2016. Gérer la fertilisation du blé sans la méthode du bilan. *Réussir Grandes Cultures*, 307, 32-34.
- Olfs, H.-W., Blankenau, K., Brentrup, F., Jasper, J., Link, A., Lammel, J., 2005. Soil- and plant-based nitrogen-fertilizer recommendations in arable farming. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 414–431. doi:10.1002/jpln.200520526
- Olivier, M., Goffart, J.-P., Ledent, J.-F., 2006. Threshold Value for Chlorophyll Meter as Decision Tool for Nitrogen Management of Potato. *Agronomy Journal* 98, 496. doi:10.2134/agronj2005.0108
- Ondersteijn, C.J.M., Beldman, A.C.G., Daatselaar, C.H.G., Giesen, G.W.J., Huirne, R.B.M., 2002. The Dutch Mineral Accounting System and the European Nitrate Directive: implications for N and P management and farm performance. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 92, 283–296. doi:10.1016/S0167-8809(01)00288-2
- Orloff, S., Wright, S., Ottman, M., n.d. Nitrogen management impacts on wheat yield and protein, in: *Proceedings, 2012 California Alfalfa & Grains Symposium*, Sacramento, CA, December 11-12, 2012. UC Cooperative Extension, Plant Sciences Department, University of California, Davis CA 95616.
- Ortuzar-Iragorri, M.A., Alonso, A., Castellón, A., Besga, G., Estavillo, J.M., Aizpurua, A., 2005. N-Tester Use in Soft Winter Wheat. *Agronomy Journal* 97, 1380. doi:10.2134/agronj2004.0268
- Osty, P. L., 1978. L'exploitation agricole vue comme un système. Diffusion de l'innovation et contribution au développement. *Bulletin Technique d'Information Ministère de l'Agriculture*.
- Papastylianou, I., Graham, R.D., Puckridge, D.W., 1982. The diagnosis of nitrogen deficiency in wheat by means of a critical nitrate concentration in stem bases. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 13, 473–485. doi:10.1080/00103628209367286
- Paravano, L., Prost, L., Reau, R., 2016. Brienon-sur-Armançon : pilotage dynamique des actions d'un territoire à enjeu nitrate, à l'aide d'un observatoire et d'un tableau de bord. *Agronomie, environnement & sociétés*, 6 (1), 127-133.
- Passioura, J.B., 1996. Simulation Models: Science, Snake Oil, Education, or Engineering? *Agronomy Journal* 88, 690. doi:10.2134/agronj1996.00021962008800050002x
- Pastré, P., 2005. Apprendre par la résolution de problèmes : le rôle de la simulation, in : *Apprendre par la simulation. De l'analyse du travail aux apprentissages professionnels*, Octarès Eds, Toulouse, 17-40.
- Pellerin S., Bamière L., Angers D., Béline F., Benoît M., Butault J.P., Chenu C., Colnenne-David C., De Cara S., Delame N., Doreau M., Dupraz P., Faverdin P., Garcia-Launay F., Hassouna M., Hénault C., Jeuffroy M.H.,

- Klumpp K., Metay A., Moran D., Recous S., Samson E., Savini I., Pardon L., 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre ? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. Synthèse du rapport d'étude, INRA (France), 92 p.
- Pellerin, S., Bamiere, L., Angers, D., Béline, F., Benoit, M., Butault, J.P., Chenu, C., Colnenne-David, C., De Cara, S., Delame, N., others, 2014. Quels leviers techniques pour l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre d'origine agricole? *Innovations Agronomiques* 37, 1–10.
- Pellerin, S., Butler, F., Van Laethem, C., Guyomard, H., 2014. Fertilisation et environnement quelles pistes pour l'aide à la décision ? Éd. Quae ; Versailles; Paris; Acta. 288 p.
- Peltonen, J., Virtanen, A., Haggren, E., 1995. Using a chlorophyll meter to optimize nitrogen fertilizer application for intensively-managed small-grain cereals. *Journal of Agronomy and Crop Science* 174, 309–318.
- Plas, D., 1992. Adaptation régionale du raisonnement de la fertilisation: Cas du blé tendre en Aunis. Thèse de doctorat, Université Technologique de Compiègne.
- Powelson, D.S., Hart, P.B.S., Poulton, P.R., Johnston, A.E., Jenkinson, D.S., 1992. Influence of soil type, crop management and weather on the recovery of ¹⁵N-labelled fertilizer applied to winter wheat in spring. *The Journal of Agricultural Science* 118, 83. doi:10.1017/S0021859600068040
- Prost, L., Jeuffroy, M.H., 2007. Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status. *Agronomy for Sustainable Development* 27, 321–330. doi:10.1051/agro:2007032
- Prost, L., 2008. Modéliser en agronomie et concevoir des outils en interaction avec de futurs utilisateurs: Le cas de la modélisation des interactions génotype-environnement et de l'outil DIAGVAR. Thèse de Doctorat, AgroParisTech, 215 p.
- Prost, L., Cerf, M., Jeuffroy, M.H., 2012. Lack of consideration for end-users during the design of agronomic models. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 581–594. doi:10.1007/s13593-011-0059-4
- Prost, L., Berthet, E.T.A., Cerf, M., Jeuffroy, M.H., Labatut, J., Meynard, J.M., 2016. Innovative design for agriculture in the move towards sustainability: scientific challenges. *Research in Engineering Design*. doi:10.1007/s00163-016-0233-4
- Raun, W.R., Solie, J.B., Johnson, G.V., Stone, M.L., Lukina, E.V., Thomason, W.E., Schepers, J.S., 2001. In-season prediction of potential grain yield in winter wheat using canopy reflectance. *Agronomy Journal* 93, 131–138.
- Ravier, C., Prost, L., Jeuffroy, M.-H., Wezel, A., Paravano, L., Reau, R., 2015. Multi-criteria and multi-stakeholder assessment of cropping systems for a result-oriented water quality preservation action programme. *Land Use Policy* 42, 131–140. doi:10.1016/j.landusepol.2014.07.006
- Ravier, C., Jeuffroy, M.-H., Meynard, J.-M., 2016. Mismatch between a science-based decision tool and its use: The case of the balance-sheet method for nitrogen fertilization in France. *NJAS - Wageningen Journal of Life Sciences* 79, 31–40. doi:10.1016/j.njas.2016.10.001
- Reau, R., Monnot, L.A., Schaub, A., Munier-Jolain, N., Pambou, I., Bockstaller, C., Cariolle, M., Chabert, A., Dumans, P., 2012. Les ateliers de conception de systèmes de culture pour construire, évaluer et identifier des prototypes prometteurs. *Innovations Agronomiques*, 20, 5-33.
- Recous, S., Darwis, D., Robin, D., Machet, J.M., 1993. Décomposition des résidus de récolte, interactions avec la dynamique de l'azote, in : Decroux, J., Ignazo, J.C. (Eds) *Matières organiques et agriculture*. Comifer-Gemas (1), 3-15.
- Recous, S., 1994. Réponse des matières organiques des sols aux changements atmosphériques globaux. II. Effet de la température sur la minéralisation d'un résidu végétal (maïs) et de la matière organique des sols, in : *Ecosystèmes et changements globaux*, Perrier A., Saugier B. (dir.). Dossiers de l'environnement de l'INRA, 8, 81-86.
- Recous, S., Loiseau, P., Machet, J.M., Mary, B., 1997. Transformation et devenir de l'azote de l'engrais sous cultures annuelles et sous prairies, in : Lemaire, G., Nicolardot, B. (Eds) *Maîtrise de l'azote dans les agrosystèmes*. Les colloques de l'INRA, 83, 105-120.
- Recous, S., Machet, J.M., 1999. Short-term immobilisation and crop uptake of fertiliser nitrogen applied to winter wheat: effect of date of application in spring. *Plant and soil*, 206, 137-149. doi:10.1023/A:1004377006602
- Reeves, D.W., Mask, P.L., Wood, C.W., Delaney, D.P., 1993. Determination of wheat nitrogen status with a hand-held chlorophyll meter: Influence of management practices 1. *Journal of Plant Nutrition* 16, 781–796. doi:10.1080/01904169309364574

- Rémy, J.-C., Hébert, J., 1977. Le devenir des engrais azotés dans le sol. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*. 63, 700-710.
- Romera, A., Morris, S., Hodgson, J., Stirling, W., Woodward, S.J., 2004. A model for simulating rule-based management of cow-calf systems. *Computers and Electronics in Agriculture* 42, 67–86. doi:10.1016/S0168-1699(03)00118-2
- Rossing W.A.H., Daamen, R.A., Janse, M.J.W., 1994. Uncertainty analysis applied to supervised control of aphids and brown rust in winter wheat. Part 2. Relative importance of different components of uncertainty. *Agricultural Systems*, 44, 449-460.
- Rossing, W.A.H., Meynard, J.M., van Ittersum, M.K. 1997. Model-based explorations to support development of sustainable farming systems: cases studies from France and the Netherlands. *European Journal of Agronomy* 7, 271-283. 1161-0301/97/\$17.00
- Ruopp, M.D., Perkins, N.J., Whitcomb, B.W., Schisterman, E.F., 2008. Youden index and optimal cut-point estimated from observations affected by a lower limit of detection. *Biometrical Journal* 50, 419–430. doi:10.1002/bimj.200710415
- Sadras, V.O., Lemaire, G., 2014. Quantifying crop nitrogen status for comparisons of agronomic practices and genotypes. *Field Crops Research* 164, 54–64. doi:10.1016/j.fcr.2014.05.006
- Sabatier R, Doyen L, Tichit M., 2010. Modeling trade-offs between livestock grazing and water conservation in a grassland agroecosystem *Ecological Modelling* 221, pp. 1292-1300
- Sabatier R, Doyen L, Tichit M., 2012. Action versus Result-Oriented Schemes in a Grassland Agroecosystem: A Dynamic Modelling Approach. *PLoS ONE* 7(4): e33257. doi:10.1371/journal.pone.0033257
- Sabatier, R., Oates, L.G., Jackson, R.D., 2015. Management flexibility of a grassland agroecosystem: A modeling approach based on viability theory. *Agricultural Systems* 139, 76–81. doi:10.1016/j.agsy.2015.06.008
- Salembier, C., Elverdin, J.H., Meynard, J.-M., 2016. Tracking on-farm innovations to unearth alternatives to the dominant soybean-based system in the Argentinean Pampa. *Agronomy for Sustainable Development* 36. doi:10.1007/s13593-015-0343-9
- Samborski, S.M., Tremblay, N., Fallon, E., 2009. Strategies to Make Use of Plant Sensors-Based Diagnostic Information for Nitrogen Recommendations. *Agronomy Journal* 101 (4), 800-816. doi:10.2134/agronj2008.0162Rx
- Semiring H., Lees H.L., Raun W.R., Johnson G.V., Solie J.B., Stone M.L., DeLeon M.J., Lukina E.J., Cossey D.A., LaRuffa J.M., Woolfolk C.W., Phillips S.B., Thomason W.E. 2000. Effect of growth stage and variety on spectral radiance in winter wheat. *Journal of Plant Nutrition*, 23:1, 141-149, DOI: 10.1080/01904160009382003
- Schepers, J.S., Moision, A.R., 1991. Accounting for nitrogen in nonequilibrium soil-crop systems, in: R.F. Follett R.F., et al (Eds.), *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*, SSA, Madison, WI, 125-138. doi: 10.2136/1991.managingnitrogen.c6
- Schepers, J.S., Francis, D.D., Vigil, M., Below, F.E., 1992. Comparison of corn leaf nitrogen concentration and chlorophyll meter readings. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 23, 2173–2187. doi:10.1080/00103629209368733
- Schröder, J.J., Neeteson, J.J., Oenema, O., Struik, P.C., 2000. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. *Field Crops Research* 66, 151-164. doi:10.1016/S0378-4290(00)00072-1
- Schröder, J.J., Neeteson, J.J., 2008. Nutrient management regulations in the Netherlands. *Geoderma* 144 ,418-425. doi: 10.1016/j.geoderma.2007.12.010
- Schvartz, C., 1995. Contrôle et suivi de la fertilisation raisonnée: quel besoin en outils?, in: Ignazi, J.-C., Riou, P. (Eds.), *Analyser et fertiliser en toute connaissance*, Blois, 21-23 Novembre 1995, Actes des deuxièmes rencontres de la fertilisation raisonnée et de l'analyse de terre, 161-170.
- Schwarz, G., Moxey, A., McCracken, D., Huband, S. and Cummins R. (2008) An analysis of the potential effectiveness of a Payment-by-Results approach to the delivery of environmental public goods and services supplied by Agri-Environment Schemes. Report to the Land Use Policy Group, UK, 108pp. Macaulay Institute, Pareto Consulting and Scottish Agricultural College.
- Sebillotte, M., 1985. Rôles des l'azote dans le comportement d'un peuplement de céréales. *Réflexions sur les approches de l'agronomie. Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 73 (3), 292-301.

- Sebillotte, M., Soler, L.G., 1988. Le concept de modèle générale et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France*, 74, 59-70.
- Shanahan, J.F., Kitchen, N.R., Raun, W.R., Schepers, J.S., 2008. Responsive in-season nitrogen management for cereals. *Computers and Electronics in Agriculture* 61, 51–62. doi:10.1016/j.compag.2007.06.006
- Simon, H.A., 1969. *The sciences of the artificial*. 3rd edn (MIT Press : Cambridge, MA).
- Simón, M.R., Cordo, C.A., Perelló, A.E., Struik, P.C., 2003. Influence of nitrogen supply on the susceptibility of wheat to *Septoria tritici*: effect of N on *Septoria tritici* susceptibility. *Journal of Phytopathology* 151, 283–289. doi:10.1046/j.1439-0434.2003.00720.x
- Smith, S.J., Schepers, J.S., Porter, L.K., 1990. Assessing and Managing Agricultural Nitrogen Losses to the Environment, in: Stewart, B.A. (Ed.), *Advances in Soil Science*. Springer New York, New York, NY, 1-43.
- Sogreah- MEEDDTL, juillet 2011 : évaluation environnementale du programme d'action national relatif à l'application de la directive nitrates.
- Sonneveld, M.P.W., Bouma, J., 2003. Methodological considerations for nitrogen policies in the Netherlands including a new role for research. *Environmental Science & Policy* 6, 501–511. doi:10.1016/j.envsci.2003.08.005
- Sterk, B., van Ittersum, M.K., Leeuwis, C., Wijnands, F.G., 2007. Prototyping and farm system modelling—Partners on the road towards more sustainable farm systems? *European Journal of Agronomy* 26, 401–409. doi:10.1016/j.eja.2006.12.006
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European journal of agronomy* 18, 289–307.
- Sutton, M.A. (Ed.), 2011. *The European nitrogen assessment: sources, effects, and policy perspectives*. Cambridge University Press, Cambridge, UK ; New York.
- Sylvester-Bradley, R., Davies, D.B., Dyer, C., Rahn, C., Johnson, P.A., 1997. The value of nitrogen applied to wheat during early development. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 47, 173-180. DOI: 10.1007/BF01991549
- Taureau, J.C., Machet, J.M., Cattin, G., 1995. La fertilization azotée des grandes cultures annuelles, in: Ignazi, J.-C., Riou, P. (Eds.), *Analyser et fertiliser en toute connaissances*, Comifer-Gemas (2), 101-112.
- Terman, G.L., Ramig, R.E., Dreier, A.F., Olson, R.A., 1969. Yield-Protein Relationships in Wheat Grain, as Affected by Nitrogen and Water¹. *Agronomy Journal* 61, 755. doi:10.2134/agronj1969.00021962006100050031x
- Thévenet, G., 2000. L'utilisation et la maîtrise des intrants en céréaliculture. De l'âge de pierre à l'âge de raison. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France, Séances an 2000*, 86 (3), 139-159
- Toffolini, Q., Jeuffroy, M.-H., Prost, L., 2016. Indicators used by farmers to design agricultural systems: a survey. *Agronomy for Sustainable Development* 36. doi:10.1007/s13593-015-0340-z
- Valé, M., 2006. Quantification et prédiction de la minéralisation nette de l'azote du sol in situ, sous divers pédoclimats et systèmes de culture français. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 209 p.
- Vanloqueren, G., Baret, P.V., 2008. Why are ecological, low-input, multi-resistant wheat cultivars slow to develop commercially? A Belgian agricultural “lock-in” case study. *Ecological Economics* 66, 436–446. doi:10.1016/j.ecolecon.2007.10.007
- Vereijken, P., 1997. A methodological way of prototyping integrated and ecological arable farming systems (I/EAFS) in interaction with pilot farms. *European Journal of Agronomy*, 7, 235-250.
- Vermersch, P., 2011. L'entretien d'explicitation. ESF (Ed), Issy-les-Moulineaux, 220 p.
- Vert J., Portet F., 2012. Évolution des consommations d'énergie dans les scénarios « Agriculture Énergie 2030 » et enseignements tirés des chiffres, *Sciences Eaux & Territoires* 2/2012 (7), 2-9.
- Viaux, P., 1980. Fumure azotée des céréales d'hiver. *Perspectives agricoles* 43, 10-26.
- Vidal, I., Longeri, L., Hétier, J.M., 1999. Nitrogen uptake and chlorophyll meter measurements in spring wheat. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 55, 1–6.
- Vouillot, M.O., Huet, P., Boissard, P., 1998. Early detection of N deficiency in a wheat crop using physiological and radiometric methods. *Agronomie* 18, 117–130. doi:10.1051/agro:19980202
- Wagenmakers, E.-J., Farrell, S., 2004. AIC model selection using Akaike weights. *Psychonomic bulletin & review* 11, 192–196.

- Wang, G., Bronson, K.F., Thorp, K.R., Mon, J., Badaruddin, M., 2014. Multiple Leaf Measurements Improve Effectiveness of Chlorophyll Meter for Durum Wheat Nitrogen Management. *Crop Science* 54, 817. doi:10.2135/cropsci2013.03.0160
- Wood, C.W., Tracy, P.W., Reeves, D.W., Edmisten, K.L., 1992. Determination of cotton nitrogen status with a handheld chlorophyll meter. *Journal of Plant Nutrition* 15, 1435–1448. doi:10.1080/01904169209364409
- Woodward, S.J.R., Romera, A.J., Beskow, W.B., Lovatt, S.J., 2008. Better simulation modelling to support farming systems innovation: Review and synthesis. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 51, 235–252. doi:10.1080/00288230809510452
- Yang, H., Yang, J., Lv, Y., He, J., 2014. SPAD Values and Nitrogen Nutrition Index for the Evaluation of Rice Nitrogen Status. *Plant Production Science* 17, 81–92. doi:10.1626/pps.17.81
- Yuan, Z., Ata-Ul-Karim, S.T., Cao, Q., Lu, Z., Cao, W., Zhu, Y., Liu, X., 2016. Indicators for diagnosing nitrogen status of rice based on chlorophyll meter readings. *Field Crops Research* 185, 12–20. doi:10.1016/j.fcr.2015.10.003
- Youden, W.J., 1950. Index for rating diagnostic tests. *Cancer* 3, 32–35. doi:10.1002/1097-0142(1950)3:1<32::AID-CNCR2820030106>3.0.CO;2
- Zebarth, B.J., Botha, E.J., Rees, H., 2007. Rate and time of fertilizer nitrogen application on yield, protein and apparent efficiency of fertilizer nitrogen use of spring wheat. *Canadian Journal of Plant Science* 87, 709–718. doi : 10.4141/CJPS06001
- Ziadi, N., Bélanger, G., Claessens, A., Lefebvre, L., Tremblay, N., Cambouris, A.N., Nolin, M.C., Parent, L.-É., 2010. Plant-Based Diagnostic Tools for Evaluating Wheat Nitrogen Status. *Crop Science* 50, 2580. doi:10.2135/cropsci2010.01.0032

Annexe - Le guide d'entretien

Présentation et « contrat » agriculteurs :

Je fais ces enquêtes pour mon projet de doctorat chez Arvalis et à l'INRA qui a démarré en septembre 2013 et qui va durer 3 ans. Je travaille sur les méthodes et outils de raisonnement de la fertilisation azotée. La finalité étant d'explorer la possibilité de construire de nouveaux outils d'aide à la décision, du moins de jeter les bases de ces outils afin de répondre aux enjeux production (rendement, qualité, marge) et environnement (fuites de nitrates vers les eaux et l'air). La première étape de ce projet consiste à réaliser un « état des lieux » sur la diversité des modes de raisonnement de la fertilisation existants actuellement. J'ai dans un premier temps rencontré un conseiller de votre réseau, avec qui j'ai réalisé l'exercice de description du raisonnement qu'il diffuse. Dans un second temps, je rencontre donc des agriculteurs, ayant accès à ce conseil, le but étant d'avoir un repère pour moi, et pouvoir identifier ce qui est issu de ce conseil et ce qui ne l'est pas. L'objet n'est pas d'évaluer ni vos pratiques, ni la mise en œuvre du conseil, mais bien de comprendre ce que vous faites. Nous nous attarderons donc sur les questions, comment je raisonne la fertilisation azotée des blés sur mon exploitation, pourquoi je fais comme ça et pas autrement et qu'est-ce que j'utilise comme données extérieures (conseil, connaissances, outils) et comment je les utilise (interprétation, adaptation) pour mettre en œuvre la fertilisation ?

Nous passerons aussi un peu de temps à décrire assez précisément les repères que vous avez, c'est-à-dire toutes ces règles de décision, acquises au fil des expériences pour évaluer l'état de votre système, avant de fertiliser, après la fertilisation et à la récolte et ajuster vos pratiques, vos techniques, vos choix d'une année sur l'autre.

Votre témoignage sera pour moi la description d'une façon de raisonnement la fertilisation. On pense que pour réfléchir la théorie sur le raisonnement de la fertilisation, il est primordial qu'on sache ce que vous faites, ainsi on peut mieux cerner les contraintes, et finalement, s'appuyer sur ce que vous avez mis en place pour repenser les méthodes d'accompagnement du raisonnement de la fertilisation azotée.

On va donc plus loin que le plan de fumure, on va essayer, ensemble de décrire ce que vous faites et pourquoi. Par exemple les informations que vous mobilisez pour vous adapter à la situation, ou encore identifier les informations que vous pourriez mobiliser mais que vous ne trouvez pas nécessaire de prendre en compte.

L'entretien sera enregistré si vous n'y voyez pas d'inconvénient, cela me permettra d'y revenir après et d'analyser le contenu de nos échanges. Les informations seront utilisées pour mes travaux de thèse et ne feront pas l'objet de diffusion en dehors de ce cadre.

Si vous êtes d'accord avec cette démarche, je vous propose qu'on commence l'entretien.

Question 1 : On peut commencer par décrire une conduite spécifique appliquée à une parcelle de référence l'année dernière par exemple. En partant d'un exemple concret, est-ce que vous pouvez me retracer les étapes et les éléments que vous avez mobilisés pour fertiliser ce blé, cette année ?

Les points à aborder :

- les outils mobilisés pour calculer les apports et l'usage/l'interprétation des résultats (Est-ce que les résultats sont pris tels quels ? Est-ce que les résultats sont utilisés ? Comment?)
- les objectifs fixés / les priorités de l'exploitant
- comment est pilotée la fertilisation => indicateur (détaillez votre appréciation de ces éléments, sol, climat.. prévision météo)
- quelles sont les règles pour déclencher les apports –quels outils, quelles connaissances pour réaliser les apports.

Question 2 : Pourquoi vous faites comme ça ?

Comment avez-vous choisi les outils ? Pourquoi ces outils et pas d'autres ?

Comment la dose s'ajuste en cours de campagne ? Comment est-ce que vous fertilisez les autres années ? Quels sont les changements, les évolutions opérées dans les pratiques de fertilisation pour s'adapter à l'année? En fonction de quels critères, quelles règles de décision?

Comment est-ce que vous adaptez les connaissances à la situation vécue ?

Quelle part de temps pour acquérir des nouvelles connaissances ? Quel temps consacré à la réflexion sur l'azote ?

Comment est-ce que vous fertilisez les autres parcelles en blé ? (Stratégie d'extrapolation – qu'est ce qui justifie de faire comme ça, quel suivi, est-ce que ça marche, est-ce que c'est précis...)

Quelle variabilité dans les pratiques entre les années ? Comment s'adapte le raisonnement d'une année à l'autre ? S'adapter au climat, à la rotation, aux objectifs

Question 3 : Est-ce qu'on peut reprendre les éléments concernant les apports de manière plus générique?

Pour le calcul de la dose : Données de l'exploitation/Référentiels ?

Comment est ce que vous estimez le rendement ? Analyse de sol ? Sur combien de parcelle ?

Est-ce que vous refaites un calcul en cours de campagne ? et les ajustements ? Comment vous pilotez ? Plusieurs calculs ?

Et où est ce que vous trouvez ces données ? Comment est-ce que vous les adaptez vos situations ?

Est-ce que vous avez toutes les données que vous aimeriez avoir ? Qu'est ce qu'il vous manque ? Est-ce que vous savez pour quelles raisons vous n'avez pas cette donnée ? Comment est-ce que vous pourriez l'avoir ?

Quels sont les repères que vous utilisez pour déclencher les apports ? (critères pour définir une date d'apport)

Sur quoi évaluez vous la réussite de vos apports ? (Est-ce que l'apport a été fait au bon moment, en bonne quantité ?) Est-ce qu'il y a des repères spécifiques ? D'une année sur l'autre des indicateurs qui permettent de juger ?

Question 4 :

Qui peut être amené à vous conseiller ?

Comment gérer la diversité des préconisations ?

Comment ça se passe quand il y a des connaissances nouvelles qui arrivent ? Quelle posture ? Test ?

Question 5 :

Comment est-ce que la fertilisation s'imbrique avec les autres pratiques culturales ? Est-ce que certaines interventions vont influencer vos choix de fertilisation (choix des précédents...) et inversement est-ce que votre fertilisation impacte d'autres pratiques (protection phytosanitaire...) ?

Présentation et « contrat » conseillers:

Je fais ces enquêtes pour mon projet de doctorat chez Arvalis et à l'INRA qui a démarré en septembre 2013 et va durer 3 ans. Nous travaillons sur la conception de nouveaux outils de raisonnement de la fertilisation azotée en nous basant pour l'exercice sur le cas de la culture du blé d'hiver. Je m'intéresse aux moyens déployés pour diffuser le conseil aux agriculteurs pour le raisonnement de leur fertilisation azotée.. Je regarderai les mécanismes qui font que vous allez choisir un outil, un repère, une règle de décision pour raisonner la fertilisation. J'essayerai de déterminer sur quelles informations et critères vous vous appuyez pour conseiller les apports à réaliser. C'est-à-dire comment vous vous appropriez des connaissances pour définir une intervention et ses modalités. Je regarderai quelle type de données vous mobilisez et quelles interprétations vous faites pour conseiller des pratiques. Ce travail s'attache à faire ressortir l'usage que vous faites des outils de raisonnement dont vous disposez. Mon objectif est de comprendre les contraintes que vous rencontrez actuellement et les besoins que vous exprimez pour la conception de nouveaux outils.

L'entretien sera enregistré si vous n'y voyez pas d'inconvénient, cela me permettra d'y revenir après et d'analyser le contenu de nos échanges. Les informations seront utilisées dans le cadre strict de la production de mes travaux de thèse et ne feront pas l'objet de diffusion en dehors de ce cadre.

Pour le déroulement de l'entretien, j'ai quelques thèmes précis en tête, et j'aimerais qu'on aborde votre façon de raisonner la fertilisation azotée des blés du secteur sur lequel vous travaillez, quels sont les objectifs vous préconisez, comment est-ce que vous proposez l'adaptation aux années, aux parcelles et des informations dont les agriculteurs ont besoin/ et dont vous disposez pour raisonner et ajuster vos apports.

Si vous êtes d'accord avec cette démarche, je vous propose qu'on commence l'entretien.

Question 1 : Pourriez-vous me décrire votre démarche de raisonnement de la fertilisation azotée du blé. Si un agriculteur venait vous demander, cette année, qu'est-ce que je dois faire, comment est-ce que vous procédez pour le conseiller ?

Echelle de raisonnement ; les objectifs

Comment sont calculés les apports, avec quels outils ? ; Pilotage, règles pour déclencher les apports - critères

Et comment est-ce que vous lui conseillez d'adapter la fertilisation selon différentes situations ?

Question 2 : Quelles sont les données dont vous avez besoin pour calculer les quantités à apporter et les ajustements ?

Comment est-ce que vous estimez le rendement ? Analyse de sol ? Sur combien de parcelle ?

Et où est-ce que vous trouvez ces données ? Comment est-ce que vous les adaptez aux cas de chaque agriculteur ?

Est-ce que vous avez toutes les données que vous aimeriez avoir ? Qu'est ce qu'il vous manque ? Est-ce que vous savez pour quelles raisons vous n'avez pas cette donnée ? Comment est-ce que vous pourriez l'avoir ?

Comment est-ce que vous intégrez les contraintes des agriculteurs ? (incapacité à mesurer le reliquat sur toutes les parcelles...)

Question 3 : Comment est-ce que vous homogénéisez le conseil au sein de l'institut ?

Est-ce que chacun fait comme il veut ou bien vous avez des lignes directrices ? Ce système est satisfaisant ?

En fonction de quels objectifs est raisonné le conseil ?

Question 4 : Quel support de diffusion aux agriculteurs ?

Il y a-t-il des formations sur le raisonnement de la fertilisation ? Conseil individuel ?

Question 5 : Quels sont les critères pour évaluer la réussite de vos apports ? Est-ce que l'apport a été fait au bon moment, en bonne quantité ?

Quels conseils pour réduire l'usage des intrants en fertilisation ? Est-ce que vous essayez de réduire les pertes ? Comment ?

Question 6 : Est-ce que vous proposez un raisonnement d'autres pratiques culturales en fonction des préconisations de fertilisation que vous faites ?

Les enquêtes avec les membres du GREN n'ont pas fait l'objet d'un guide spécifique, nous avons abordé les interviews par le fonctionnement des GREN, en nous attachant à renseigner également les informations relatives à l'usage de la méthode, en procédant avec la même démarche et le même guide que pour les entretiens précédents. Certains acteurs avaient également la double casquette : GREN et conseiller, ils peuvent donc apparaître dans les 2 diagnostics, dès lors qu'ils ont également fourni des éléments sur les démarches de fertilisation. Par exemple l'enquête avec les conseillers de la coopérative Triskalia a porté spécifiquement sur conseil et nous avons également abordé le GREN Bretagne, idem avec C.Rocca pour Invivo qui nous a présenté Epiclès et apporté des éléments sur sa participation à la coordination nationale des GREN). Nous avons des témoignages de membres de GREN deux régions où tous les représentants techniques du groupe ont été rencontrés (Bourgogne et Bretagne) et d'autres pour lesquels, c'est la méthode d'échantillonnage qui nous a conduit à rencontrer des membres du GREN (Haute Normandie, Pays de la Loire, Ile de France).



Titre: Conception innovante d'une méthode de fertilisation azotée : Articulation entre diagnostic des usages, ateliers participatifs et modélisation

Mots clés: Blé tendre d'hiver ; Test d'usage ; Théorie C-K ; Efficience d'utilisation de l'azote ; Azodyn ; Viabilité

Résumé: Le raisonnement de la fertilisation azotée du blé a, depuis 40 ans, été largement orienté par le consensus autour de la méthode du bilan, avec comme principes fondamentaux : une nutrition azotée non limitante tout au long du cycle et l'estimation, de manière indépendante, des différents termes de l'équation du bilan pour caractériser la fourniture du sol et les besoins en azote de la plante. Au regard des enjeux de réduction des pollutions environnementales, de l'évolution des exigences qualitative du marché, ainsi que des difficultés de mise en œuvre de la méthode, on s'interroge sur l'opportunité de renouveler ce paradigme. Pour proposer une nouvelle méthode qui réponde aux divers enjeux concernant l'azote, qui valorise au mieux les connaissances disponibles et dont la mise en œuvre est cohérente avec les moyens des acteurs, nous avons mis en œuvre une démarche de conception innovante, structurée en 3 étapes : un diagnostic des usages des outils actuels, une phase de conception, incluant des ateliers de conception et la mise au point de règle de décision à l'aide d'un

modèle, et un test d'usage du prototype conçu.

Le diagnostic des usages a mis en évidence plusieurs obstacles à la mise en œuvre de la méthode du bilan, dont la fixation de l'objectif de rendement, ce qui a orienté la phase de conception vers l'exploration d'un concept de méthode de fertilisation azotée permettant de s'en affranchir. La méthode mise au point est basée sur le suivi régulier de l'état de nutrition azotée de la plante, l'acceptation de carences en azote non préjudiciables et des règles de décision tenant compte des conditions météorologiques au moment de l'apport.

Nous montrons que la conception a rendu nécessaire la production de nouvelles connaissances, mais aussi la diversification des ressources et des compétences habituellement mobilisées. Ce travail enrichit les méthodes de conception d'outils d'aide à la décision en montrant comment l'articulation des 3 étapes permet de sortir du paradigme qui domine la fertilisation azotée depuis des décennies et d'élaborer un outil palliant les défauts des outils actuels.

Title: Innovative design of a method for managing nitrogen fertilization: combining diagnosis of uses with participatory workshops and modeling

Keywords: Winter wheat; Test of use; C-K theory; Nitrogen use efficiency; Azodyn; Viability

Abstract: Decisions about nitrogen fertilizer application on wheat have, for the last 40 years, been based on the balance sheet method, with the following underlying principles: non-limiting nitrogen nutrition throughout the crop cycle, and independent estimation of the various terms of the equation, to characterize soil nitrogen supply and plant nitrogen needs. Environmental pollution, changes in the qualitative requirements of the market and difficulties implementing this method have raised questions about whether it might be appropriate to switch to new ways of managing nitrogen fertilizer. We developed a new method meeting the diverse constraints relating to nitrogen use, making the best use of available knowledge and easily applicable by users, through a 3-steps innovative design approach: a diagnosis of the use of current tools, a design phase including design workshops, production of new knowledge, a model-based prototyping, and the testing of a prototype method.

The diagnosis of uses identified several barriers to the implementation of the balance sheet method, including the need to set a target yield. This directed the design phase towards the exploration of new ways of managing nitrogen fertilizer that did not require the fixing of a target yield. The method developed is based on the regular monitoring of plant nitrogen nutrition, the toleration of periods of nitrogen deficiency that are not prejudicial and the use of decision rules taking weather conditions at the time of nitrogen application into account.

This design required the generation of new knowledge and a diversification of the resources and skills usually mobilized. This work enriches the methods for designing decision support tools and shows how a combination of 3 steps can be used to develop a tool for managing nitrogen fertilizer applications completely different from the dominant paradigm of the last 40 years, and compensating the defects of current methods.

