



HAL
open science

Adaptation d'un modèle de culture et conception d'un modèle de décision pour la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur

Solenne S. Guillaume

► **To cite this version:**

Solenne S. Guillaume. Adaptation d'un modèle de culture et conception d'un modèle de décision pour la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur. Sciences agricoles. Institut National Polytechnique de Toulouse - INPT, 2011. Français. NNT : 2011INPT0027 . tel-02806610

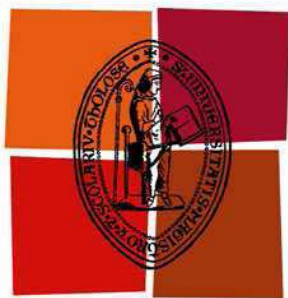
HAL Id: tel-02806610

<https://hal.inrae.fr/tel-02806610>

Submitted on 9 Oct 2023

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.



Université
de Toulouse

THÈSE

**En vue de l'obtention du
DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE**

Délivré par :
Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :
Agrosystèmes, Ecosystèmes et Environnement

Présentée et soutenue par :
Solenne GUILLAUME

le : 31 mars 2011

Titre :

Adaptation d'un modèle de culture et conception d'un modèle de décision pour la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur

JURY

BARET Frederic (INRA, Directeur de recherche), GARY Christian (INRA, Directeur de recherche), GATE Phillippe (Arvalis-Institut du Végétale, Directeur Scientifique), GUERIF Martine (INRA, Directrice de recherche), JUSTES Eric (INRA, Ingénieur de Recherche), MASTRORILLI Marcello (CRA-CSA, Directeur de recherche)

Ecole doctorale :
Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (SEVAB)

Unité de recherche :
UMR INRA-ENSAT 1248 AGIR

Directeur(s) de Thèse :
Eric JUSTES et Jacques-Eric BERGEZ

Rapporteurs :
BARET Frederic, GARY Christian, MASTRORILLI Marcello

*A mon père,
Parti bien trop tôt,
Avant de lire ces quelques pages.*

Il est bien tard

Tu sais, ce soir il est bien tard.
Si nous parlions des autres...
Nous deux, c'est le plaisir blafard
Et puis... et puis rien d'autre...

Peut-être une impulsion,
Ton corps par effraction,
Avec un peu de charité
En courtoise finalité...
Si tard, pour parler défaillance
Ce soir, jouons la bienveillance...

L'écorce des mots, 2003
Lionel Guillaume (1926-2007)

« Un homme marche sur une terre nue et grossièrement écroûtée. Il y a dix mille ans. Plusieurs glaciations l'ont meurtri mais, peu à peu, du sud vers le nord, un réchauffement du climat l'a fait se redresser. Il porte noué à l'épaule un sac gonflé de graines, dans lequel il puise au rythme de son pas. Des semences qu'il envoie devant lui comme un sacrifice. Ferveur et amplitude du mouvement. Sans doute, avec la prière, le premier acte de foi de l'humanité. La confiance dans le ciel et la terre. L'espoir que de chaque grain, minuscule intercesseur entre le sol et le soleil, lèvera un épi. »

L'homme de terre, 1993
Eric Fottorino

Dernière phase de la rédaction, et première phase de lecture : celle des remerciements. Si certains disent qu'il s'agit de la phase la plus ardue (à écrire) il me semble tout de même qu'il s'agit de la phase la plus agréable (à écrire et surtout à lire !).

Je commencerai par les remerciements institutionnels d'usage. Ainsi je remercie Arvalis Institut du Végétal et le Ministère de l'Enseignement et de la Recherche d'avoir financé ma bourse de thèse au travers d'un dispositif CIFRE mis en œuvre par l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie. Je remercie également l'INRA de m'avoir accueilli dans l'une de ces UMR, en l'occurrence l'UMR AGIR de Toulouse où j'ai réalisé mes travaux.

Je peux désormais remercier mes collègues de travail.

Qu'aurait été cette thèse sans ses deux directeurs Eric Justes et Jacques-Eric Bergez ! Ils ont eu la lourde tâche d'encadrer ces travaux et la thésarde qui va avec ! Je vous remercie sincèrement pour l'engagement que vous avez montré, pour les conseils que vous m'avez donnés, pour la disponibilité que vous avez toujours su trouver. Merci à vous deux d'avoir su vous adapter à mon discours bien souvent chaotique voire incompréhensible (même pour moi !), à mes nombreuses hésitations et doutes et aussi merci d'avoir su être d'accord entre vous et de m'avoir orientée vers une seule et même direction. Merci JEB de t'être progressivement interdit de mettre des « bof!!! » et des « mouai... » dans tes commentaires. Merci Eric d'avoir rempli ce verre que j'ai vu à moitié vide de nombreuses fois au cours de ces trois années. Je vous souhaite désormais tout de bon dans votre carrière.

Je remercie, par ordre alphabétique, les membres de mon jury : Frederic Baret, Christian Gary, Phillippe Gate, Martine Guérif, Marcello Mastrorilli qui m'ont considérablement aidé pour la préparation de la soutenance en acceptant d'être les rapporteurs ou les examinateurs de ma thèse.

J'en profite pour remercier les personnes qui ont essuyé les plâtres de mes blancs de thèse et qui m'ont apporté de nombreux conseils pour avoir un message clair et positif le jour J. Elles se reconnaîtront.

Je remercie les personnes de mon comité de pilotage : Nadine Brisson, Phillippe Debaeke, Jean-Marc Deumier, Phillippe Gate, Pierre Martre, David Makowski qui ont fortement contribué à la réalisation d'un travail cohérent.

Je remercie les membres de mon comité technique Philippe Braun, Alain Bouthier, Philippe Burger, Pierre Castillon, Jean-Marc

Deumier, Bernard Lacroix, Jean-Marie Nolot, Daniel Wallach, qui m'ont permis de mettre le pied à l'étrier en début de thèse en me fournissant les données expérimentales et me donnant des pistes pour les analyser.

Je remercie d'ailleurs les personnes avec qui je n'ai pas travaillé mais sans qui je n'aurais pas pu réaliser cette thèse : les techniciens de l'INRA et d'Arvalis Institut du Végétal qui ont mis en place et suivi les dispositifs expérimentaux mobilisés au cours de ces travaux.

Je remercie les membres de l'UMT EAU et plus particulièrement les deux animateurs Jacques-Eric Bergez et Bernard Lacroix qui m'ont régulièrement donné l'occasion de présenter mes travaux devant des personnes provenant d'horizons différents.

Je remercie globalement tous les membres des mes équipes d'accueil MAGE et VASCO pour les conseils et les discussions, ainsi que tous les membres de l'UMR.

Merci à Céline Bruzeau d'avoir accepté de réaliser son stage de fin d'études sur le sujet que je proposais. Sans ton implication, une grande partie de cette thèse n'aurait pu exister.

J'en profite pour remercier les ingénieurs régionaux d'Arvalis qui ont participé à la réalisation des enquêtes en exploitation : Michel Bonnefoy, Stéphane Jezequel, Jean-Luc Moynier et Sophie Vallade.

Merci à Inaki Garcia de Cortazar Atauri pour son travail réalisé sur les formalismes. Malheureusement je n'ai pas eu le temps de refaire ce que tu as fait. J'ai beaucoup apprécié échanger avec toi.

Que serais-je devenu sans les équipes AGROCLIM et EMMAH d'Avignon ? Merci à Marie Launay et Dominique Ripoché pour leur coup de pouce sur l'utilisation et le code de ce monstre qui est STICS. Merci à Samuel Buis et Patrice Lecharpentier pour leur disponibilité et leur impressionnante efficacité quant à résoudre mes « nombreux » messages rouges d'OptimiSTICS (maintenant je peux vous le dire, je vous en ai tout de même un peu voulu pour « ce bug que vous avez volontairement introduit dans le programme pour optimiser le temps de calcul » grrrrrr !!!!!).

C'est maintenant que je vais remercier celui sans qui 1) nous n'aurions pas comparé trois méthodes de calibration et 2) je ne me serai pas rendue compte que j'étais en train de publier des résultats complètement bidons : le statistologue de toute une génération d'agronomes : Daniel Wallach. Merci de m'avoir fait entrer dans les abîmes du monde de l'estimation de paramètres. A toi aussi je t'en ai aussi un peu voulu ce 1^{er} avril où tu es venu me demander pourquoi la variance de toutes les variables cibles était identique (grrrrrr !!!!!)... Merci de t'en être rendu compte. Un bon travail d'équipe pour le

coup. Je te souhaite tout de bon pour cette retraite (Si tu comptes la prendre un jour !!!).

Un grand grand MERCI à mes deux collègues de galère : Julie Soudais et Caroline Gibert. Nos discussions sur le ça veut dire quoi « big_vector(indices) exceeds matrix dimensions » ? où est-ce qu'on trouve la variable slrach(z) ? T'utilises quoi toi ? : Codebeso=1 ou codebeso=2 ? C'est quoi déjà Laitransrad ?... m'ont beaucoup apporté dans la compréhension de ce modèle et m'ont aidé à ne pas trop flancher. Si l'INRA a besoin d'une équipe de service après vente pour STICS ou OptimiSTICS, je pense qu'à nous trois on peut apporter quelque chose.

Un autre grand merci à Jerome Dury sans qui j'en serai peut être revenu au papier millimétré pour faire mes graphiques en couleur!!!. Merci, entre autre, de m'avoir initié à R.

Merci à Laurent Bedoussac de m'avoir rappeler ce qu'était un vrai champ de blé dur. Grâce à toi, j'ai aussi appris que je faisais de la réalité virtuelle (et bé oui m'sieurs dames ça existe !!!).

Je remercie tous les ouvriers de la recherche que représente le corps des thésards, post-doc et CDD, sans qui la recherche n'existerait plus aujourd'hui et sans qui ces trois années m'auraient semblées bien moins agréables. Par ordre chronologique et pour ceux/celles qui n'ont pas déjà été nommé/e/s: Laure Hossard, Lucie Clavel, Clémentine Allinne, Toky Ratak..... (désolé Toky, j'ai pas réussi à apprendre le Malgache), Marine Blouin, Myriam Desanlis, Virginie Thebaud, Jérôme Thiard, Arnaud Bensadoun, Hugh March . Là je me dis que j'en oublie certainement. Je remercie aussi ceux qui ont réussi à passer de l'autre coté de la force : Guillaume Martin, Marion Casagrande et Magali Willaume pour leur conseils et leur vision sur la thèse et la recherche.

Comment ne pas remercier les membres de la place Areski qui se reconnaîtront. Ces poses cigareto-syndicalo-bayesio-caféinées m'ont permis de m'aérer l'esprit (si si!), de tuer les miasmes accumulés dans mon bureau, et de changer de lignes d'horizon (si nécessaire quand on passe plus de 8h par jour devant un écran !).

Je remercie Joule et Beauvois d'avoir écrit leur « petit traité de manipulation a l'usage des honnêtes gens » dont la lecture m'a permis de mettre un mot sur le gouffre dans lequel je commençais à tomber : la théorie du piège abscon. Cette théorie rappelle qu'à partir du moment où une personne a décidé de faire quelque chose par sa propre volonté, qu'elle a un peu d'argent et surtout du temps à y consacrer, elle continuera dans la voie choisie même si elle est sans issue... Si je crois que cette théorie peut s'appliquer à beaucoup d'entre nous.

Je remercie mes amis qui ont suivi (subi ?) mes états d'âmes pendant trois ans : Sof, Lulu, Gmartin, kruskovic, Josy + ceux déjà cités (qui j'espère, se reconnaîtront), + tous les autres qui ne liront jamais ces lignes. Un énorme merci à Manu et Jean-Jacques qui ont toujours été là, qui plus est, au moment le plus dur de ces trois ans.

Je remercie Eric et Marie de s'être débarrassé de leur 305 qui est devenue mon carrosse. J'ai pu ainsi retrouver chaque jour Dodo et mes poules. Merci Dorine pour ton accueil et pour ta convivialité qui m'ont apporté une deuxième vie de fin de journée.

Enfin, je remercie les deux personnes sans qui vous ne seriez pas en train de lire ces lignes : mes parents, pour leur intelligence humaine, pour m'avoir toujours soutenue et encourager dans mes choix.

Je remercie mon père qui tout au long de ma thèse m'a écoutée et aidée à prendre du recul sur mon travail. Sache que, bien malgré toi, tu y es parvenu.

Je remercie ma mère, cette femme formidable à qui je dois tant. Tu m'as appris à ne jamais baisser les bras, qu'il y avait toujours le beau temps après la pluie, et qu'il fallait être débrouillarde dans ce monde. Je crois que cela m'a bien servi pour aller au bout de cette thèse.

Je remercie ma famille et ma belle-famille et plus particulièrement les femmes (désolée les gars mais vous êtes en bien faible minorité), jeunes et moins jeunes, pour votre force, votre courage et votre générosité. J'ai, à l'issue de cette expérience une pensée toute particulière pour l'homme de lettre qu'était mon papy et pour l'homme de terre qu'était mon grand-père, partis eux aussi avant de voir l'achèvement. Il me semble qu'en rédigeant une thèse en agronomie, j'ai récupéré un peu de chacun de vous deux.

Enfin, je remercie Monsieur Jean Yann de l'ADEAR de l'Aude, pour tous les kilomètres que tu as parcourus pour me supporter durant ces trois ans de thèse. « Allez ! Tu le sais ça ! ☺ ». Merci.

Et bien voilà, il est temps de mettre un point final à trois ans et trois mois de travail.

A vous maintenant de lire la suite.

LE QUIZZ DU GRAND AFTER Spécial dédicace à GMartin et Daniel Riollo

Ce questionnaire a été réalisé avec l'aide de mon fidèle compagnon le jour où j'ai envoyé ma thèse aux rapporteurs. N'y voyez aucun esprit malveillant mais plutôt le vent de la libération qui m'a envoûté le jour où ces quelques 191 pages ont fini d'être rédigées / corrigées / reredigées / recorrigées / rerere...

Que toutes les personnes citées (à l'exception d'une seule que je pense vous identifierez) soient sincèrement remerciées pour leur participation.

Qui comprend tout ce qu'il y a dans STICS ?

- Appelez-moi si vous le/la connaissez

Qui lisait vraiment tous les documents que je rédigeais ?

- Jacques-Eric Bergez
- Jean-Marc Deumier
- Eric Justes
- Bernard Lacroix
- Personne

AGIR ça veut dire quoi ?

- Agriculture Généralement Irresponsable
- Agrosystème Innovation et mon préféré Ruralité
- Réfléchir

Qui a les plus belle chaussette de l'unité ?

- JEB
- JEB
- JEB

Qui est le plus fair ?

- Jacques-Eric Bergez
- Eric Justes
- Guillaume Martin

Qui maîtrise le code informatique dans l'UMR ?

- Jacques-Eric Bergez
- Jérôme Dury
- Eric Justes

Qui est la plus à l'ancienne ?

- Lulu

Qui sont les plus futées des chercheuses ?

- Marion Casagrande
- Caroline Gibert
- Magali Willaume

Qui est le favori des techniciens ?

- El Bedou

Qui vole le mieux dans l'R

- Jérôme Dury
- David Robelin

Qui a le plus bel accent anglo-saxon dans l'unité ?

- Michel Duru
- Lulu
- Dany Wallach

Qui a le plus bel accent tout court ?

- Dodo
- Lulu
- Manu
- Ma grand-mère

Qui est le plus gros taxeur/se de la place Areski ?

- Abde
- Je n'en vois pas d'autres à part moi

Qui était là pour me régler l'imprimante le jour où j'ai imprimé ma thèse ?

- Areski

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	3
1 CONTEXTE DE PRODUCTION DU BLE DUR	5
1.1 UNE PRODUCTION FRANÇAISE LOCALISEE.....	5
1.2 RENDEMENT ET QUALITE DES GRAINS : DEUX CARACTERISTIQUES RECHERCHEES PAR LES ACTEURS DE LA FILIERE.....	6
1.3 IRRIGATION ET FERTILISATION : DEUX LEVIERS D'ACTION POUR L'AGRICULTEUR.....	7
1.4 UN CONTEXTE DE PRODUCTION EN MUTATION.....	10
2 LES MODELES EN AGRONOMIE	13
2.1 LA SIMULATION POUR EVALUER ET CONCEVOIR DE NOUVELLES PRATIQUES CULTURALES	13
2.2 TYPOLOGIE DES MODELES DE CULTURE	15
2.3 LES QUALITES RECHERCHEES D'UN MODELE DE CULTURE.....	17
2.4 LA MODELISATION APPLIQUEE AU BLE DUR	17
2.5 LA MODELISATION BIODECISIONNELLE	18
3 PROBLEMATIQUE DE RECHERCHE	20
3.1 POSITIONNEMENT DU PROBLEME.....	20
3.2 QUESTIONS DE RECHERCHE	22
3.3 STRATEGIE DE RECHERCHE.....	23
3.4 ORGANISATION DU MANUSCRIT.....	29
PARTIE I: ADAPTATION DU MODELE STICS A DIFFERENTS CULTIVARS DE BLE DUR.....	31
CHAPITRE 1 DESCRIPTION DU MODELE ET DE L'OUTIL D'OPTIMISATION	33
THE STICS CROP MODEL AND ASSOCIATED SOFTWARE FOR ANALYSIS, PARAMETERIZATION AND EVALUATION.....	34
1.1 Introduction.....	34
1.2 The STICS model	35
1.3 The OptimiSTICS software	39
CHAPITRE 2 PARAMETRAGE ET EVALUATION DU MODELE STICS POUR DIFFERENTS CULTIVARS DE BLE DUR 49	
METHODOLOGICAL COMPARISON OF CALIBRATION PROCEDURES FOR DURUM WHEAT PARAMETERS IN THE STICS MODEL	50
2.1 Introduction.....	50
2.2 Materials and methods.....	52
2.3 Results.....	60
2.4 Discussion.....	69
2.5 Conclusions.....	71
CHAPITRE 3 MODIFICATION DU FORMALISME INITIAL D'ACCUMULATION DE L'AZOTE DANS LES GRAINS 75	
IS THE CHANGE OF THE STICS FORMALISM FOR GRAIN N ACCUMULATION SUFFICIENT TO IMPROVE THE SIMULATION OF GRAIN N CONCENTRATION?	76
3.1 Introduction.....	76
3.2 Material and Methods	78
3.3 Results.....	84
3.4 Discussion and conclusion.....	95

PARTIE II :PRATIQUES ET DECISIONS RELATIVES A L'IRRIGATION ET A LA FERTILIZATION AZOTEE	99
CHAPITRE 4 ELABORATION DU MODELE CONCEPTUEL DES DECISIONS D'IRRIGATION ET DE FERTILISATION AZOTEE.....	101
ANALYSING FARMING PRACTICES TO DEVELOP A CONCEPTUAL MODEL OF FARMERS' DECISION-MAKING PROCESSES FOR NITROGEN FERTILIZATION AND IRRIGATION ON DURUM WHEAT	102
4.1 Introduction.....	102
4.2 Material and methods.....	104
4.3 Results.....	108
4.4 Discussion and conclusions.....	120
CHAPITRE 5 EVALUATION PAR SIMULATION DE STRATEGIES DE FERTILISATION AZOTEE ET D'IRRIGATION DU BLE DUR	125
5.1 Introduction.....	125
5.2 Matériel et méthodes.....	126
5.3 Résultats	131
5.4 Discussion et conclusion.....	136
CONCLUSIONS, DISCUSSION ET PERSPECTIVES	139
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	151
Liste des abreviations	161
Liste des figures.....	163
Liste des tableaux	165
ANNEXES.....	167
ANNEXE I : PRESENTATION DES FORMALISMES MOBILISES DANS LES DIFFERENTS MODELES DE CULTURE ADAPTES AU BLE TENDRE.....	169
ANNEXE II : LISTE DES PARAMETRES OBTENUS AVEC LA PROCEDURE I3.....	182
ANNEXE III : GUIDE D'ENTRETIEN POUR LA REALISATION DES ENQUETES DE PRATIQUES.....	189
ANNEXE IV : EXEMPLE DE MONOGRAPHIE	199

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

1 Contexte de production du blé dur

1.1 Une production française localisée

Le blé dur (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) se distingue du blé tendre (*Triticum aestivum* L. subsp. *aestivum*) par la composition protéique de ses grains qui lui confère des qualités technologiques adaptées pour la transformation en pâtes alimentaires et en semoule de couscous. La principale zone de consommation mondiale de blé dur se situe en Méditerranée et plus particulièrement au Maghreb et en Italie où l'alimentation est traditionnellement basée sur ces produits transformés. L'Union Européenne (UE) est la première région productrice au niveau mondial devant le Canada et les Etats-Unis. La France est, avec l'Espagne, le deuxième producteur européen derrière l'Italie en termes de quantité et le premier en termes de productivité à l'hectare (FranceAgriMer, 2010; FranceAgriMer, 2010). Depuis 2004, la production annuelle française se stabilise à deux millions de tonnes produits sur près de 450 000 hectares (Figure 1). Sur ces deux millions de tonnes, 700 000 sont à destination des industriels français tandis que les 1.3 millions de tonnes restantes sont disponibles pour l'exportation vers les pays de l'UE (Italie, Allemagne et Espagne) et les pays tiers, et notamment l'Algérie (FranceAgriMer, 2010).

Contrairement au blé tendre, dont la culture se retrouve sur l'ensemble du territoire, la production française de blé dur se localise dans cinq bassins de production : la région Midi-Pyrénées, la région Languedoc-Roussillon et la région PACA ainsi que les régions Centre et Ouest-Océan autour de Poitiers et Nantes. Plusieurs éléments permettent d'expliquer cette répartition.

Un premier élément relève de l'organisation de la filière de transformation et de commercialisation. Dans les années 80, une concentration des industries semoulières s'est opérée autour des centres de consommation et d'exportation afin de faciliter le transport vers les pays importateurs (Le Bail, 2001). La production s'est alors développée autour des industries de transformation et des centres d'exportation comme le port de Sète, Marseille ou Nantes.

Le second élément est d'ordre pédo-climatique. Les conditions climatiques rencontrées dans le Sud-Est de la France qui se caractérisent par des précipitations faibles associées à des températures élevées rendent difficile la culture d'autres céréales trop sensibles à la sécheresse. Le blé dur est donc perçu comme une céréale alternative permettant de supporter les conditions extrêmes rencontrées dans ces régions.

Le dernier élément permettant d'expliquer cette répartition relève de la politique agricole avec la mise en place à partir de 1993 d'une prime spécifique liée à la production de blé dur dans les zones de production du Sud de la France. Dans ces régions, déclarées 'zones traditionnelles', la culture du blé dur devient plus intéressante économiquement pour les agriculteurs que la culture du blé tendre.

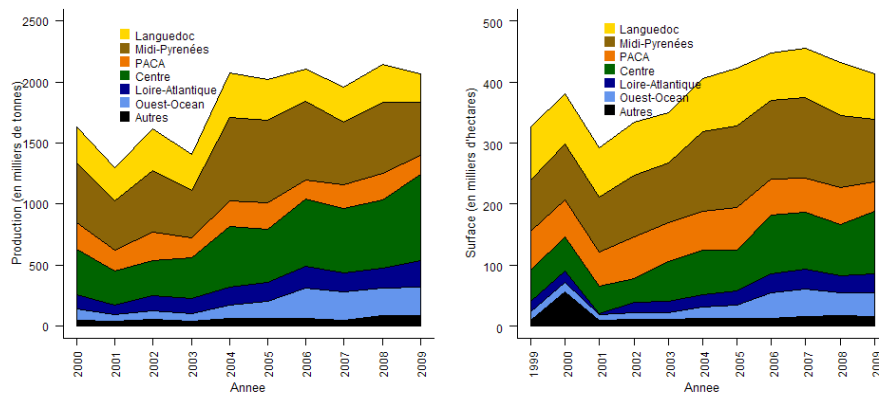


Figure 1 : Répartitions régionales des productions de blé dur et surfaces cultivées en France (source : FranceAgriMer, 2010)

1.2 Rendement et qualité des grains : deux caractéristiques recherchées par les acteurs de la filière

L'alimentation humaine est le débouché exclusif de la production de blé dur qui se doit donc de répondre aux attentes des transformateurs industriels. Pour assurer une fermeté et une viscoélasticité élevées, les semoules de blé dur destinées à la fabrication de pâtes doivent avoir une teneur en protéines élevée (Lerner *et al.*, 2006) ainsi qu'un taux de mitadin inférieur à 20%. Le mitadinage est un accident physiologique intervenant pendant la phase de remplissage des grains qui se traduit par une proportion de grains farineux importante et un rendement semoulier plus faible. Il est corrélé à des teneurs en protéines faibles (Robinson *et al.*, 1979 ; Samson et Desclaux, 2006).

La couleur du grain, l'indice de gluten et le niveau de mycotoxines font aussi partie des caractéristiques recherchées par les transformateurs et des producteurs (Di Fonzo *et al.*, 2000).

Le prix payé à l'agriculteur dépend principalement du rendement, auquel s'ajoute une bonification pour la teneur en protéines et une pénalité pour des taux de mitadin supérieur à 20%. La teneur en protéines des grains est le ratio entre la quantité d'azote et la des grains multiplié par un coefficient de 5.7. Elle est dépendante des facteurs génétiques,

agronomiques et pédo-climatiques intervenant dans l'élaboration du rendement en grain ainsi que dans l'absorption d'azote par la culture (Rao *et al.*, 1993 ; Di Fonzo *et al.*, 2000 ; Rharrabti *et al.*, 2003 ; Araus *et al.*, 2003 ; Garrido-Lestache *et al.*, 2005 ; Arduini *et al.*, 2006).

La stratégie de conduite de la culture mise en place par l'agriculteur contribue à l'atteinte de ses objectifs de production en termes de quantité et de qualité. Cette stratégie comprend le choix de la variété, la conduite de la fertilisation, la conduite de l'irrigation et les choix de protection sanitaire. Le choix de la variété, au travers d'une capacité d'absorption d'azote et d'un potentiel de rendement différents (Arduini *et al.*, 2006), est un des leviers permettant à l'agriculteur d'atteindre un niveau de protéine cible. La protection phytosanitaire, en réduisant les pertes de rendement liées à la présence de ravageurs, les risques de maladies affectant la qualité et la compétition avec les adventices, est un élément important dans l'atteinte des objectifs. En France, et notamment dans le Sud, l'eau et l'azote sont les principaux facteurs limitant la production. Un déficit d'alimentation en eau et/ou azote a de multiples conséquences sur le fonctionnement de la culture et la qualité du produit fini qui dépendent du moment, de la durée et de l'intensité du déficit (Gonzalez-Dugo *et al.*, 2010). Pour limiter les risques de pertes de production engendrées par des conditions hydriques et /ou azotées défavorables, l'agriculteur dispose de plusieurs moyens d'action, parmi lesquels la fertilisation azotée et l'irrigation.

1.3 Irrigation et fertilisation : deux leviers d'action pour l'agriculteur

Intérêts et limites de la fertilisation azotée

Les pratiques de fertilisation azotée ont pour but de mettre à disposition les quantités d'azote nécessaires pour satisfaire les besoins de la plante non satisfaits par les fournitures du sol. On observe une relation positive entre la quantité d'azote apportée, le rendement et la teneur en protéines (Saint Pierre *et al.*, 2008 ; Haberle *et al.*, 2008) jusqu'à un maximum, appelé optimum, où le rendement n'augmente plus alors que les protéines continuent de s'accumuler (Gate, 1995 ; Fowler, 2003). L'augmentation de la fertilisation au-delà de l'optimum entraîne une augmentation des quantités d'azote minéral du sol à la récolte. Pour le blé dur, on considère que l'objectif de fertilisation azotée est d'aboutir à un rendement optimum et à une teneur en protéines de l'ordre de 14% exigée par la filière (Desclaux *et al.*, 2005), tandis que l'objectif pour le blé tendre est fixé entre 11 et 12% de protéines. Les

besoins en azote pour le blé dur sont estimés à 3.5 kg d'azote par quintal contre seulement 3 kg d'azote par quintal pour le blé tendre panifiable (Gate, 1995).

La période d'apport va influencer fortement la croissance de la plante et les caractéristiques des produits récoltés. Alors que les apports précoces favorisent la croissance en biomasse et la mise en place des organes participant à l'augmentation du rendement (nombre d'épis et nombre de grains par m²), les apports tardifs favorisent le transfert de l'azote vers les grains et la teneur en protéines (Jenner *et al.*, 1991 ; Wuest et Cassman, 1992 ; Ottman *et al.*, 2000. En augmentant la teneur en protéines des grains, la fertilisation a de plus un effet bénéfique sur la baisse du taux de grains mitadinés (Robinson *et al.*, 1979).

Intérêts et limites de l'irrigation

Dans le Sud de la France (Midi-Pyrénées, PACA, Languedoc-Roussillon), le niveau de production des blés durs, semés en automne, est souvent limité par un déficit en eau du sol du fait de faibles niveaux de précipitation, associés à de forts niveaux d'évapotranspiration (Debaeke et Hilaire, 1995). Dans les régions plus septentrionales (Poitou-Charentes, Centre) les déficits peuvent aussi apparaître du fait des faibles réserves en eau du sol. L'irrigation de complément est alors un levier d'action permettant de réalimenter la culture en eau afin de limiter le déficit hydrique (Debaeke et Hilaire, 1995).

L'irrigation peut avoir comme second objectif de solubiliser l'azote minéral de l'engrais et de le rendre disponible pour l'absorption par la plante en augmentant les flux de diffusion et de transfert vers les horizons du sol explorés par les racines (Slukhai et Zhabitski, 1970 in Guttieri *et al.*, 2005).

Si la pratique de l'irrigation présente un certain nombre d'avantages, elle peut, si elle est mal maîtrisée, induire des effets indésirables. Une humidité excessive à l'intérieur du couvert est le terrain favorable pour le développement de maladies (Olesen *et al.*, 2000). Les risques de fusariose augmentent avec une humidité croissante à la floraison et pendant la période qui lui succède (Buerstmayr *et al.*, 2000; Cowger *et al.*, 2009).

Sans pour autant être préjudiciable au rendement, une irrigation pendant la montaison favorisant l'élaboration d'un nombre de grains par m² élevé peut se révéler inefficace si des températures élevées interviennent pendant le remplissage (Monotti *et al.*, 1982 in Debaeke et Hilaire, 1995). Les grains ne seront pas remplis au maximum de leur potentiel et les gains de rendement espérés par l'irrigation de complément risquent d'être limités.

La nécessité d'une gestion conjointe des actes techniques

La disponibilité de l'azote minéral du sol est fortement influencée par l'état hydrique du sol. Un apport d'engrais azoté peut se révéler inefficace si celui-ci est opéré alors que les

conditions hydriques ne permettent pas le transport vers la zone d'absorption racinaire. Le risque de rencontrer ces conditions est particulièrement élevé pour les apports réalisés en fin de cycle, autour de la floraison. Ainsi, une fertilisation azotée sous forme solide (ammonitrate, perlurée) au moment de la floraison peut ne pas avoir l'effet escompté sur l'augmentation des quantités d'azote absorbées et la teneur en protéines du grain si le sol n'est pas suffisamment humide. A l'opposé, une irrigation excessive par rapport aux besoins de la plante risque d'induire un drainage de l'eau en profondeur, entraînant alors les éléments en solution en dehors de la zone d'exploration des racines voire même vers les nappes souterraines (Robinson *et al.*, 1979 ; Behera et Panda, 2009). Ces pertes ont pour conséquences de réduire la quantité en éléments disponibles pour la plante et d'entraîner une pollution des eaux souterraines. De plus, elles induisent une perte économique pour l'agriculteur puisque l'azote et l'eau apportés ne sont pas valorisés par la plante.

Une irrigation non limitante associée à une fertilisation excessive génère une biomasse luxuriante sensible au phénomène de verse (Begg et Turner, 1976 ; Robinson *et al.*, 1979). La verse en début de remplissage des grains limitera le rendement à travers une réduction de l'assimilation de carbone, qui contribue à 80% de l'accumulation de carbone dans le grain (Gate, 1995).

Une irrigation et une fertilisation non limitantes pendant la période de montaison favorisent la croissance de la plante et de ce fait, la mise en place des organes de stockage. Elles accélèrent dans le même temps l'épuisement des ressources disponibles. Si les conditions hydriques pendant le remplissage ne permettent pas de subvenir aux besoins « excessifs » de la plante et que l'irrigation n'est plus envisageable à cette période de l'année (cultures concurrentes pour l'irrigation, restriction de l'usage de l'eau...), il s'ensuit une altération du remplissage en carbone et du rendement final par rapport au potentiel défini à floraison (Latiri-Souki *et al.*, 1992). Les conditions printanières ayant cependant permis une absorption d'azote importante, la teneur en azote des grains se verra positivement affectée (Eck, 1988).

Lorsque la fertilisation azotée ne permet pas de subvenir aux besoins générés par l'irrigation pendant la phase de montaison, la plante peut subir un stress azoté préjudiciable à la formation du nombre de grains (Latiri-Souki *et al.*, 1992 ; Abbate *et al.*, 1995 ; Jeuffroy et Bouchard, 1999 ; Demotes-Mainard et Jeuffroy, 2004) et à la quantité d'azote absorbée par la plante (Lemaire et Gastal, 1997). Si les conditions de nutrition sont ensuite favorables pendant la période de remplissage des grains, la culture peut compenser, dans une certaine limite fixée par la variété, la perte de nombre de grains par des grains plus gros. La teneur en azote des grains risque cependant d'être réduite du fait d'une réduction des quantités d'azote absorbées

pendant la montaison et par un effet de dilution. Si au contraire, les conditions pendant la phase de remplissage des grains ne sont pas favorables, le rendement s'en trouvera réduit avec une conséquence sur la teneur en azote qui dépendra du niveau d'altération du processus de remplissage des grains.

1.4 Un contexte de production en mutation

Le contexte de production français doit faire face un certain nombre d'évolutions d'ordre climatique, économique, réglementaire et sociétale.

La production française se situe dans un contexte de variabilité climatique interannuelle croissante en termes de pluviométrie et de températures extrêmes. Cette variabilité engendre des conséquences directes sur les besoins en eau et en azote de la culture mais aussi sur la conduite de culture et les performances technico-économiques qui en découlent. Ainsi la campagne 2008/2009 a été marquée par des précipitations automnales élevées entraînant un retard des semis et une adaptation des variétés semées, voire un remplacement par des cultures de printemps (FranceAgriMer, 2010). Une autre conséquence de la variabilité pluviométrique observée ces dernières années est la diminution du niveau des recharges des nappes souterraines dans certaines régions. Ainsi, afin d'assurer les besoins en eau de la population, les épisodes de restrictions d'usage de l'eau à des fins agricoles sont de plus en plus fréquents.

Au niveau économique, les prix des matières premières agricoles subissent une très forte volatilité depuis plusieurs années. Si la campagne 2008 a vu les prix du blé dur s'envoler et atteindre des niveaux de 318 euros/tonne au mois de mars, ils sont retombés à 98 euros/tonne en février 2010 (INSEE, 2011). Le poste fertilisation, composé essentiellement par les engrais azotés, représente en moyenne 41% des charges opérationnelles d'un hectare de blé dur (CRA Midi-Pyrénées, 2007). L'indice des prix des engrais azotés, fortement corrélé au prix du gaz nécessaire à sa fabrication, lui-même indexé sur le prix du pétrole, est en constante augmentation depuis 2000 (AGRESTE, 2008a ; AGRESTE, 2010). Un rapport du Conseil Général du Génie Rural des Eaux et Forêts (CGGREF) fait état d'un coût d'irrigation représentant en moyenne 20% du coût de production des cultures irriguées (Bergez *et al.*, 2001 ; Levy *et al.*, 2005). Cependant, les coûts de l'irrigation supportés par les irrigants sont quant à eux très variables en fonction de la région, des systèmes d'accès à l'eau et du matériel utilisé (Amigues *et al.*, 2006 ; Deumier *et al.*, 2008).

La production de blé dur a longtemps bénéficié d'avantages économiques par rapport au blé tendre au travers d'un prix de vente généralement plus élevé et de l'instauration d'une

prime spécifique à la culture de blé dur. Cependant, le découplage des aides à la production opéré depuis 2003 et la réforme de la PAC prévue pour 2013 tendent vers une diminution de l'intervention de l'Etat en faveur de la culture de blé dur. De plus, depuis plusieurs années, on observe une diminution des prix du blé dur vers ceux du blé tendre. La maîtrise des coûts de production est un élément nécessaire pour garantir un niveau de marge satisfaisant pour l'agriculteur, qui plus est, dans un contexte économique de plus en plus incertain. Cette maîtrise passe par une adéquation entre les besoins de la plante et la quantité d'eau et d'engrais apportés pour atteindre un optimum de rendement et de teneur en protéines.

La recherche de rendements élevés à la sortie de la seconde guerre mondiale, payés à des prix élevés, et les stratégies d'assurance par l'emploi intensif d'intrants azotés bon marché qui lui ont été longtemps associées ont désormais montré leurs limites économiques et environnementales (Meynard et Savini, 2003). La demande sociétale pour une agriculture respectueuse de l'environnement est désormais de plus en plus forte. Les mouvements de protection de l'environnement placent la production agricole dans une situation où elle se doit de répondre aux exigences environnementales fixées par la société civile.

D'un point de vue réglementaire, si la législation concernant la fertilisation azotée n'a pas évolué depuis la Directive Nitrate de 1991, la législation concernant les usages de l'eau à des fins agricoles est en pleine mutation. La loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006 prévoit la création pour 2011 d'organismes unique d'irrigation pour les Zones de Répartition des Eaux. L'objectif est de définir des volumes prélevables pour l'irrigation compatibles avec les débits objectifs d'étiages des bassins versants et les autres usages de l'eau (domestiques). Ces organismes seront chargés de mutualiser les demandes de prélèvements auprès de la préfecture puis de répartir les volumes prélevables auprès des irrigants (individuels et collectifs). Cette nouvelle organisation risque d'aboutir à une réduction des volumes autorisés pour les irrigants. Ceci aura certainement pour conséquence une modification des assolements avec une réduction des cultures irriguées en période estivale de forte de demande, au profit des cultures de printemps ou d'hiver, et notamment du blé dur, ayant des besoins en irrigation moins importants du fait du décalage du cycle vers des périodes où les risques de sécheresse sont moindres.

Ce qu'il faut retenir

Le recours à l'irrigation et à la fertilisation azotée permet de subvenir aux besoins hydriques et azotés de la plante dans des contextes pédo-climatiques qui peuvent se trouver limitant vis-à-vis des facteurs eau et azote.

Pour être efficaces, techniquement et économiquement tout en limitant les risques de pertes à l'extérieur du système sol-plante, les apports d'eau et d'azote doivent être raisonnés en termes de quantité et de période optimales par rapport aux besoins de la culture, eux-mêmes déterminés par les objectifs de rendement et de teneur en protéines visés.

Dans un contexte de production en mutation, il est indispensable de mettre en œuvre des pratiques cohérentes vis-à-vis de la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée. Ces pratiques se doivent d'être adaptées aux conditions pédo-climatiques et réglementaires des exploitations agricoles.

Tous ces éléments encouragent à proposer des pratiques de gestion de l'irrigation et de la fertilisation azotée qui permettent de répondre aux nouveaux enjeux auxquels la production agricole doit faire face.

2 Les modèles en agronomie

L'évolution du contexte de production du blé dur français pose de nouveaux enjeux pour la recherche agronomique. Il s'agit de proposer, dans un contexte climatique, économique et réglementaire en mutation, de nouvelles pratiques culturales permettant d'assurer un revenu à l'agriculteur au travers d'une production suffisante et de qualité, en limitant les externalités négatives liées à l'activité agricole.

2.1 La simulation pour évaluer et concevoir de nouvelles pratiques culturales

D'après Milleville (1987), les pratiques culturales sont la mise en œuvre des techniques culturales par l'agriculteur. Elles sont le résultat d'une intention de faire qui est fonction de l'objectif de l'agriculteur et sont fortement marquées par les conditions concrètes de réalisation des techniques culturales (Papy, 1998). Proposer de nouvelles pratiques culturales, c'est alors proposer de nouvelles techniques culturales en prenant en compte les conditions de réalisation de ces dernières ainsi que les objectifs visés par l'agriculteur. Ceci implique la prise en compte de la dimension technique ainsi que la dimension décisionnelle de l'intervention.

La proposition de nouvelles pratiques d'irrigation et de fertilisation azotée procède d'une phase préalable d'évaluation des ces pratiques (Meynard *et al.*, 2001). En considérant dans un premier temps uniquement la dimension technique, l'évaluation des pratiques consiste à évaluer différentes techniques culturales et donc différents itinéraires techniques¹. Si la modification des pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation du blé dur a un impact direct sur la culture à l'échelle de la parcelle de blé dur, elle a aussi un impact sur les autres cultures modifiant le niveau de ressources en azote et en eau disponibles. La proposition et l'évaluation de nouvelles pratiques d'irrigation et de fertilisation azotée peut alors s'inscrire dans le cadre plus général de l'évaluation et de la conception de système de culture² (Meynard *et al.*, 2001).

¹ L'itinéraire technique est une suite logique et ordonnée des techniques mises en œuvre sur une parcelle en vue d'obtenir une production (Sébillotte, 1978).

² Système de culture : ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Un système de culture est caractérisé par la nature des cultures et leur ordre de succession, et par les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, incluant le choix de la variété (Sébillotte, 1990).

Plusieurs démarches sont à la disposition des agronomes pour accomplir ces tâches d'évaluation et de conception parmi lesquelles l'évaluation expérimentale au champ et la simulation (Loyce et Wery, 2006 ; Bergez *et al.*, 2010).

L'évaluation expérimentale au champ a pour but de tester les performances et la faisabilité d'itinéraires techniques conçus en amont, au regard de conditions pédo-climatiques variées (Loyce *et al.*, 2008). Les méthodes d'évaluation comprennent trois niveaux : une évaluation globale sur la satisfaction des objectifs assignés aux itinéraires techniques, une évaluation agronomique des facteurs expliquant la non atteinte des objectifs et une évaluation analytique des règles de décision ayant servi à la construction des itinéraires techniques.

Certaines limites restent attachées à cette méthode. L'évaluation sur la base d'observations de terrain est une activité financièrement et techniquement lourde qui limite la multiplication des situations pédo-climatiques différenciées (Aubry *et al.*, 1996 ; Rossing *et al.*, 1997). Les gammes explorées sont limitées à ce qui est techniquement réalisable du fait des moyens disponibles mais aussi, à ce que les experts et chercheurs sont en mesure de proposer et d'évaluer. De plus, la temporalité associée à ce type de démarche implique un temps relativement long entre la formulation des hypothèses de départ et leurs vérifications, ce qui limite la vitesse de diffusion des résultats. Enfin l'échelle spatiale considérée n'est pas toujours adaptée à certains aspects agronomiques qui impliquent des échelles plus vastes, comme dans le cas des dynamiques de population de ravageurs (Debaeke *et al.*, 2008).

L'évaluation et la conception de nouveaux d'itinéraires techniques ou de systèmes de cultures par simulation s'inscrit dans une démarche complémentaire à l'expérimentation (Rossing *et al.*, 1997 ; Loyce et Wery, 2006 ; Bergez *et al.*, 2010). Cette approche permet de quantifier simultanément les effets de différents facteurs sur les performances du système étudié (Boote *et al.*, 1996). La simulation, au travers de l'utilisation de modèles de culture, offre la possibilité d'explorer une gamme plus vaste de situations dans un intervalle de temps restreint (Semenov *et al.*, 2009) et permet de simuler l'effet des interactions entre le climat, le type de sol et les techniques culturales sur le fonctionnement de la culture. Elle peut permettre, en fonction du modèle de culture utilisé, d'avoir accès à une diversité d'indicateurs difficilement accessibles par expérimentation. Les modèles de culture offrent ainsi un cadre pour étudier les interactions entre les différentes variables du système.

2.2 Typologie des modèles de culture

Les modèles de culture sont une représentation simplifiée d'un système, issue d'un certain point de vue et orientée par une certaine finalité (Jeuffroy *et al.*, 2008). Ils sont constitués d'un ensemble de relations mathématiques décrivant le fonctionnement du système sol-plante en interaction avec le climat et les opérations techniques. Pour ces raisons, les modèles de culture sont aussi appelés modèles biophysiques ou encore modèles biotechniques. Les équations mathématiques, appelées formalismes, sont constituées de variables d'état, qui caractérisent l'état du système à différents pas de temps, et de paramètres, qui définissent l'intensité des relations entre les variables d'état du système (Jones et Luyten, 1998 ; Wallach, 2006a).

Modèles mécanistes et modèles empiriques

A partir de la nature des relations mathématiques introduites, on distingue généralement deux types de modèles. Les modèles mécanistes (explanatory ou process-based models) décrivent et quantifient les mécanismes et les processus qui interviennent au niveau de la plante et du sol en se basant sur la formalisation d'hypothèses concernant le fonctionnement physiologique et physique du système étudié. Les modèles empiriques (descriptive, predictive models) décrivent quant à eux l'évolution du système au travers de relations simplifiées entre les différentes variables sans fournir d'explications sur le fonctionnement biologique ou physique. Les équations décrivant les relations sont le plus souvent obtenues à partir d'ajustements statistiques entre les différentes variables d'état mesurées (Passioura, 1996 ; Hammer *et al.*, 2002 ; Jeuffroy *et al.*, 2008).

Les modèles de cultures se situent à l'interface des deux catégories présentées (Hammer *et al.*, 2002). Etant constitués d'un ensemble d'équations mathématiques formalisant les hypothèses sur le fonctionnement du système sol-plante et regroupées par processus, ils peuvent être considérés comme mécanistes. Cependant, ils peuvent intégrer des relations de type empirique entre les variables caractérisant les différents processus et peuvent être considérés empiriques (Brisson *et al.*, 2006).

Modèles spécifiques et modèles génériques

Une classification des modèles de culture existe en fonction du nombre de cultures prises en charge et des choix de formalismes opérés lors de l'élaboration du modèle de culture. Les modèles de culture spécifiques sont distingués des modèles de cultures génériques.

Les modèles spécifiques ont été développés pour la représentation de la croissance et du développement d'une culture donnée, généralement dans l'objectif de répondre à une question précise. Ils intègrent des processus spécifiques à l'espèce concernée et prennent en compte différents facteurs de production en fonction des objectifs d'application. Pour le blé tendre, de nombreux modèles ont été développés dans ce sens. Le modèle ARCWHEAT (Weir *et al.*, 1984) a été développé pour fournir un outil d'identification des facteurs limitant la production de blé tendre au Royaume Unis. Il a ensuite évolué pour intégrer un module de bilan hydrique et azoté (Porter, 1984 in Porter *et al.*, 1993). Le modèle SWHEAT a été développé pour simuler la croissance et le développement du blé tendre de printemps en conditions semi-arides (Van Keulen and Seligman, 1987 in Porter *et al.*, 1993). Le modèle SiriusQuality1 (Martre *et al.*, 2006), dérivé de SIRIUS (Jamieson *et al.*, 1998) est spécialisé dans la simulation des différentes fractions protéiques du blé tendre. Le modèle AZODYN (Jeuffroy et Recous, 1999 ; Barbottin, 2004 ; David et Jeuffroy, 2009) a été orienté pour évaluer différentes options de fertilisation sur le rendement et la teneur en protéines du blé tendre. Une version AZODYN-ORG a été spécifiquement développée pour l'agriculture biologique (David *et al.*, 2005).

Les modèles génériques se caractérisent par la description quantitative des processus biologiques qui sont communs à plusieurs cultures. Ils traitent la spécificité de chaque espèce au travers d'options de simulation et de différentes valeurs des paramètres (Wang et Engel, 2002). Le développement de tels modèles permet de mutualiser les connaissances acquises sur le fonctionnement des espèces et fournissent un cadre d'évaluation pour l'identification des convergences et des différences entre cultures (Brisson *et al.*, 2006). D'un point de vue applicatif, ils permettent de simuler des successions de cultures et sont dès lors en mesure d'évaluer les performances des systèmes de culture et non pas uniquement les performances d'un itinéraire technique. Les modèles APSIM (Keating *et al.*, 2003), CROPSYST (Stockle *et al.*, 2003), APES (van Ittersum *et al.*, 2008) et STICS (Brisson *et al.*, 2003 ; Brisson *et al.*, 2008) ont ainsi été développés dans ces objectifs.

Qu'il s'agisse des modèles spécifiques ou génériques, les différences variétales sont prises en compte au travers de paramètres génotypiques ou encore variétaux (Mavromatis *et al.*, 2001).

2.3 Les qualités recherchées d'un modèle de culture

Afin de fournir des réponses pertinentes aux questions posées, le développement d'un modèle de culture doit aboutir à l'obtention d'un modèle présentant certaines caractéristiques parmi lesquelles la précision, la sensibilité et la robustesse tiennent une place essentielle.

Pour les anglo-saxons, la précision est appréhendée au travers de deux notions : 'accuracy' et 'precision' (Willmott *et al.*, 1985). Le terme 'accuracy' fait référence à la capacité du modèle à obtenir par simulation des valeurs proches des valeurs obtenues par l'expérimentation. La 'precision' fait référence au niveau avec lequel un jeu de données simulées représente une fonction linéaire du jeu de données mesurées correspondant.

La sensibilité fait référence à la capacité du modèle à modifier la valeur simulée d'une variable d'état en réponse à la variation d'une ou de plusieurs opérations techniques ou en réponse à la variation des conditions pédo-climatiques (Jeuffroy *et al.*, 2008).

Jeuffroy *et al.* (2008) définissent la robustesse comme la capacité du modèle à ne pas être sensible aux paramètres et aux données qui ne peuvent être facilement appréhendables lors de l'utilisation du modèle. Confalonieri *et al.* (2010) considèrent qu'un modèle est robuste dans la mesure où les performances du modèle utilisé dans de nouvelles conditions sont similaires aux performances du modèle utilisé dans les conditions ayant servi à son développement. Pour Welch *et al.* (2002), il s'agit de savoir dans quelle mesure les paramètres des modèles sont valides dans d'autres conditions. La robustesse ne peut alors s'évaluer qu'au travers des conditions d'utilisation du modèle de culture.

2.4 La modélisation appliquée au blé dur

Par rapport au blé tendre, la prise en compte du blé dur dans les projets de modélisation est relativement récente. Jusque très récemment, seuls CERES-Wheat (Pecetti et Hollington, 1997), CropSyst (Pala *et al.*, 1996) et STICS (Brisson *et al.*, 2005) avaient fait l'objet d'une adaptation permettant de simuler le développement et la croissance du blé dur. Ces deux dernières années APSIM (Bassu *et al.*, 2009), SiriusQuality1 (Ferrise *et al.*, 2010) ainsi qu'un modèle adapté de SUCROS (Richter *et al.*, 2010) ont à leur tour fait l'objet d'une adaptation pour quelques cultivars de blé dur. Ces modèles de culture ont tous été initialement développés pour représenter la croissance et le développement de cultivars de blé tendre dans différents contextes pédo-climatiques. L'application de ces modèles blé tendre au blé dur a consisté en une adaptation des valeurs de paramètres relatifs à la durée de certaines phases du développement, à la surface foliaire, à l'efficacité d'interception du rayonnement ou à la

vitesse de croissance des grains. Les conclusions de ces travaux sont que la simulation d'itinéraires techniques faisant intervenir le blé dur pouvait être conduite au travers de l'utilisation d'un modèle initialement développé pour le blé tendre. Le fait que le fonctionnement du blé dur présente de nombreuses similitudes avec le blé tendre au niveau des facteurs influençant la mise en place des épis, l'élaboration du nombre de grains et leur remplissage, et que certaines relations entre les composantes du rendement du blé dur soient analogues à celles identifiées sur blé tendre justifie l'utilisation d'une approche de modélisation générique pour ces deux espèces (Latiri-Souki *et al.*, 1992 ; Meynard et Sébillote, 1994).

2.5 La modélisation biodécisionnelle

Malgré les efforts mis en œuvre dans le développement des modèles de culture, le transfert des connaissances produites par l'utilisation de ces modèles vers les utilisateurs visés (agriculteurs, agents du développement agricole) s'avère limité (Aubry, 2000 ; McCown, 2002). Une des raisons invoquées provient du fait que les opérations techniques sont souvent intégrées comme des paramètres statiques fixés *a priori* par l'agronome modélisateur et non pas comme le résultat d'un processus de réflexion sur l'état des éléments du système (Bergez *et al.*, 2010). La notion de pratique telle que définie par Milleville (1987) n'est pas intégrée et la faisabilité technique de l'intervention culturale n'est finalement pas considérée. L'analyse et la modélisation des interventions culturales mises en place par les agriculteurs ont ainsi fait l'objet d'études à partir d'observations de terrain, où les objectifs, les contraintes et les pratiques sont identifiés et formalisés. En mobilisant le concept de modèle d'action proposé par Sébillote et Soler (1988), le processus de décision est représenté par un ensemble de règles de décision hiérarchisées qui définit les modalités d'actions de l'agriculteur (Aubry *et al.*, 1998). Ces modèles n'intègrent cependant pas les aspects dynamiques du système sur lequel les décisions interviennent.

Le couplage des modèles de décision aux modèles dynamiques de fonctionnement d'une culture a donné naissance aux modèles biodécisionnels. Ces modèles intègrent ainsi la dynamique de prise de décision de l'agriculteur en réponse à l'évolution du système sol-plante. De tels modèles ont été développés pour l'irrigation du maïs, MODERATO (Bergez *et al.*, 2001), l'irrigation et la fauche des prairies (Merot et Bergez, 2010), le pâturage des prairies (Cros *et al.*, 2001), ou la gestion des interventions techniques du blé (Chatelin *et al.*, 2005). Ce dernier modèle appelé DECIBLE est dédié à l'évaluation de techniques culturales relatives au semis et à la fertilisation azotée du blé tendre d'hiver. Ces opérations techniques sont réalisées à partir de règles de décision formalisées dans un plan d'action qui représente

les objectifs visés par l'agriculteur. Les règles de décision concernent les dates et modalités de travail du sol, la date et la densité de semis, la variété ainsi que la date, la dose et le type de fractionnement de l'apport d'azote. Cet outil présente toutefois un certain nombre de limites qui limitent son développement. Tout d'abord, le modèle de culture est basé sur des relations empiriques entre les principales variables du diagnostic agronomique. Les relations entre variables de diagnostic représentent une relation statistique entre les variables estimée et non une relation fonctionnelle entre les organes de la plante. De plus, le logiciel a été développé sous DOS et n'a pas été porté sous d'autres systèmes d'exploitation. Son utilisation est donc rendue peu ergonomique sur le plan informatique. Enfin, et il s'agit peut-être d'une des caractéristiques la plus contraignante par rapport à nos enjeux, le modèle Déciblé ne simule pas les composantes de la qualité du grain comme la teneur en protéines des grains.

Ce qu'il faut retenir

Les modèles biodécisionnels, issus du couplage entre un modèle de culture et un modèle de décision, offrent un cadre pour évaluer et proposer de nouvelles pratiques d'irrigation et de fertilisation azotée pour le blé dur par simulation. Aucun modèle de culture n'a été développé spécifiquement pour le blé dur et peu d'entre eux ont été adaptés à différents cultivars de blé dur. A notre connaissance, aucun modèle de décision n'a été développé pour représenter les opérations de gestion de la fertilisation azotée et d'irrigation pour le blé dur.

3 Problématique de recherche

3.1 Positionnement du problème

L'enjeu de la thèse est de proposer un outil de simulation permettant d'évaluer et de proposer des pratiques culturales de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée pour différents cultivars de blé dur.

Le premier objectif du travail de thèse est d'adapter un modèle de culture à différentes variétés de blé dur cultivées en France. Adapter un modèle de culture consiste à définir une démarche visant à obtenir un modèle de culture précis pour la simulation des variables d'intérêt agronomiques et économiques que sont le rendement et la teneur en protéines. La démarche doit de plus conduire à l'obtention d'un modèle robuste pour différentes conditions pédo-climatiques, c'est-à-dire un modèle dont les niveaux d'erreur entre les simulations et les observations ne varient pas avec les conditions rencontrées. Enfin, dans un objectif d'évaluation de techniques culturales, la démarche doit conduire à l'obtention d'un modèle sensible à l'effet des changements de pratiques d'irrigation et de fertilisation azotée.

Les modèles de culture étant constitués d'un ensemble d'équations mathématiques, l'adaptation peut être envisagée de plusieurs façons : l'estimation des valeurs de paramètres et/ou la modification des équations (Passioura, 1996 ; Hammer *et al.*, 2002 ; Weiss et Moreno-Sotomayer, 2006).

Différentes options existent pour estimer la valeur des paramètres du modèle. La première option est l'expérimentation (Jeuffroy *et al.*, 2006). Toutefois, les paramètres des modèles de cultures sont souvent nombreux et n'ont pas toujours une signification biologique. Il est ainsi souvent impossible d'obtenir toutes les valeurs des paramètres à partir des expérimentations. En outre les valeurs des paramètres estimés à partir des expérimentations menées sur des sites et/ou années spécifiques peuvent s'avérer inadéquates quand elles sont appliquées dans d'autres conditions de croissance.

Une deuxième option consiste à estimer les paramètres à partir de la littérature. Cette option n'est possible que lorsque les paramètres ont une signification strictement biologique, ce qui n'est pas toujours le cas étant donné le caractère empirique de certaines relations, et ne doit être employée que si les paramètres ont exactement le même sens dans le modèle (Makowski *et al.*, 2006).

La dernière option est l'estimation des paramètres par des méthodes mathématiques (Mavromatis *et al.*, 2002). La méthode couramment mobilisée consiste à estimer les valeurs

des paramètres qui minimisent la différence entre la variable simulée et la variable observée au travers d'un algorithme d'optimisation. Cette procédure est définie par le terme calibration.

Les difficultés liées à l'estimation des paramètres par optimisation résident dans le fait que le nombre de paramètres inclus dans un modèle de culture dépasse souvent le nombre de variables mesurées et que la réponse du modèle à valeur d'un paramètre n'est pas toujours linéaire (Makowski *et al.*, 2006). Des effets compensatoires entre les paramètres peuvent se produire lorsque de nombreux paramètres sont estimés simultanément en utilisant des variables de réponse indirecte (Jeuffroy *et al.*, 2006). Il est donc généralement recommandé de choisir les paramètres qui ont une incidence directe sur la variable de réponse simulée et de limiter le nombre de paramètres estimés simultanément.

La complexité des modèles de culture dynamiques réside dans le fait que de nombreux processus sont simulés et interconnectés entre eux. L'hypothèse implicite derrière l'estimation des paramètres est que les processus sont correctement représentés et les interactions entre les processus sont correctement prises en compte dans le modèle de culture. Cependant, la formalisation des processus adoptée peut se révéler inappropriée ou tout du moins non satisfaisante pour tenir compte de l'effet d'un facteur particulier. Un travail de modification des formalismes peut ainsi être envisagé pour tester de nouvelles hypothèses sur le fonctionnement de la plante. Les modèles de culture représentant une entité à part entière, une attention particulière devra être portée sur la compatibilité entre les différents processus (Weiss et Moreno-Sotomayer, 2006).

Afin de proposer des pratiques culturales adaptées aux contextes des exploitations, l'enjeu de la thèse est de coupler un modèle de culture à un modèle de décision de la fertilisation azotée et de l'irrigation du blé dur. Dans cette optique, le deuxième objectif de la thèse est d'élaborer un modèle de décision de l'agriculteur vis-à-vis des pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation. Si Aubry *et al.* (1998) se sont intéressés à l'analyse des décisions de planification sur la sole de blé tendre et ont proposé un modèle de décision des interventions techniques sur la sole de blé tendre, le modèle proposé n'intègre ni les opérations relatives à l'irrigation ni les décisions relatives au pilotage de la culture. Il est donc nécessaire de construire un modèle de décision de l'irrigation et de la fertilisation azotée pour le blé dur.

3.2 Questions de recherche

L'ensemble de ces éléments m'amène à formuler ma problématique de recherche de la façon suivante : « *Quelle démarche de modélisation mettre en œuvre pour développer un modèle permettant d'évaluer et de proposer des stratégies de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation du blé dur ?* »

Cette question de recherche a été divisée en deux sous questions de recherche correspondant à chacun des objectifs présentés précédemment:

- *Quelle procédure mettre en oeuvre pour adapter un modèle de culture à différentes variétés de blé dur ?*
 - *Quelle est la démarche de calibration la plus pertinente pour obtenir un modèle précis, robuste et sensible pour différentes variétés ?*
 - *L'intégration d'un formalisme alternatif permet-elle d'améliorer les simulations d'un modèle de culture ?*
- *Quelle représentation du système décisionnel de l'agriculteur adopter en vue d'un couplage avec le modèle de culture ?*
 - *Quelles sont les pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation mises en œuvre par les agriculteurs ?*
 - *Quelles sont les contraintes rencontrées par les agriculteurs ?*
 - *Comment s'organisent ces différents éléments dans le temps ?*

3.3 Stratégie de recherche

3.3.1 Stratégie générale

Les différentes étapes constituant ma stratégie de recherche explicitées ci-dessous sont illustrées dans la Figure 2 .

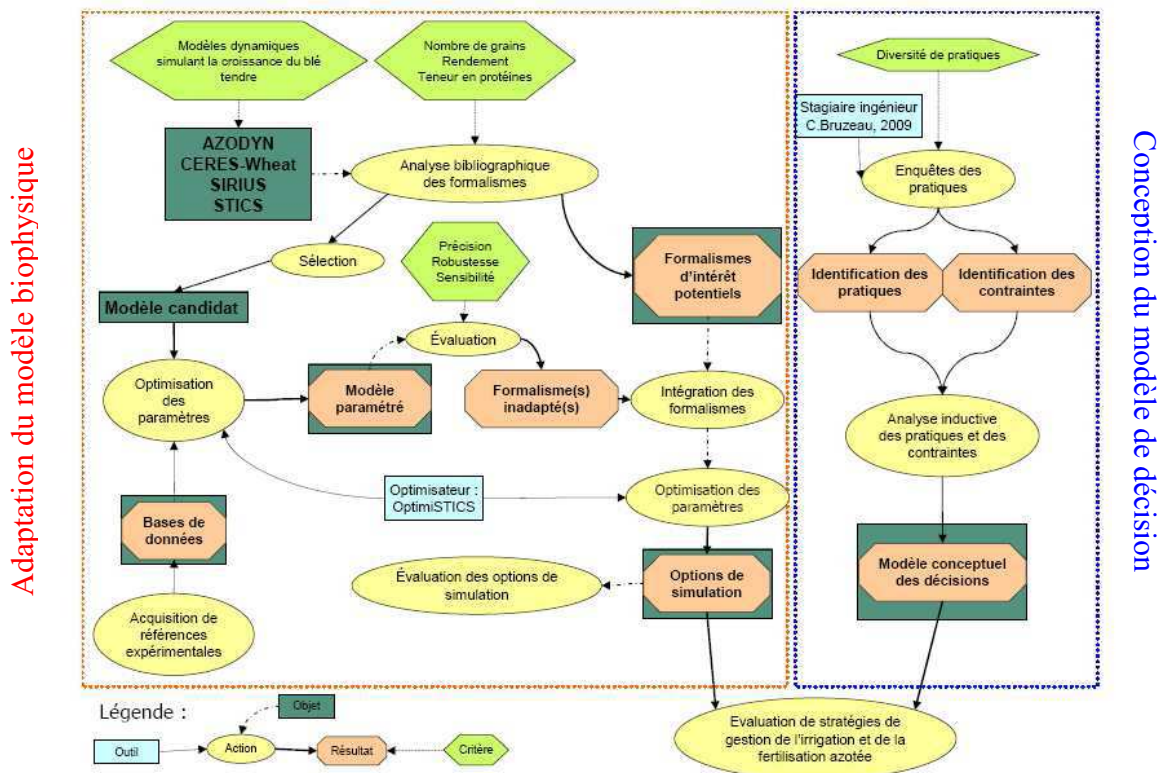


Figure 2 : Illustration des différentes étapes de la stratégie de recherche

Pour répondre à ces questions j'ai mobilisé les concepts de la modélisation du fonctionnement du champ cultivé ainsi que les concepts de modélisation de la décision. Considérant le nombre important de modèles déjà développés pour le blé tendre et étant donné l'existence de travaux antérieurs concluant que la structure de ces modèles était adaptée au blé dur, j'ai opté pour une valorisation des modèles existants pour le blé tendre. J'ai dès lors répertorié quelques uns des principaux modèles de culture dynamiques simulant le blé tendre. La sélection de modèles dynamiques se justifie par le fait que les interactions entre l'eau et l'azote au niveau du sol ne peuvent être appréhendées que d'une façon dynamique. De plus, l'objectif de prendre en compte l'effet des décisions de l'agriculteur sur la culture, sous-entend d'avoir accès aux variables caractérisant l'état hydrique et azoté de la plante et du sol de façon dynamique. Enfin, l'approche dynamique permet d'appréhender le modèle comme un outil d'apprentissage des mécanismes du système sol-plante et de discussion entre les acteurs concernés. Mon choix s'est donc porté sur les modèles AZODYN (Jeuffroy et

Recous, 1999 ; Barbottin, 2004 ; David et Jeuffroy, 2009), CERES-Wheat (Ritchie *et al.*, 1998), SiriusQuality1 (Martre *et al.*, 2006) et STICS (Brisson *et al.*, 2003; Brisson *et al.*, 2008).

J'ai ensuite entrepris une analyse bibliographique des concepts et des formalismes intégrés dans ces différents modèles afin d'identifier les formalismes intégrés dans ces modèles et de sélectionner un modèle candidat pour l'adaptation au blé dur. Cette analyse a été complétée par une rencontre avec les principaux développeurs et/ou utilisateurs.

Une fois le modèle de culture candidat sélectionné, j'ai adopté deux démarches successives et complémentaires pour l'adapter à différents cultivars de blé dur. La première démarche a consisté à paramétrer le modèle candidat, c'est-à-dire à estimer la valeur des paramètres dépendant de l'espèce et de la variété. Afin de répondre à ma question de recherche j'ai évalué différentes démarches de paramétrage. J'ai fait l'hypothèse que le modèle candidat, une fois paramétré selon une démarche appropriée, était le modèle conduisant à la meilleure précision, robustesse et sensibilité compte tenu de la formalisation adoptée. La deuxième démarche de la stratégie a ensuite consisté à évaluer l'effet de l'intégration d'une formalisation alternative inspirée des modèles analysés pour les processus mal pris en compte après le travail de paramétrage.

La stratégie de paramétrage par optimisation et d'évaluation de formalismes alternatifs nécessite l'acquisition de références expérimentales afin d'estimer les valeurs de paramètres et d'évaluer la qualité prédictive du modèle par rapport aux observations de terrain pour une large gamme de conditions pédoclimatiques. Dans la même optique que la valorisation des connaissances acquises par modélisation, j'ai opté pour une valorisation des données expérimentales existantes. J'ai ainsi construit une base de données de références à partir d'expérimentations conduites sur les réseaux INRA et Arvalis Institut du Végétal.

Concernant la conception du modèle de décision, les connaissances sur les contraintes et les pratiques d'irrigation sur le blé dur à l'échelle nationale étant relativement mal connues des ingénieurs du développement, ou tout du moins très peu formalisées, j'ai opté pour la réalisation d'enquêtes de pratiques en exploitations agricoles. Ces enquêtes avaient pour objectif d'identifier les pratiques des agriculteurs et de formaliser le cadre des contraintes et des décisions intervenant dans les opérations conjointes de fertilisation azotée et d'irrigation.

Afin de proposer de premières pistes pour l'évaluation et la proposition de stratégies conjointes, j'ai choisi de conduire une évaluation de différentes stratégies modulées par la dose d'azote et la dose d'irrigation. Ces stratégies ont été construites sur la base des résultats d'enquête.

La première étape de ma stratégie a donc consisté à sélectionner un modèle de culture candidat. La section qui suit présente le résultat de cette réflexion.

3.3.2 Sélection du modèle de culture candidat

Résultats de l'analyse bibliographique

L'analyse bibliographique de la structure des modèles avait pour objectif 1) d'identifier les processus modélisés dans quelques uns des principaux modèles de culture, ainsi que les concepts et les formalismes mobilisés et 2) d'identifier quel modèle de culture semblait le plus pertinent *a priori* pour atteindre nos objectifs. La synthèse des résultats de l'analyse des résultats est présentée dans les tableaux 1, 2 et 3. La présentation détaillée des formalismes des modèles étudiés est présentée en annexe I.

Les modèles de cultures étudiés diffèrent plus par la façon dont sont formalisés les différents processus que par le type de processus réellement pris en compte. Ils offrent tous ainsi un cadre pertinent pour étudier les interactions entre l'eau et l'azote à l'échelle de la parcelle. Au travers du calcul d'indice de stress hydriques et azotés fonction de l'état dynamique de la culture, ils peuvent tous rendre compte *a priori* de l'effet des pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation sur les variables intervenant dans l'élaboration du rendement et la teneur en azote des grains.

Tableau 1 : Synthèse de l'analyse bibliographique pour les processus concernant la phase végétative

Processus	Description	Modèles concernés
Développement	Les stades ne sont pas modélisés L'apparition des stades de développement est rythmée par la somme de température, la photopériode et les besoins en vernalisation	AZODYN CERES-Wheat, STICS
Interception du rayonnement	Le phylloterme et le nombre de feuille rythment l'apparition des stades de développement	SIRIUSQuality1
Croissance et senescence foliaire	Loi de Beer : l'interception du rayonnement est une fonction exponentielle de la surface foliaire Jusqu'à la floraison, le Leaf Area Index (LAI) est calculé à partir de la biomasse aérienne. La senescence intervient après la floraison. Elle est fonction du statut azoté de la culture Le LAI est fonction du nombre de feuille et de la vitesse de croissance des feuilles L'évolution du LAI est fonction de la température de culture puis du statut azoté de la culture La croissance foliaire est fonction de la température de culture et de la durée de vie des feuilles, elle-même modulée par le statut azoté de la culture	AZODYN, CERES-Wheat, SIRIUSQuality1, STICS AZODYN CERES-Wheat SIRIUSQuality1 STICS
Croissance en biomasse aérienne	Le rayonnement intercepté est converti en biomasse en suivant la loi de Monteith. Les températures non optimales, les stress hydriques et azotés réduisent l'efficacité de conversion	AZODYN, CERES-Wheat, SIRIUSQuality1, STICS
Répartition de la biomasse	La biomasse est répartie entre les tiges, les feuilles et les grains La biomasse est répartie entre les tiges, les feuilles, les racines et les grains La biomasse est répartie entre les racines, les parties végétatives et les grains La biomasse est répartie entre les parties végétatives et les grains	SIRIUSQuality1 CERES-Wheat AZODYN STICS
Accumulation d'azote dans la plante	L'offre provient des apports d'engrais et de la minéralisation de l'humus et des résidus de la culture précédente. Les pertes d'azote minéral par dénitrification et lixiviation sont prises en compte Une proportion fixe d'azote minéral n'est pas disponible pour les racines La profondeur racinaire détermine la quantité d'azote disponible pour la plante	AZODYN, CERES-Wheat, SIRIUSQuality1, STICS AZODYN CERES-Wheat, SIRIUSQuality1, STICS

Tableau 2 : Synthèse de l'analyse bibliographique pour les processus concernant la phase de reproduction

Processus	Description	Modèles concernés
Elaboration du rendement	<p>Le rendement est la résultante d'une confrontation journalière entre l'offre et la demande en carbone</p> <p>Le rendement augmente en fonction d'un indice de récolte qui augmente lui-même linéairement en fonction du nombre de jour depuis la floraison</p> <p>La teneur en protéines correspond au ratio entre la quantité d'azote dans les grains et le rendement, multiplié par un coefficient de 5.7.</p> <p>L'azote provenant de la remobilisation et l'azote provenant de l'absorption post-floraison est différencié</p> <p>L'azote structural et l'azote non structural sont différenciés. Le type de protéines est différencié</p> <p>La quantité d'azote augmente linéairement en fonction d'un indice de récolte en azote</p> <p>La quantité d'azote disponible provient des différents organes de la plante jusqu'à ce que les réserves soient épuisées</p>	<p>AZODYN, CERES-Wheat, SIRIUSQuality1</p> <p>STICS</p> <p>AZODYN, CERES-Wheat, SIRIUSQuality1, STICS</p> <p>AZODYN</p> <p>SIRIUSQuality1</p> <p>STICS</p> <p>CERES-Wheat</p>

Tableau 3 : Synthèse de l'analyse bibliographique pour la prise en compte des stress hydriques et azotés

Processus	Description	Modèles concernés
Effet d'un déficit de hydrique sur la croissance	<p>Le déficit hydrique réduit l'efficacité de conversion de l'énergie en biomasse, la croissance du LAI et accélère la sénescence des feuilles</p> <p>Le déficit hydrique réduit l'efficacité de conversion de l'énergie en biomasse</p>	<p>CERES-Wheat, SIRIUSQuality1, STICS</p> <p>AZODYN</p>
Effet d'un déficit en azote sur la croissance	<p>Le déficit de nutrition azoté réduit l'efficacité de conversion de l'énergie en biomasse, réduit la croissance du LAI et accélère la sénescence des feuilles</p>	<p>AZODYN, CERES-Wheat, SIRIUSQuality1, STICS</p>
Interaction entre les stress hydriques et azotes	<p>L'effet des stress est multiplicatif sur la réduction de l'efficacité de conversion en biomasse</p>	<p>STICS</p>

La selection de STICS comme modèle candidat

J'ai sélectionné le modèle de culture *a priori* à partir de critères définis pour refléter les caractéristiques nécessaires à l'atteinte des objectifs. Ces critères sont d'ordre agronomique et écophysologique ainsi que technique. Afin d'être en mesure de simuler la disponibilité de l'eau et de l'azote dans les compartiments du sol et de prendre en compte l'effet des apports d'eau et d'azote par l'irrigation et la fertilisation, le modèle devait disposer d'un module de bilan hydrique et azoté suffisamment décrit. Le modèle devait donc être en mesure de pouvoir intégrer l'irrigation et la fertilisation parmi les opérations culturales. Ces considérations m'ont amené à éliminer le modèle AZODYN qui n'avait pas encore été publié avec une version comprenant un bilan hydrique et ne permettait pas de prendre en compte cette opération. Dans une optique finalisée de proposition de stratégies de conduite relatives à l'irrigation et à la fertilisation azotée, la simulation de stades de développement identifiables au champ me semblait une caractéristique indispensable. Les stades modélisés par SIRIUS, à l'exception du stade floraison, ne correspondent pas à des stades agronomiques intervenant dans une opération culturale particulière. Ceci m'a conduit à ne pas le retenir parmi les modèles candidats potentiels. Enfin, STICS était, au début de ma thèse, le seul modèle parmi ceux sélectionnés, ayant déjà fait l'objet d'un premier travail d'adaptation pour différentes variétés de blé dur cultivées dans le sud-est de la France, ce travail pouvant servir de base de réflexion pour l'adaptation à d'autres variétés (Brisson *et al.*, 2005). De plus, d'un point de vue pragmatique, la proximité géographique de personnes ressources pouvant m'apporter une aide technique m'a conduit à retenir le modèle STICS comme modèle de base de développement. En outre, il présente comme intérêts complémentaires d'être intégré à la plateforme de simulation RECORD développée par l'INRA ce qui lui offre des opportunités en termes de développement informatique ultérieur et notamment le couplage avec d'autres types de modèles (décision, maladies...). Ensuite, STICS a déjà été associé à un modèle décisionnel de gestion de l'irrigation du maïs (MOUSTICS), ce qui permet d'avoir une base pour la réflexion de la connexion entre le modèle biophysique et décisionnel. Enfin, il dispose de son propre outil d'estimation des paramètres OptimiSTICS (Wallach *et al.*, 2011). Sa généricité lui permet en outre de pouvoir être mobilisé pour l'évaluation de systèmes de culture et non pas uniquement pour l'évaluation d'itinéraires techniques.

3.4 Organisation du manuscrit

Le plan du manuscrit reprend la stratégie présentée en Figure 2.

La première partie est consacrée à la présentation du travail de thèse conduit sur l'adaptation du modèle STICS à différents cultivars de blé dur. Elle comprend un premier chapitre décrivant les principes de modélisation intégrés dans le modèle de culture ainsi que la description de l'outil développé pour conduire l'estimation du modèle. Le deuxième chapitre présente les différentes démarches qui ont été évaluées pour estimer la valeur des paramètres. Le troisième chapitre est consacré à l'évaluation fonctionnelle du modèle une fois paramétré et après modification du formalisme relatif à l'élaboration de la teneur en protéines des grains.

La deuxième partie du manuscrit concerne la prise en compte des décisions identifiées après une enquête auprès d'un panel d'agriculteurs. A l'intérieur de cette partie, le quatrième chapitre décrit les pratiques et les stratégies des agriculteurs enquêtés et le modèle conceptuel obtenu à l'issue des enquêtes. Le cinquième chapitre est consacré à l'évaluation de la capacité de STICS à reproduire des stratégies de fertilisation azotée et d'irrigation du blé dur, construites sur la base des résultats d'enquêtes.

La dernière partie du manuscrit reprend les conclusions de ce travail de thèse et présente une discussion générale ainsi que les perspectives.

Partie I : ADAPTATION DU MODELE STICS A DIFFERENTS CULTIVARS DE BLE DUR

Cette première partie est consacrée à la présentation des travaux de thèse conduits dans le cadre de l'adaptation du modèle STICS à différents cultivars de blé dur. Après une présentation des concepts et des formalismes du modèle de culture et une description de l'outil OptimiSTICS mobilisé pour l'estimation de paramètres dans un premier chapitre, la sélection d'une procédure pertinente d'estimation par optimisation est présentée dans le deuxième chapitre. Le troisième chapitre est consacré à la présentation détaillée et l'évaluation d'un formalisme alternatif d'accumulation d'azote dans les grains.

Chacun de ces chapitres correspond à un article soumis ou en voie de soumission. Le premier chapitre de cette thèse correspond à une proposition de chapitre pour le deuxième volume de la série *Advances in Modeling Agricultural Systems* éditée par l'ASA-CSSA-SSSA³ à paraître au cours de l'année 2011 intitulé « Methods of introducing system model in field research ». Le deuxième chapitre a été soumis à *European Journal of Agronomy* en juillet 2010. A la date d'impression de cette thèse, il est en révision. Le troisième sera soumis à *Field Crop Research* au cours de l'année 2011.

³ American Society of Agronomy-Crop Science Society of America-Soil Science Society of America

Chapitre 1 Description du modèle et de l'outil d'optimisation

Ce chapitre correspond à une adaptation d'un chapitre d'ouvrage intitulé « Methods of introducing system model in field research » à paraître en 2011. La proposition originale intègre la description de l'ensemble des fonctionnalités de l'outil OptimiSTICS. Certaines d'entre elles n'ayant pas été mobilisées lors de ma thèse (méthode bayésienne d'estimation des paramètres, analyse de sensibilité), je n'ai pas décrit ces fonctionnalités dans le chapitre. Les éléments présentés dans ce chapitre sont illustrés sur la Figure 3

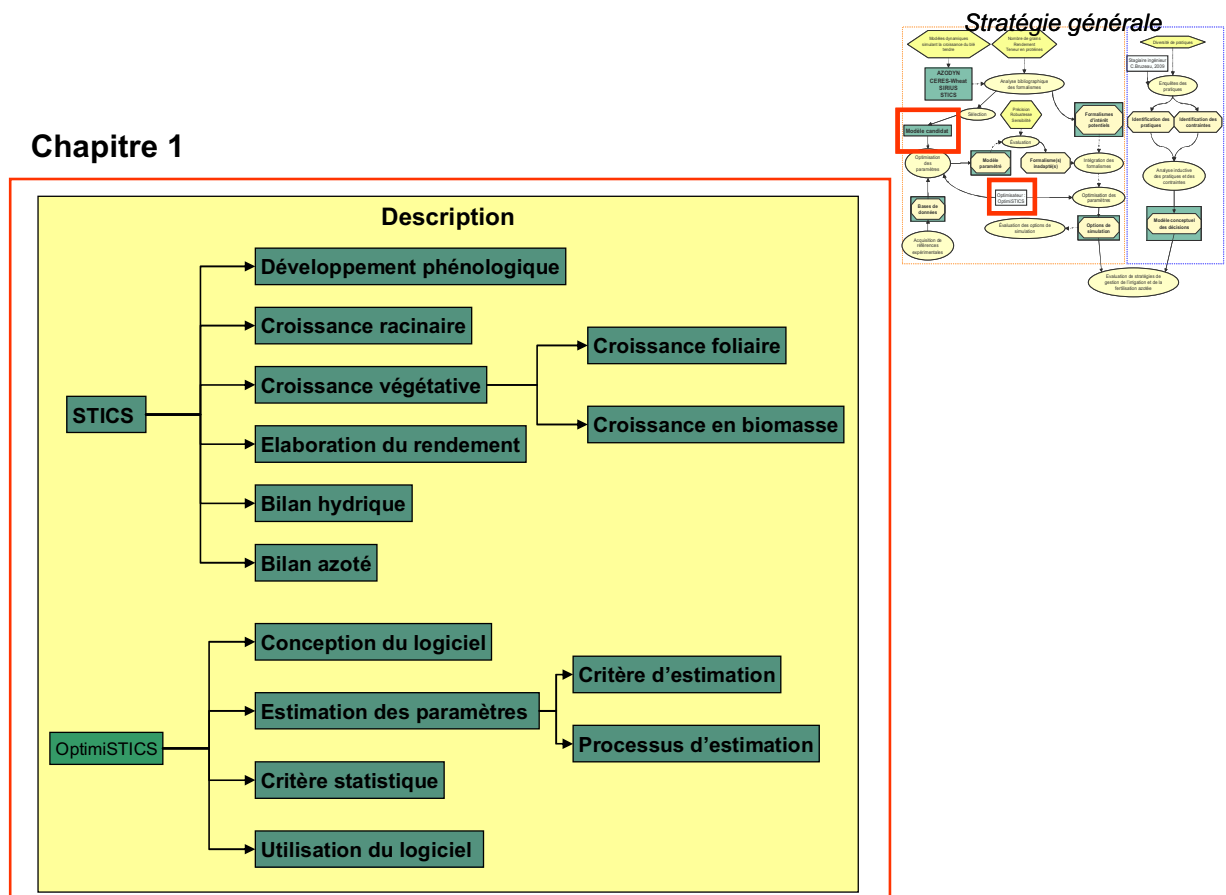


Figure 3 : Représentation simplifiée des éléments constituant le chapitre 1

*The STICS crop model and associated software for analysis,
parameterization and evaluation*

S. Buis, D. Wallach, S. Guillaume, H. Varella, P. Lecharpentier, M. Launay, M. Guérif, J.-E. Bergez, E. Justes ⁴

1.1 Introduction

The STICS model (Brisson *et al.*, 1998; Brisson *et al.*, 2008) simulates the behavior of the soil-crop system over one crop cycle or a sequence of several crop cycles, using a daily time step. STICS is a French acronym that stands for “Simulateur mulTIdisciplinaire pour les Cultures Standard”. It can simulate a wide range of crops, which is important when studying a range of cropping systems. The model takes advantage of the fact that simulating different crops involves a limited number of processes that are common to many or all crops. The basic processes simulated are described in the following section.

Because of the complexity of crop models, it is important to consider methods for analyzing (through uncertainty and sensitivity analysis), improving (through parameter estimation) and evaluating these models. Many methods for sensitivity analysis, parameterization and evaluation exist and are available as general purpose computer packages. However, these packages often require that the models to be studied have a specific form, for example as callable subroutines, which would require reprogramming. Furthermore, as we will see below, there are specific aspects of crop models which are often not taken into account in these packages. Finally, using a crop model can itself be quite a complicated task. It is hard to require that users also make the effort of coupling the crop model with a battery of other programs. These considerations have led us to develop dedicated software for providing these services for the STICS model. More functionalities are still being added. The software will become freely available for research purposes during the course of 2010.

Parameter estimation presents particular problems. In general one makes hypotheses about the statistical properties of measured data and model error, and from that derives the appropriate goodness of fit criterion for model calibration. For crop models however, it is usually not clear what the statistical properties of the error are. Our software therefore makes available a collection of different goodness of fit criteria, corresponding to different hypotheses.

In the following sections, we describe the STICS model and the software.

⁴ Chapitre d'ouvrage « Methods of introducing system model in field research » à paraître en 2011

1.2 The STICS model

STICS is organized into modules and sub-modules. We describe in the next subsections the main modules for the case of wheat crop. Among the large amount of parameters involved in the different equations, only the parameters we focused on plant parameters estimated in chapter two (soil parameters should be addressed also as in Guérif et al, 2006, Varella et al, 2010b). For a more detailed description, see Brisson *et al.* (1998; 2002; 2003; 2009).

The required input variables for STICS are permanent soil characteristics (texture, physical and chemical properties, water holding capacity), daily climate (maximum and minimum temperature, solar radiation etc.), initial conditions (initial soil water and soil inorganic N) and crop management (tillage depth and date, species and variety sown, sowing date and density, dates and amounts of irrigation and fertilization, harvest date). In addition, there are optional input variables. The dates at which the various development stages are realized can be specified as input variables when available or can be calculated by the model. Also, daily values of leaf area index (LAI^5) can be specified as inputs. In general one only has a few LAI measurements during a growing season. STICS offers an automatic non-linear interpolation, in order to obtain daily values based on the few measured LAI values. If LAI is not provided, it is calculated by the model.

A specific combination of input variables - climatic data, initial soil, crop input data, parameters for soil and crop functioning - is termed a SYMU (Site Year Management Unit). Each SYMU corresponds to one execution of the STICS model.

In the following, the parameters assumed to be varietal are identified by a subscript v , meaning that they may have different values for different varieties. Otherwise, the same value applies for all varieties of a given crop.

1.2.1 Development module

Two phenology scales are used: one for vegetative growth and the other for grain filling. During vegetative growth, the model calculates normalized leaf development units, $ULAI$. $ULAI$ is equal to 1 at emergence and 3 at maximum leaf growth. The increase in development units is mainly driven by air temperature, but vernalization, photoperiod and water and nitrogen stresses can slow down or accelerate development.

⁵ Par convention, dans l'ensemble de la thèse, les noms de variables seront écrits en italique. Les noms de paramètres seront écrits en italique gras. L'indice v indiquera que le paramètre est variétal.

1.2.2 Root growth module

Daily increase in rooting depth is a linear function of soil temperature and a varietal parameter **CROIRAC_v**. Water stress or excessive bulk density reduces the rate of root depth increase.

The increase in root depth stops when soil depth or an obstacle is reached.

The daily increase in total length of roots is calculated as the sum of two components. The first is root length growth above the rooting front. It is calculated as a function of development stage using a logistic function analogous to that used for describing leaf growth dynamics (see eq. 2). The asymptotic value is given by the parameter **DRACLONG**. Temperature, plant density and anoxia influence this growth rate. The second component is growth at the rooting front which depends on the rate of increase of the rooting depth and the root density at the root front parameter **LVFRONT**.

Each day the additional root length is distributed among soil layers. Each layer can have constraints which limit the additional amount of root length assigned to that layer. Constraints include soil dryness, soil compaction (as measured by bulk density) and waterlogging.

After a species-dependent lifetime, the roots senesce and enter the mineralization process as crop residue at the end of the crop cycle.

1.2.3 Shoot growth module

1.2.3.1 Leaf dynamics sub-module

The increase in leaf area on day d , $DELTAI(d)$, is calculated as a product of factors which depend on development stage ($DELTAI_{dev}$), crop temperature ($DELTAI_T$), plant density ($DELTAI_{dens}$) and stresses ($DELTAI_{stress}$):

$$DELTAI(d) = DELTAI_{dev}(d)DELTAI_T(d)DELTAI_{dens}(d)DELTAI_{stress}(d) \quad (1)$$

The development stage factor $DELTAI_{dev}$ is a logistic function of development units ($ULAI$), with asymptote **DLAIMAXBRUT** up to $ULAI=3$. Denominator terms are **PENTLAIMAX**, the slope at the inflexion point, and **VLAIMAX**, the value of $ULAI$ at the inflexion point.

$$DELTAI_{dev}(d) = \frac{DLAIMAXBRUT}{1 + \exp\left[\frac{PENTLAIMAX(VLAIMAX - ULAI(d))}{VLAIMAX}\right]} \quad (2)$$

For $ULAI$ greater than three, $DELTAI_{dev}$ is null.

The other factors express limiting factors, with values lying between 0 and 1. $DELTAI_T$ represents the effect of crop temperature, modelled as a piecewise linear function. The plant density factor $DELTAI_{dens}$ represents the reduction of LAI increase due to plant competition

after a defined LAI threshold. Water and nitrogen status affect leaf growth rate through the stress factor $DELTAI_{stress}$.

Senescence is based on the concept of lifespan. The leaf area and part of the biomass produced on a given day are lost once the lifespan has elapsed. The basic lifespan depends on the development stage: it varies as a linear function of development units between the duration of first leaves ($DURVIEI$), and that of last leaves ($DURVIEF_v$). Water and nitrogen stresses shorten the lifespan, while over-fertilization (with $INN > 1$, see below) increases lifespan. Temperature affects the course of senescence, with the same minimal, optimal and maximal temperatures as for development.

1.2.3.2 Biomass production sub-module

The daily production of shoot biomass, $DLTAMS(d)$ is given by

$$DLTAMS(d) = \left[EBMAX \cdot RAIN(d) - COEFB \times RAIN(d)^2 \right] \cdot FTEMP(d) \cdot SWFAC(d-1) \cdot INNS(d-1) \cdot EXOBIOM(d-1) \cdot FCO2 \quad (3)$$

The term in brackets is a parabolic function of radiation interception in day d , $RAIN(d)$, which is calculated using the Beer's law. This implicitly assumes a homogeneous canopy with randomly distributed leaves. The calculation of $DLTAMS(d)$ also takes into account various factors which influence photosynthesis and respiration, namely water ($SWFAC$) and nitrogen ($INNS$) stresses, temperature ($FTEMP$), anoxia ($EXOBIOM$) and CO_2 concentration ($FCO2$). $EBMAX$ is radiation use efficiency, which can differ with development stage due to the different chemical composition of different organs. There are thus three radiation use efficiency parameters, $EFCROIJUV$, $EFCROIVEG$ and $EFCROIREPRO$ for the juvenile, vegetative and reproductive phases respectively.

The mass corresponding to the chaff depends linearly on the number of grains through a coefficient $ENVFRUIT$. This is transformed into an equivalent leaf surface by using a specific "ear" area SEA .

1.2.4 Yield formation module

The number of grains for wheat depends linearly on the mean growth rate of the canopy during the 30-day period preceding the onset of grain filling, thus taking into account the effects of the various stresses during this period. The slope of the linear relation is given by the parameter $CGRAIN$. Two other parameters define the limits of variation of the number of grains, $NBGRAINMIN$ and $NBGRAINMAX_v$.

The quantity of dry matter accumulated in grains is calculated as the product of a potential harvest index function and plant dry weight. This potential harvest index increases linearly with time from the onset of filling to maturity, with a slope $VITIRCARB_v$, and cannot exceed a maximum value. The actual grain filling dynamics is affected by sub-optimal temperatures and high temperatures; there is no carbon accumulation in grains at temperatures below the threshold $TMINREMP$ and above the threshold $TMAXREMP$. The weight per grain cannot exceed a varietal maximum value $PGRAINMAX_v$.

The harvest-index concept is also applied to nitrogen accumulation in the seeds. The parameter $VITIRAZO_v$ is analogous to $VITIRCARB_v$. It determines the daily increase in the nitrogen harvest-index. As for weight increase, grain nitrogen filling is affected by non optimal temperatures.

1.2.5 Water balance module

Crop water requirements are calculated as a fraction of potential evapotranspiration $TETP$, with a crop coefficient approach. The fraction is given by a logistic function of LAI , which involves the maximum crop coefficient $KMAX$.

$$EO(d) = TETP(d) * \left[1 + \frac{KMAX - 1}{1 + \exp(-1.5(LAI(d) - 3))} \right] \quad (4)$$

The quantity of water actually transpired by the crop depends on both the quantity of water available in the soil and the capacity of the plant to extract this water. The water stress index is calculated as the ratio between actual and potential transpiration.

1.2.6 Nitrogen balance module

Nitrogen uptake is the smaller of soil availability and crop demand. The crop demand as well as the 'optimal' nitrogen content are defined by dilution curves as proposed by Lemaire and Gastal (1997) and adapted to wheat and durum wheat by Justes *et al.* (1994, 1997). These curves relate the N concentration in shoots with plant biomass. A critical N concentration (NC) can be defined below which the plant metabolism is affected. The corresponding critical dilution curve can be used to diagnose the nitrogen nutrition status of a crop: points below the curve express N deficiency, while points above the curve express no limitation of growth by nitrogen (Justes *et al.*, 1994). A maximum dilution curve, corresponding to maximal crop nitrogen concentration $NMAX$, is defined and allows determining the daily N demand as the product of the crop growth rate and the derivative of $NMAX$.

Nitrogen uptake depends on root distribution in the soil and crop N demand. Uptake depends on the specific absorption capacity of the plant $VABS$ which increases with nitrate

concentration *CONCN* according to double Michaelis-Menten kinetics, corresponding to two types of transport system: a high affinity transport system and a low affinity system. The specific absorption capacity involves two parameters for each system: the constant of nitrate affinity *KMABS1* or *KMABS2*, and the maximal nitrate uptake rate *VMAX1* or *VMAX2*.

$$V_{ABS} = \frac{V_{MAX1} * CONCN}{K_{MABS1} * CONCN} + \frac{V_{MAX2} * CONCN}{K_{MABS2} * CONCN} \quad (5)$$

A nitrogen nutrition index, *INN*, is calculated as the ratio of actual plant N content to critical plant N content corresponding to the same biomass (*MASECABSO*). An instantaneous *INN* named *INNI* is also calculated, based on daily accumulation of nitrogen *VABSN*, nitrogen dependent biomass *DELTABSO* and the ratio between daily variation of critical nitrogen content *dNC* and the corresponding biomass *dMASECABSO*.

$$INNI = \frac{V_{ABSN}(d)}{DELTABSO(d) * \left(\frac{dNC(d)}{dMASECABSO(d)} \right)} \quad (6)$$

Three different N stress indices are calculated. They reduce radiation use efficiency (*INNS*) and *LAI* growth (*INNLA*), and accelerate senescence (*INNSENES*). Their values depend on the value of the variable *INNI* and of the parameters *INNmin*, *INNimin*, and *INNSEN* or *INNTURGMIN*.

$$INNS = \frac{1 - INN \min}{1 - INN i \min} * INNI + \frac{INN i \min - INN \min}{INN i \min - 1} \quad (7)$$

$$INNLA = \max \left(INN \min, \frac{INNTURGMIN - 1}{INN \min - 1} * INNS + \left(1 - \frac{INNTURGMIN - 1}{INN \min - 1} \right) \right) \quad (8)$$

$$INNSENES = \max \left(INN \min, \frac{INNSEN - 1}{INN \min - 1} * INNS + \left(1 - \frac{INNSEN - 1}{INN \min - 1} \right) \right) \quad (9)$$

The N demand by storage organs depends on the nitrogen status of the crop. Demand for N is increased if *INNS* is nearly optimal (between *INNGRAIN1* and *INNGRAIN2*).

1.3 The OptimiSTICS software

1.3.1 Software design

The software design and use are illustrated in Figure 4. The software is a library of functions implemented in Matlab®. It is divided into several packages:

- The OptiLib and SensiLib packages contain the implementation of the mathematical methods used for uncertainty analysis, sensitivity analysis, model evaluation and parameter estimation plus some functions for generating graphics. These packages are

fully independent of the model used, and thus the methods implemented can be applied to other crop models interfaced with Matlab®.

- MultiSimLib contains functions for the management of the STICS simulations and their inputs and outputs plus functions for automating multiple simulations, uncertainty analysis and sensitivity analysis for the STICS model. The STICS model must be installed in this library. For each SYMU to simulate, the executable version of the model is run via system calls. Inputs are furnished to the model and outputs are recovered via its input and output ASCII files.
- OptimisTICS contains functions for automating parameter estimation for the STICS model and comparison between STICS results and measured data (Justes *et al.*, 2009).

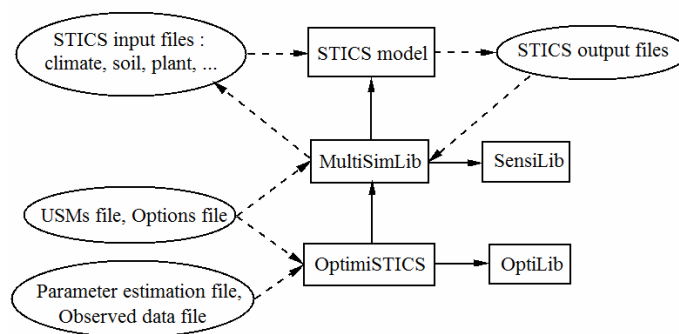


Figure 4 : Design and use of the software. Rectangles represent the different subpackages and ellipses the different files. Output files of the software are not detailed here for the sake of simplicity. Plain arrows represent dependencies between subpackages and dashed arrows read or write operations on files

1.3.2 Parameter estimation

1.3.2.1 Estimation criteria

It is a common practice to calibrate crop models for each new range of situations or for a new crop or cultivar. This involves fitting the model to data from those situations.

A first step is choosing the parameters to estimate. Crop models typically have a large number of parameters and it is not possible to fit them all. The choice of the most important parameters to adjust is generally based on a combination of expert knowledge of the model and sensitivity analysis. Attention should be paid to relations between parameters with respect to available observed variables since compensatory effects between parameters may lead to high variances for their estimators.

A second step concerns the statistical aspects of parameter estimation. Parameter estimation of a crop model can be treated as a regression problem : it is thus necessary to define a statistical model of error. This aspect of crop models has received little attention. Below we

propose a range of hypotheses about model error, adapted to the case of crop models, and present the equations for parameter estimation that result. All these methods and options are implemented in our software.

Independent errors, single response variable

Consider first the simple case where all model errors ε_{ijk} are iid (independent and identically distributed), with a normal distribution and zero expectation and with the same variance. The statistical model is :

$$\begin{aligned} Y_{ijk} &= f_{jk}(X_i; \theta_0) + \varepsilon_{ijk} \\ \varepsilon_{ijk} &\underset{iid}{\sim} N(0, \sigma^2) \end{aligned} \quad (10)$$

Y_{ijk} is the observed value of output variable j at the k^{th} measurement date in SYMU i , $f_{jk}(X_i; \theta)$ is the corresponding prediction of STICS, which depends on X_i (which represents all the input variables of STICS for SYMU i) and θ_0 , which is the vector of parameters to be estimated.

The assumption of constant variance may be reasonable in the case of a single measured value per SYMU, for example yield. In the case of time dependent data, for example *LAI* and biomass, a log transformation would probably be necessary to achieve constant variance (Sokal and Rohlf, 1981). Given the assumptions of equation (10), the maximum likelihood estimator is the same as the least squares estimator (Seber and Wild, 1989) and is given by equation 11.

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_{ijk} [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta_0)]^2 \quad (11)$$

The parameter estimator is the parameter vector that minimizes the sum of squared errors.

Independent errors, several response variables, known variances

Suppose now that we maintain the assumption that all errors are independent, but we now assume that we want to simultaneously fit several different response variables. Each response variable can have a different variance of model error. The statistical model is given in equation 12 :

$$\begin{aligned} Y_{ijk} &= f_{jk}(X_i; \theta_0) + \varepsilon_{ijk} \\ \varepsilon_{ijk} &\underset{iid}{\sim} N(0, \sigma_j^2) \end{aligned} \quad (12)$$

Here σ_j^2 is the error variance for response variable j . The maximum likelihood estimate of θ_0 is then :

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_j (1 / (2\sigma_j^2)) \sum_{i,k} [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta)]^2 \quad (13)$$

The goodness-of-fit criterion is now a weighted sum of squares, and $1 / \sigma_j^2$ is the weight for response variable j .

If one has estimated values for the error variances, they can be substituted into the above equation. For example, (van Oijen *et al.*, 2005) take the model error variance as equal to the (known) measurement error variance.

Independent errors, several response variables, unknown variances

If one does not have an estimate of the σ_j^2 , one can use the method of concentrated likelihood (Seber and Wild, 1989). The maximum likelihood estimator of θ is then:

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \prod_j \left\{ (1 / n_j) \sum_{i,k} [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta)]^2 \right\}^{n_j/2} \quad (14)$$

where n_j is the total number of measurements of response variable j . This expression allows one to combine information from different response variables, without having to input the weight to each. The variances are estimated as

$$\hat{\sigma}_j^2 = (1 / n_j) \sum_{i,k} [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \hat{\theta})]^2 \quad (15)$$

Independent errors, several response variables, non-zero expectation

Equations (13) and (14) assume that the same parameters would lead to an error with zero expectation for every measured response variable, which is a strong assumption. Suppose that there is no such value of θ_0 . The statistical model is said to be misspecified (White, 1981). In this case, parameter values minimizing prediction error for the different observed response variables can be different.

This leads us to define the estimator :

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_j w_j \sum_{i,k} [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta)]^2 \quad (16)$$

The goodness-of-fit criterion here is still a weighted sum of squares, but the weights w_j are chosen by the user to reflect his priorities. The greater the weight given to response j , the greater the priority given to improving prediction accuracy for that response.

Correlated errors

The model errors for multiple dates in the same SYMU are probably correlated. A general procedure in this case is generalized least squares. However, that involves the variance-covariance matrix of model errors, which is not known and would in general be very difficult to estimate in the case of crop models.

The practical question here is how to weight SYMUs with different numbers of measurements dates. If all the errors were independent then one would use ordinary or weighted least squares. SYMUs with many measurements dates would contribute many terms to the sum of squares, and so would have more influence than SYMUs with few measurements. On the other hand, if there is very high correlation between errors, then additional measurements dates in the same SYMU do not add much extra information, so roughly speaking each SYMU should receive the same weight regardless of the number of measurements.

This led Wallach *et al.* (2001) to propose a simplified approach in the case of high correlations. It is still assumed that errors in different SYMUs or for different response variables in the same SYMU are independent. However, the sum of squared errors for a response j in SYMU i is replaced by the average squared error for response j in SYMU i . In the equations (13)-(16) then we make the replacement

$$\sum_{i,k} [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta)]^2 \rightarrow \sum_i \left[(1/n_{ij}) \sum_k [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta)]^2 \right] \quad (17)$$

where n_{ij} is the number of measurements of output variable j in SYMU i . For example eq. (11) gives

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} \sum_j \sum_i \left[(1/n_{ij}) \sum_k [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta)]^2 \right] \quad (18)$$

Also, in eqs. (14) and (15), we replace the total number of measurements of output variable j , n_j , by the number of SYMUs where j is measured.

1.3.2.2 Process of parameter estimation

The dynamic process of parameter estimation implemented in the software is illustrated in Figure 5.

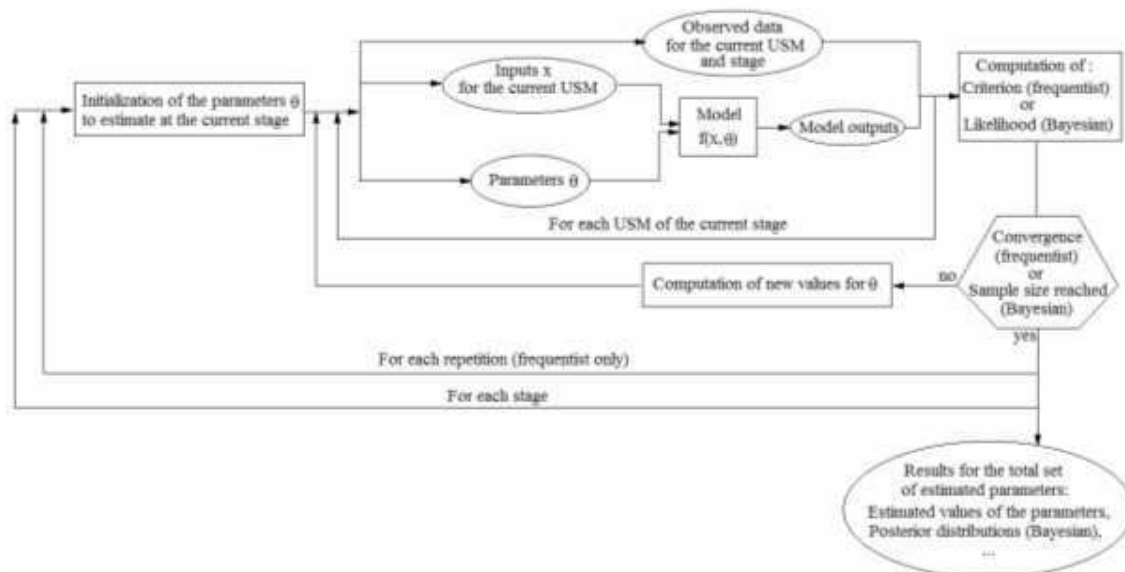


Figure 5 : Parameter estimation process implemented in the software. USM stands for SYMU.

All the frequentist estimators presented in the previous section are implemented. In each case, the frequentist estimator involves minimizing a goodness-of-fit criterion. Crop models often have discontinuities which make it difficult to use gradient-based minimization methods such as Gauss-Newton or Levenberg-Marquardt. A common approach, adopted in OptimiSTICS, is to use the Nelder-Mead simplex algorithm which is adapted to non-smooth functions because the search of the optimum is not based on the computation of the function's gradient. Although few theoretical results are available (Lagarias *et al.*, 1996), this algorithm is very popular because it can be used for multidimensional minimization for essentially any function. The simplex algorithm used in this study is a modified version of the function “fminsearch” provided by the Matlab® software that implements a bound-constrained simplex algorithm. As the Nelder-Mead simplex is a local optimization method, OptimiSTICS proposes to automatically repeat the minimization with several different starting parameter values, to minimize the risk of converging to a local minimum. The user specifies the number of different starting points as well as the starting values in the options file. If starting parameter values are not specified they are generated at random within the bounds defined for each parameter. To help analyze the behavior of the algorithm, the software generates plots of final estimated parameter values versus initial values. It also creates plots showing the

evolution of the criterion to be minimized and of the parameter values during the minimization. Examples of these plots are given in Figure 6.

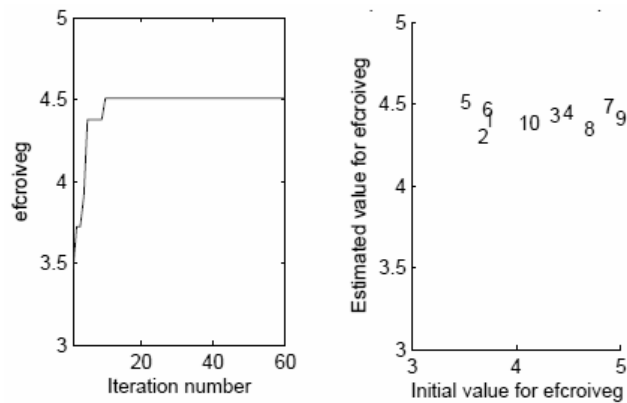


Figure 6 : Examples of plots for the simplex minimization. Left: parameter value versus iteration number. Right: final parameter value versus starting value. The name of the parameter (efcroiveg in this example) is given in the axes labels. Symbols in the right plot correspond to the index of the repetition of the minimization for different starting values.

Two special features, specifically adapted to crop models, are included in the software. The first concerns simultaneous estimation of varietal and non-varietal parameters. The varietal parameters are estimated using only SYMUs of corresponding variety while all SYMUs are used to fit the non-varietal parameters. To do so, the user defines in the option file the group of SYMUs to use for each varietal parameter.

The second special feature is that one can automatically carry out parameter estimation in several stages, which is a common practice (Ducheyne *et al.*, 1998; Anothai *et al.*, 2008; Abeledo *et al.*, 2008). Instead of simultaneously estimating all the unknown parameters from the entire set of observations combined in a complex goodness-of-fit function, the user can decompose the estimation into several stages, each one being dedicated to the estimation of a subset of the unknown parameters from a subset of the observed variables. This can improve the quality of the estimates because the number of parameters simultaneously estimated is reduced and the goodness-of-fit function is simplified. The parameters to be estimated, the data (response variables names and SYMUs for which the corresponding observed data are available), the statistical model and options for running the STICS model in each stage are defined by the user in the parameter estimation file and define the calibration procedure. The software does the estimation for each stage in turn, using the parameters estimated in the previous stages.

1.3.3 Statistical evaluation criteria

1.3.3.1 Statistical evaluation criteria

Many different criteria have been proposed for evaluating crop models. Each brings out a somewhat different aspect of model quality, so our software calculates a range of criteria.

A common measure of model quality is Mean Squared Error (MSE). MSE for response variable j is

$$MSE = (1/n) \sum_{ik} [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta)]^2 \quad (19)$$

where n is the total number of measurements of that variable. When MSE is calculated using the same data as those used for calibration, MSE measures the quality of adjustment of the model to the data. When MSE is calculated using independent data, it is a measure of prediction error. It is often convenient to work with the root mean squared error, $RMSE = \sqrt{MSE}$, since this has the same units as the output variable in question. The software also computes the decomposition of MSE into two components: a systematic and an unsystematic part, as proposed in Willmott (1981). Another decomposition of MSE used in the example presented section 5.2, is into three components, namely the squared bias ($bias^2$), the squared difference between the standard deviation of the measurements and the standard deviation of the predictions (SDSD) and a residual term that depends on the correlation between predicted and observed values (LCS) (Wallach, 2006).

Other useful criteria are proposed by the software: the regression coefficients and R^2 when simulated values are expressed as a linear function of observed values, and the modeling efficiency, defined as

$$eff = 1 - \frac{\sum_{ik} [Y_{ijk} - f_{jk}(X_i; \theta)]^2}{\sum_{ik} [Y_{ijk} - \bar{Y}_j]^2} \quad (20)$$

where \bar{Y}_j is the average of the measured values for output variable j . A perfect model has $eff=1$, while $eff \leq 0$ means that the model is not useful for describing the variability between different situations: it is an equivalent ($eff=0$) or worse ($eff < 0$) predictor than the average of observed values.

1.3.4 Using the software

The software does not contain a graphical user interface. One uses it by entering the Matlab® environment and typing in command line mode the main function of MultiSimLib or OptimiSTICS corresponding to the operation one wants to perform. These operations are detailed in the next section.

The information required by MultiSimLib or OptimiSTICS is organized in input files:

- STICS input files: climate, soil, crop management and plant parameters input files required by STICS for all SYMUs to be simulated.
- Observed data files: CSV (Comma-Separated Values) files containing observed data (one file per SYMU). This is required if the user wants to perform parameter estimation and/or comparisons between STICS results and observations.
- SYMUs file: A CSV file describing each SYMU to be simulated. For each SYMU one must specify the corresponding available soil, weather, plant and crop management STICS input files and, if available, the corresponding observed data file, plus the initial and final dates of simulation and the initial values of the STICS state variables.
- Parameter estimation file: A CSV file that describes the different stages of the parameter estimation process.
- Options file: An XML file that specifies information and options for OptimiSTICS and MultiSimLib (name and path of the input and output files, options for sensitivity and parameter estimation methods ...).

Execution of the main functions produces general information for the user written in the Matlab® window and also saved in an ASCII file. The numerical results produced by main functions are saved in CSV, EXCEL® and/or MAT (Matlab®) files and the graphics are saved in FIG (Matlab®), postscript and/or PDF files. When errors occur during execution, a directory is generated that contains the error messages and the model input and output files of the corresponding simulations.

Ce qu'il faut retenir

Les modules de bilan azoté et hydrique permettent de définir le statut azoté et hydrique de la culture et de rendre compte de l'effet d'une carence sur son fonctionnement. STICS est en mesure de différencier le comportement variétal au travers de la prise en compte de paramètres variétaux. Le modèle STICS est adapté pour prendre en compte la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée sur la croissance de la plante.

Le développement du logiciel OptimiSTICS offre un cadre informatique et statistique permettant de définir et de mettre en œuvre une démarche d'estimation de paramètres permettant de répondre aux objectifs du travail de thèse.

Chapitre 2 Paramétrage et évaluation du modèle STICS pour différents cultivars de blé dur

Dans l'objectif de coupler le modèle de culture STICS à un modèle de décision de la fertilisation azotée et de l'irrigation du blé dur, le modèle de culture doit être en mesure de simuler de façon précise, sensible et robuste les variables finales d'intérêt agronomique et économique pour l'agriculteur telles que le rendement et la teneur en protéines. Il doit également simuler avec précision les variables dites intermédiaires qui interviennent dans la simulation des variables finales mais aussi dans la prise de décision des agriculteurs.

A la suite de travaux expérimentaux conduits à Avignon en 2002 et 2003, STICS a été paramétré pour sept cultivars de blé dur (Brisson *et al.*, 2005). Cependant, ces cultivars ne représentent pas la gamme des cultivars testés sur les sites expérimentaux des réseaux INRA et Arvalis. De plus, il s'avère que ce paramétrage est peu robuste lorsqu'il est utilisé dans d'autres conditions pédo-climatiques et notamment dans le Sud-Ouest de la France. Ceci justifie le paramétrage de STICS pour le blé dur.

Ce chapitre intitulé « *Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model* » représente le travail conduit sur la définition et la sélection d'une démarche d'estimation des paramètres pertinente vis-à-vis des objectifs recherchés. Il a été soumis à *European Journal of Agronomy* en juillet 2010. A la date de soumission de cette thèse, il est en cours de révision. Les éléments présentés dans ce chapitre sont représentés dans la Figure 7.

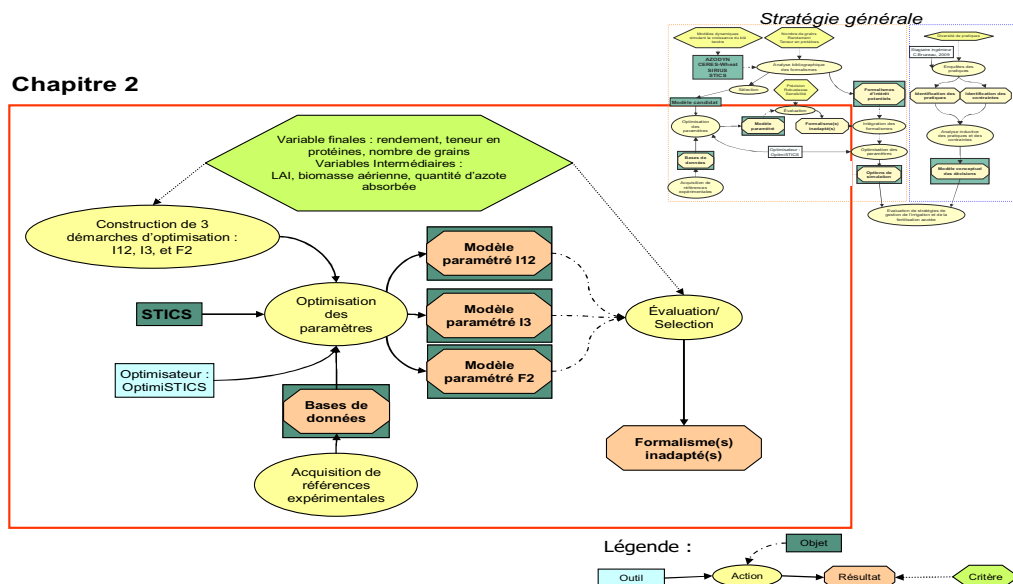


Figure 7 : Représentation simplifiée des éléments constituant le chapitre 2

Methodological comparison of calibration procedures for durum wheat parameters in the STICS model

S. Guillaume, J-E. Bergez, D. Wallach, E. Justes⁶

2.1 Introduction

In Europe, durum wheat (*Triticum turgidum* L. subsp. *durum*) is mainly grown in the Mediterranean basin and is used for pasta and semolina production. Grain yield and grain protein concentration, i.e. the ratio of grain protein content to grain yield, are the major characteristics of interest for producers and the agrofood industry.

Nitrogen and water stress are the major abiotic stresses reducing grain yield and grain protein content of durum wheat (Ottman *et al.*, 2000; Garrido-Lestache *et al.*, 2005). Fertilisation and irrigation management are efficient means to limit nitrogen and water stress but if these technical operations are not conducted at an appropriate time and level, they can lead to poor grain quality (Sombrero and Monneveux, 1989) and negative environmental impacts (Semenov *et al.*, 2007).

Dynamic soil-crop models are useful tools in determining and evaluating the effect of environmental factors and management options on crop growth and grain yield (Boote *et al.*, 1996). They also provide information on the state of the system that can help farmers or technical advisors in their management decisions (Meynard *et al.*, 2002). However, for such purposes they must be able to accurately simulate crop growth indicators and grain formation processes, as well as crop responses to changes in the management system.

Among soil-crop models, multi-species models such as STICS (Brisson *et al.*, 1998, 2002, 2008) have been developed to simulate various individual crops or crop rotations. The crop equations describe biological processes that are common to all plant species, while differences between plant species are taken into account through crop-specific parameter values (Wang *et al.*, 2002). Differences between cultivars of a particular species are taken into account through cultivar-specific parameters, also called genetic parameters (Mavromatis *et al.*, 2001)

Crop models are generally provided with default values for all parameters. However, it is often found that this default parameter set does not give a satisfactory fit when applied to a new set of contexts (Bechini *et al.*, 2006). It is therefore general practice to calibrate crop models for each new set of contexts, with calibration involving re-estimating some of the

⁶ Soumis à European Journal of Agronomy en 2010. En révision à la date du 27 avril 2011

model parameters to improve soil-crop model fit to field data. Specifically, some goodness-of-fit criterion is minimised in relation to the difference between the measured and simulated values of a target variable (Wallach, 2006b).

A number of difficulties arise in parameter estimation for soil-crop models due to the complexity of the models and the diversity of the data available for calibration.

One difficulty is the choice of parameters to estimate (Makowski *et al.*, 2006). Given the large number of parameters in models and the fairly limited amount of data generally available, it is not possible to estimate all parameters. It is thus necessary to decide which parameters will be re-estimated. In general, the choice is based on a combination of expertise and sensitivity analysis.

A second difficulty is the choice of the overall procedure for parameter estimation. One common procedure is to carry out the calibration in steps. In each step, only a single target variable is used and a limited number of parameters are fitted to that target variable (Bechini *et al.*, 2006; Garcia de Cortazar-Atauri, 2006). One advantage of this procedure is that it is numerically more efficient than simultaneously estimating many parameters with several response variables. Another advantage is that it avoids the necessity of deciding how to weight different responses, whereas weights must be chosen if the model is fitted simultaneously to several responses. A further advantage is that it is intuitively appealing to make the model fit intermediate variables as accurately as possible before moving on to variables that depend on those variables. However, this procedure also has drawbacks. In general, it is not possible to order the response variables so that each response variable is affected by previous response variables but does not affect them. For example in the case of leaf area index data and soil moisture data, each affects the other. The soil moisture data can be fitted first and then the leaf area index data, but the second step will change the fit to the soil moisture data, with unpredictable consequences. An analogous problem arises if the leaf area index data are fitted first.

A third problem for model calibration is the choice of criterion to be minimised. If several response variables are used simultaneously, then a decision is needed on how to weight the different responses. There is also the question of how to take into account the fact that there are generally multiple measurements from each field.

In general, soil-crop model calibration papers only report the results for a single calibration procedure (Bechini *et al.*, 2006; Mavromatis *et al.*, 2002; Shibu *et al.*, 2010) and do not explain the choice of calibration procedure. In fact, little is known about the impact of different calibration procedures on final model performance.

In this study we compared three different parameter estimation procedures for the STICS soil-crop model in order to provide an insight into their effects. One of procedures chosen carries out estimation with one or very few target variable per step, while the second lumps many target variables together within one step. Comparison of these was intended to provide some insight into the effect of parameter estimation by steps as opposed to fitting the model to multiple target variables simultaneously. Both these procedures use dynamic and end-of-season variables as the target variable for calibration. In the third procedure, only the end-of-season variables grain yield and grain N concentration are used as target variables for calibration, since these are the variables of major interest. Comparison of this with the first two procedures allowed us to evaluate the usefulness of using dynamic variables as the target variable in the calibration procedure as opposed to using only end-of-season variables.

The results obtained using the different procedures were analysed using statistical criteria evaluating model agreement with data. Model performance for management decision-making was also qualitatively evaluated through an agronomic analysis of model response to changes in N management strategy.

2.2 Materials and methods

2.2.1 The STICS soil-crop model

The STICS soil-crop model is a generic dynamic model which simulates daily carbon, water and nitrogen dynamics in the soil-crop-atmosphere system for multiple crops (e.g. winter wheat, maize, barley, soybean, sunflower, rapeseed, grassland, tomato, grapevines, etc.). A complete description of the equations and default parameter values of the STICS model is given in Brisson *et al.* (2008).

STICS is organised into modules that simulate different key processes. One module calculates plant development, taking into account plant temperature and day length as drivers. Another calculates root growth, including depth and density. Plant modules calculate leaf area expansion and biomass increase. Both are calculated as potential values which can be reduced by water or/and nitrogen stress. Carbon and nitrogen accumulation in grain are simulated in a grain module and grain nitrogen module, respectively, using the concept of increasing harvest index as a function of temperature defined by Amir and Sinclair (1991).

The water balance module calculates soil moisture and potential and actual soil evaporation, as well as potential and actual plant transpiration. The ratio of actual to potential transpiration is the factor that determines the water stress factors.

The nitrogen balance module accounts for mineralization, nitrification, denitrification and crop nitrogen uptake. Crop nitrogen requirements are defined using the maximum dilution curve (Justes *et al.*, 1994). The Nitrogen Nutrition Index (*NNI*) represents the crop nitrogen status and is defined as the ratio between actual crop nitrogen concentration and the critical crop nitrogen concentration, as given by the critical dilution curve (Lemaire and Gastal, 1997).

The classical input variables are permanent soil characteristics (clay content, organic nitrogen content, water-holding capacity, soil albedo, infiltration rate, etc.), management operations (cultivar, date, depth and density of sowing, dates and amounts of N fertilisation and irrigation, cultivar, etc.), and daily climatic data (min and max temperature, rainfall, potential evapotranspiration, incoming solar radiation). Additional information can be used as input variables, e.g. the dates of observed development stages can be specified as input variables. If not, the dates are calculated by the model. In the same way, Leaf Area Index (*LAI*) measurements can be interpolated to give daily values of *LAI*, which can be used as input variables. Otherwise, *LAI* is calculated by the model. A combination of one site, one year and one management system determines the unit of simulation, which is referred to as a Site-Year-Management Unit (*SYMU*) in this paper.

STICS outputs a large number of variables. The main variables of interest in this study are end-of-season variables such as: i) number of grains (*NBGRAIN*), ii) grain yield (*GY*) and iii) grain N concentration (*GNC%*). Other variables of interest are: i) the dynamic variable above-ground biomass (*AGB*), ii) above-ground plant N (*AGPN*), iii) *NNI*, iv) *LAI*, v) soil moisture of each horizon *h* (*SM(h)*), vi) overall soil moisture content (*RESMES*) and vii) overall soil N content (*AZOMES*). Some of these can be used as an indicator of management decisions (*NNI* and *RESMES* in particular).

All of the parameters for durum wheat have default values, which are listed on the STICS website (http://www.avignon.inra.fr/agroclim_stics/modele_stics). Those default values were the initial parameter values used here. Genetic parameters were identified from former studies conducted on durum wheat (Brisson *et al.*, 2005).

2.2.2 Experimental data

Experimental data were collected from four experimental sites located in the south of France: Auzeville (43°31'N 1°28'E), Peyrens (43°21'N 1°57'E), Nîmes (43°50'N 4°21'E) and Avignon (43°57'N 4°49'E). The data base contains data from 373 SYMU, covering 13 years (1996-2009) and seven cultivars (Table 4 and Table 5), each site or cultivar not necessarily being represented in each year.

The data base was split into two parts. The SYMU with dynamic measurements were used for model calibration (the Optimisation Data Base: OptimDB), while those SYMU with only end-of-season measurements were used only for evaluation (the Evaluation Data Base: EvalDB). The data covered a wide range of yields (1.7-9.7 t/ha) and grain N concentrations (14.2-31.6 g/kg) (Figure 8).

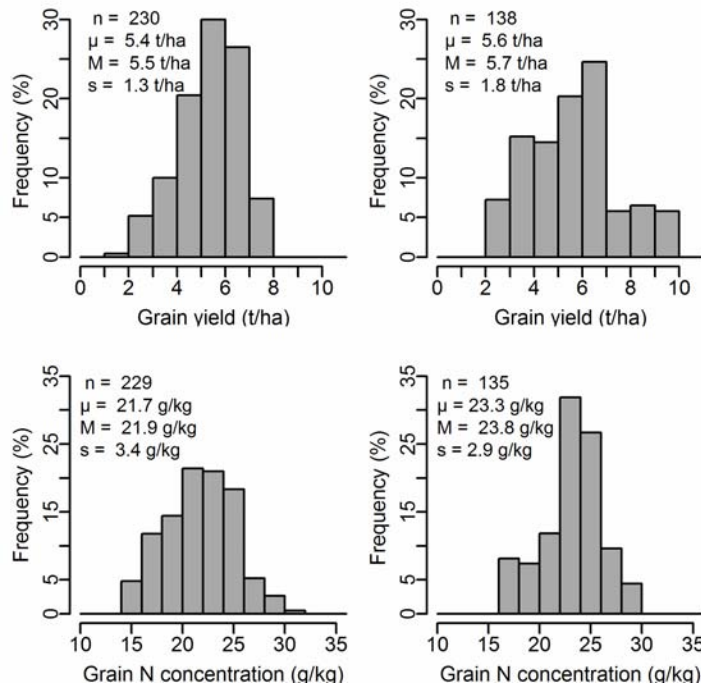


Figure 8 : Frequency distribution for measurements of grain yield (top) and grain N concentration (bottom) on ‘OptimDB’ (left) and ‘EvalDB’ (right). n represents the number of measurements. μ represents the mean, M represents the median and s represents the sample standard deviation.

Since the model was to be used for evaluating nitrogen management, particular attention was paid to its ability to reproduce the effect of N management. For this, two series of data from experiments conducted at Auzeville in 2001-2002 were selected to evaluate the response quality of the model. In the first series, four different amounts of fertiliser-N were applied ($x_1=50$ kgN/ha, $x_2=100$ kgN/ha, $x_3=160$ kgN/ha, $x_4=220$ kgN/ha). In the second series, total fertiliser-N was fixed at 220 kg/ha, but this amount was split over different doses. For each series, four durum wheat varieties were tested (Lloyd, Nefer, Neodur and Montsegur).

Table 4 : Description of ‘OptimDB’. SYMU = Site Year Management Unit, Nsoil = measurement of soil mineral N content of a 30-cm deep soil horizon, SM = Soil Moisture of a 30-cm deep soil horizon, AGPN = Above-Ground Plant N, LAI = Leaf Area Index, AGB = Above Ground Biomass, GN = Grain Number, GY = Grain Yield, GNC% = Grain N Concentration, Cultivars : Aca=Acalou, Ama=Amarillo, Llo=Lloyd, Nef=Nefer, Neo=Neodur, Mon=Montsegur

Site	Climate year	Cultivar	nb SYMU	Number of measurements						
				Nsoil	SM	AGPN	AGB	GN	GY	GNC %
Auzeville	1995-96	Neo	4	-	-	12	12	-	4	4
	1996-97	Neo	5	-	-	15	15	5	5	5
	1997-98	Neo	8	-	-	23	24	8	8	8
	1998-99	Nef/Neo	5	-	-	15	15	5	5	5
	1999-00	Nef/Neo	5	-	-	14	15	5	5	5
	2000-01	Ama/Llo/Mon /Nef/Neo	53	-	-	164	178	54	54	54
	2001-02	Ama/Llo/Mon /Nef/Neo	69	-	-	191	203	69	69	68
	2004-05	Ama/Bie/Nef/ Neo	24	72	72	84	84	24	24	24
	2005-06	Bie/Nef	15	88	88	48	48	15	15	15
	2006-07	Aca/Nef/Bie	10	94	94	44	48	11	11	11
Avignon	2001-02	Aca/Llo/Nef	3	25	160	17	36	-	-	-
	2002-03	Aca/Llo/Nef	3	10	75	16	32	-	-	-
Peyrens	2000-01	Llo/Mon/Nef/ Neo	15	-	-	58	58	15	15	15
	2001-02	Llo/Nef/Neo	12	-	-	44	44	11	11	11
Nîmes	2007-08	Nef	4	24	14	9	14	4	4	4
Total			235	311	504	754	826	226	230	229

Table 5 : Description of ‘EvalDB’. SYMU = Site Year Management Unit, GN = Grain Number, GY = Grain Yield, GNC = Grain N concentration, Cultivars : Aca=Acalou, Ama=Amarillo, Llo=Lloyd, Nef=Nefer, Neo=Neodur, Mon=Montsegur

Site	Climate year	Cultivar	nb SYMU	Number of measurements		
				GN	GY	GNC%
Auzeville	2005-06	Aca/Ama/Bie/Mon/Nef/Neo	24	24	24	24
	2006-07	Aca/Ama/Bie/Mon/Nef/Neo	47	34	47	44
	2007-08	Bie	11	11	11	11
	2008-09	Bie	12	12	12	12
Nîmes	2000-01	Llo/Mon/Nef/Neo	16	16	16	16
	2001-02	Llo/Mon/Nef/Neo	16	16	16	16
	2005-06	Aca/Nef	8	8	8	8
	2006-07	Nef	4	4	4	4
Total			138	125	138	135

2.2.3 Parameter estimation

2.2.3.1 Procedures

The first estimation procedure (I12) had 12 successive steps (**Table 6**). Each step covered a key process in the simulation of final variables of interest, such as grain yield and grain N concentration. The step order was defined to represent model structure and hypothesis on crop growth and process dynamics. The first steps thus covered the process under potential conditions: Potential root growth (step 1), potential above-ground biomass elaboration (step 2), potential plant uptake of water and nitrogen (steps 3 and 4) and potential leaf area dynamics (steps 5 and 6). The following steps covered nitrogen stress effects on crop growth and *LAI* (steps 7 and 8). The remaining four steps covered end-of-season processes: grain number formation (step 9), post-flowering plant uptake of nitrogen (step 10), and finally grain yield elaboration (step 11) and grain N content accumulation (step 12).

A step was defined by i) the parameters estimated, ii) the target variables and iii) the data used to estimate the parameters. The parameters fitted were those believed to be the most influential within the equation for that process, based on sensitivity analysis (Ruget *et al.*, 2002) and expert knowledge of the processes and the model. Overall, 60 parameters were estimated, 18 crop-specific parameters and 42 cultivar parameters (6 parameters x 7 cultivars). The target variables for optimisation were output variables representative of the particular process and influenced by the selected parameter(s). They were either dynamic variables or end-of-season variables. The data used at each step were data from required growing conditions (potential versus all conditions). In the case of dynamic variables, data were log-transformed. In steps 2 to 4, interpolated *LAI* was used rather than calculated *LAI*, in order to avoid compensating for unsatisfactory *LAI* simulation.

The second estimation procedure (I3) had three steps. The same data were used as in I12, but all of the dynamic data plus the *NBGRAIN* data were fitted simultaneously in the first step. Genetic parameters were estimated simultaneously with crop-specific parameters. As in I12, grain yield and grain N concentration were fitted in the last two steps. Overall, 29 parameters were estimated, a 50% reduction in the number of estimated parameters compared with I12.

The last estimation procedure (F2) had only two steps and used only grain yield and grain N concentration as target variables. No dynamic data were used. The estimated parameters were the same as for I3.

Table 6 : Description of the three optimisation procedures: Procedure names, number of steps, process studied, parameters estimated (STICS names), target variables and SYMU characteristics. Italic lines indicate that *LAI* is input variable. Bold type indicates genetic parameter

Procedure/ Step	Process	Parameter	Target variable			
			Dynamic	End-of- Season	Characteristic	Number
1	Potential root growth	CROIRAC, DRACLONG, LVFRONT	SM _{1to4}	-	Potential	32
2	<i>Potential above-ground biomass</i>	EFCROIREPRO, EFCROIVEG, SEA, ENVFRUIT	<i>AGB</i>	-	<i>Potential+LAI</i>	9
3	<i>Potential water uptake</i>	KMAX	RESMES	-	<i>Potential conditions+LAI</i>	6
4	<i>Nitrogen uptake</i>	KMABSI, VMAX1, KMABS2, VMAX2	AGPN	-	<i>All conditions+LAI</i>	28
5	Potential leaf growth	DLAIMAXBRUT	<i>LAI</i>	-	Potential + <i>LAI</i>	10
6	Potential leaf lifespan	DURVIEF	<i>AGB</i>	-	Potential	161
7	<i>Above-ground biomass reduction due to nitrogen shortage</i>	INNMIN, INNMIN	<i>AGB</i>	-	<i>All conditions+LAI</i>	28
8	Leaf growth reduction due to nitrogen shortage	INNSEN, INNTURGMIN	<i>LAI</i>	-	<i>All conditions+LAI</i>	28
9	Grain number formation	CGRAIN	-	NBGRAIN, GY	All conditions	226
10	Post-flowering nitrogen uptake	INNGRAIN1_v, INNGRAIN2_v	ABPN	-	All conditions	162
11	Grain yield elaboration	VITIRCARB_v, TMAXREMP_v	-	GY	All conditions	230
12	Grain N content accumulation	VITIRAZO_v	-	GNC	All conditions	229
1	Dynamic variables	CROIRAC, EFCROIREPRO, KMAX, DLAIMAXBRUT, DURVIEF_v, INNMIN, VMAX1, VMAX2, CGRAIN	AZOMES, <i>AGB</i> , <i>AGPN, LAI</i> , RESMES,	NBGRAIN	All conditions	235
2	Grain yield elaboration	VITIRCARB	-	GY	All conditions	230
3	Grain N content accumulation	VITIRAZO	-	GNC%	All conditions	229
1	Grain yield elaboration	CROIRAC, EFCROIREPRO KMAX, DLAIMAXBRUT, DURVIEF_v, INNMIN, VMAX1, VMAX2, CGRAIN, VITIRCARB_v	-	GY	All conditions	230
2	Grain N content accumulation	VITIRAZO_v	-	GNC%	All conditions	229

2.2.3.2 Criteria for calibration

When parameters were estimated on only one target variable, estimation was conducted by minimisation of the criterion C_v proposed by Wallach *et al.* (2011):

$$C_v = \left[\sum_s \frac{1}{n_s} \sum_i [y_{s,i} - \hat{y}_{s,i}(\theta)]^2 \right] \quad (21)$$

where v is the target variable, s is the SYMU, n_s is the number of measurements in s , $y_{s,i}$ is the measured value in SYMU s on the i^{th} measurement date and $\hat{y}_{s,i}(\theta)$ is the corresponding simulated value with the parameter set θ .

This criterion uses an average squared error per SYMU to give the same weight to each SYMU, whatever the number of measurements.

When parameter estimation was based on several target variables simultaneously, the concentrated likelihood method was used. This allows the model to be fitted to several variables without the variance of the residual model error being known (Seber and Wild, 1989). The resulting criterion to minimise was:

$$C = \underset{\theta}{\operatorname{argmin}} \prod_v (C_v)^{N_v/2} \quad (22)$$

where N_v is the number of SYMU with the target variable v .

Based on values in the literature and expert knowledge, lower and upper limits were fixed for each estimated parameter to constrain the parameters to values believed to be reasonable from a physiological point of view.

2.2.3.3 Software and algorithm

Parameter estimation and evaluation were carried out using the software package OptimISTICS (Wallach *et al.*, 2011), specifically designed for parameter estimation and evaluation of the STICS model. This software package offers a range of different estimation equations, including those used here. It also allows several estimation steps to be automatically carried out sequentially. The procedures I12, I3 and F2 were all run automatically using this feature. The estimated parameter values at any step become the default values for subsequent steps. Finally, OptimISTICS allows cultivar-specific and species-specific parameters to be estimated simultaneously. With the goodness-of-fit criterion minimised, the genetic parameters only appear in the terms for plots with the cultivar in question. The crop-specific parameters, on the other hand, appear in all the terms.

The goodness-of-fit criterion was minimised using a simplex algorithm, which was automatically repeated with five different starting points. The stopping conditions were: (i)

minimum reduction of 10% of the corresponding optimisation criterion compared with the starting criterion and (ii) variation of parameter values between two iterations lower than 10^{-4} . The parameter vector for the repetition with the smallest value of the goodness-of-fit criterion was used for subsequent steps of the procedure.

2.2.4 Model evaluation

2.2.4.1 Mean squared error and model efficiency

The statistical criteria used for model evaluation were calculated on original data without log transformation and without averaging the number of measurements per SYMU. For I12, statistical criteria were calculated on all data of ‘OptimDB’ and not on the specific subsets of data used to estimate parameters.

A standard measure of agreement between model and data is the mean squared error (MSE), defined as:

$$MSE = (1/n) \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i(\theta))^2 \quad (23)$$

where the sum is overall measurements and n is the total number of measurements, y_i is the measured value for the i^{th} measurement and $\hat{y}_i(\theta)$ is the corresponding simulated value. It is often more convenient to study the square root of MSE ($RMSE = \sqrt{MSE}$) or relative root mean squared error ($RRMSE = RMSE / \bar{y}$), where \bar{y} is the average of the measured values. It is also of interest to decompose MSE as:

$$MSE = bias^2 + SDSD + LCS \quad (24)$$

$$Bias^2 = (\bar{y} - \bar{\hat{y}})^2 \quad (25)$$

$$SDSD = (\sigma_{meas} - \sigma_{sim})^2 \quad (26)$$

$$LCS = 2\sigma_{meas}\sigma_{sim}(1-r) \quad (27)$$

where $\bar{\hat{y}}$ is the average of the simulated values, σ_{meas} and σ_{sim} are the standard deviations of the observed and predicted values (with n rather than n-1 in the denominator) and r is the correlation between observations and predictions. The bias term measures the extent of differences between the average measured value and the average predicted value. The SDSD term measures the extent to which the variability in the observed data differs from that in the predicted data. The LCS term is the remainder, with no simple interpretation.

The modelling efficiency is defined as:

$$EF = 1 - \sum (y_i - \hat{y}_i)^2 / \sum (y_i - \bar{y})^2 = 1 - MSE / \sigma_{meas}^2 \quad (28)$$

A value of 1 indicates a perfect model (MSE=0) and a value of 0 a model for which MSE is equal to the original variability in the data. Negative values imply that it would be better to just use the average of the measured values as the predictor in all cases.

2.2.4.2 Model response to N management

In order to explicitly evaluate the capacity of the model to reproduce the effect of increasing fertiliser-N in a particular site-year, we used the following criterion:

$$MSE_N = \sum_{j=1}^{S=3} \left[\left(\frac{y_{j+1} - y_j}{x_{j+1} - x_j} \right) - \left(\frac{\hat{y}_{j+1} - \hat{y}_j}{x_{j+1} - x_j} \right) \right]^2 \quad (29)$$

where j is the rank of applied fertiliser-N, S is the number of slopes (S=j-1), y is the measured grain yield or grain N concentration, \hat{y} is the corresponding simulated value and x_j is applied fertiliser-N ($x_1=40$, $x_2=100$, $x_3=160$, $x_4=220$ kg/ha). The first term in brackets is the measured increase in y per unit increase in applied N and the second term is the corresponding simulated increase.

2.3 Results

2.3.1 Model agreement with data

2.3.1.1 Grain yield

The plots of measured versus predicted grain yield values with the different procedures and for the two data sets are shown in Figure 9, which also displays the values of RMSE, RRMSE and EF. MSE and its components are presented in Figure 10.

All three optimisation procedures improved the agreement between simulated and measured grain yield for ‘OptimDB’ (reduced RMSE). The best agreement was obtained with F2, while I12 and I3 gave very similar results. Similar trends were observed for EvalDB. RRMSE values were around 15% for ‘OptimDB’ and around 20% for EvalDB. Model efficiency was negative for the initial parameters, but increased to values higher than 0.5 for all three procedures. Bias strongly decreased after calibration for all three procedures. SDSD was negligible initially for ‘OptimDB’. SDSD contributed about 10% for EvalDB, but was reduced by calibration. After calibration, the most important part of model error was the LCS term.

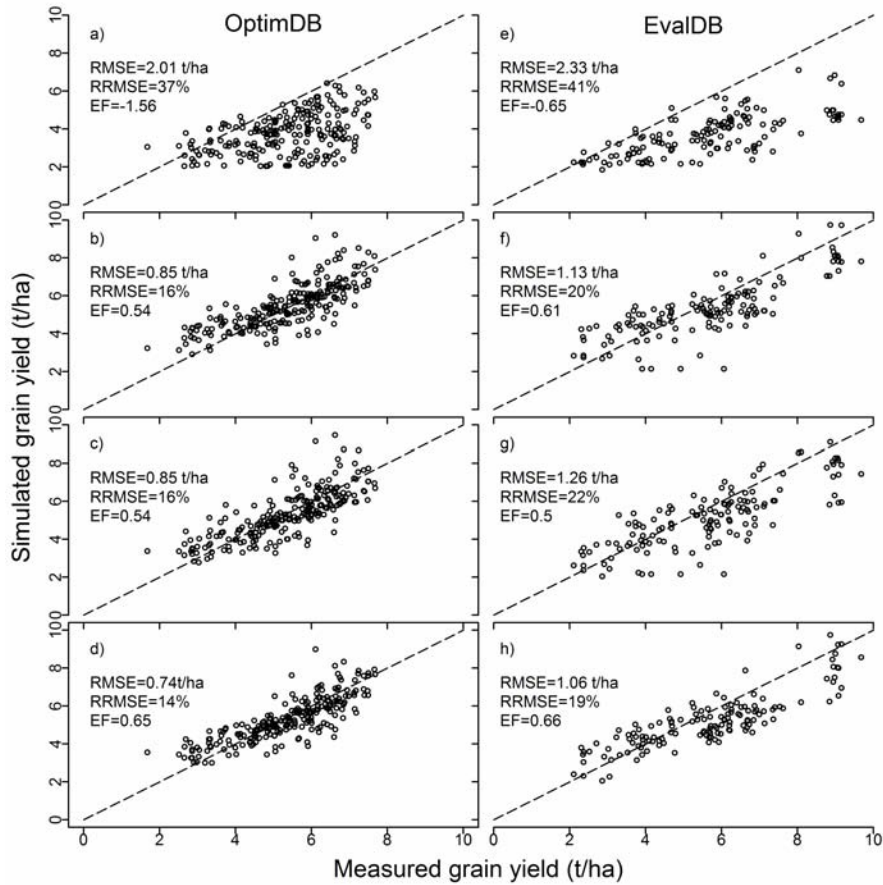


Figure 9: Simulated versus measured grain yield for ‘OptimDB’ (left) and ‘EvalDB’ (right) with the different procedures and initial parameters. From top to bottom: initial parameters (a, e), I12 (b, f), I3 (c, g), F2 (d, h) procedures.

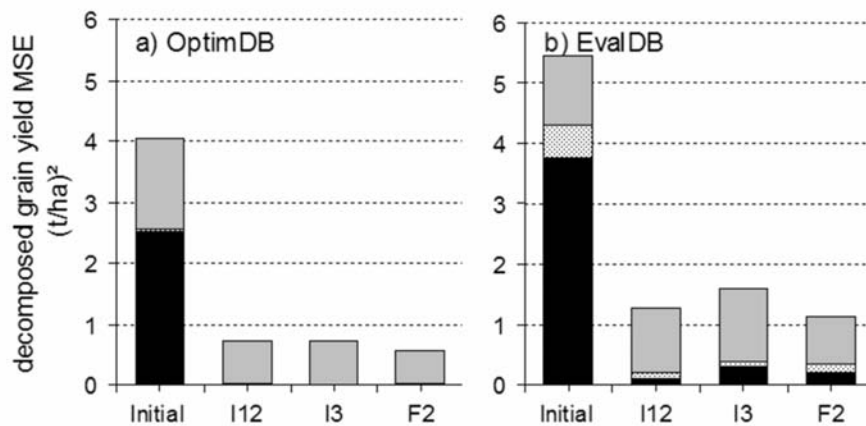


Figure 10: Decomposed MSE of grain yield as a function of procedures (x-abciss) for (a) ‘OptimDB’ and (b) ‘EvalDB’. Black bars represent Bias², dotted bars represent SDSD and grey bars represent LCS.

2.3.1.2 Grain N concentration

Figure 11 and Figure 12 present results for grain N concentration. All the calibration procedures improved the agreement between simulated and measured values for OptimDB, with I3 and F2 giving the best results. For EvalDB, on the other hand, RMSE was at best the same as the initial values (for F2). Note that the agreement using the initial parameter values was quite good (RRMSE=19% or 15%), so there was less room for improvement than with grain yield. Despite the relatively low RRMSE values, model efficiency values were negative because the variability in the data was very small.

The decomposition of MSE indicated that the bias and SDD contributions were quite small for the initial parameters. They were further reduced by all three procedures for ‘OptimDB’ but not for ‘EvalDB’.

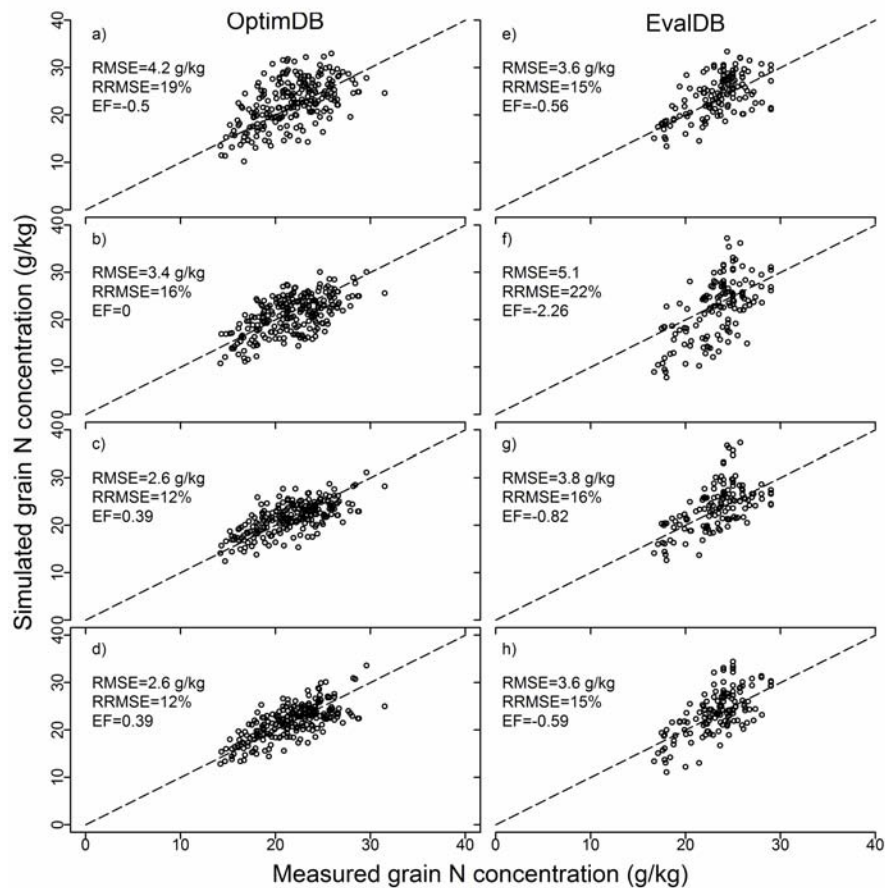


Figure 11: Simulated versus measured grain N concentration for ‘OptimDB’ (left) and ‘EvalDB’ (right) with the different procedures and initial parameters. From top to bottom: initial parameters (a, e), I12s (b, f), I3s (c, g) and F2s (d, h) procedures.

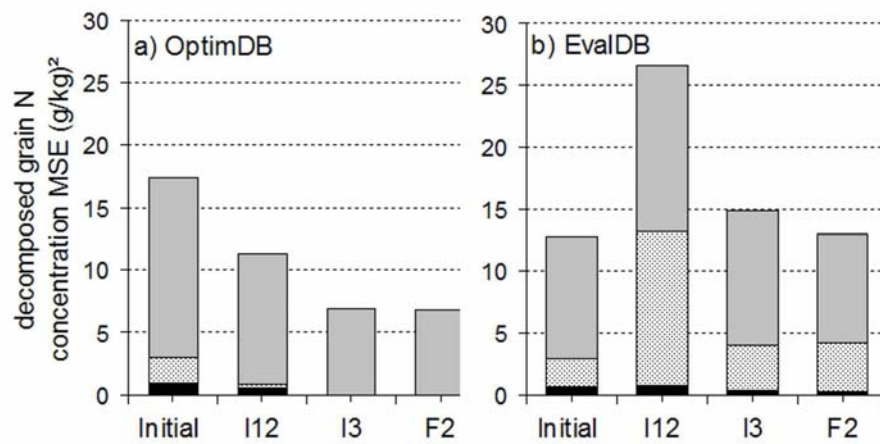


Figure 12: Decomposed MSE of grain N concentration as a function of procedure (x-axis) for (a) ‘OptimDB’ and (b) ‘EvalDB’. Black bars represent Bias², dotted bars represent SDSD and grey bars represent LCS.

2.3.1.3 Dynamic variables

The results here only concern OptimDB, since ‘EvalDB’ does not include measurements of dynamic variables. The results for *NBGRAIN* are included in this section.

Target variables after calibration

Table 7 presents initial MSE values and their change after calibration. Negative changes indicate improvement (lower MSE). Also shown are the components of MSE (initial values and changes after calibration), and the percentage contribution of each contribution to MSE initially and after calibration.

Final MSE of variables used as the target variable at some point in the calibration procedure was reduced after calibration in almost every case. The only exceptions were SM_1 and SM_4 , target variables in the I12 procedure, which ended with MSE values slightly higher than the initial MSE. These variables were target variables simultaneously with SM_2 and SM_3 , for which MSE improved. MSE reductions were higher with I3 than with I12 for variables that were target variables in the two procedures (*AGB*, *AGPN*, *LAI*, *NBGRAINS* and *RESMES*).

Final MSE of variables that were not used as target variables was not necessarily reduced. MSE could be reduced (*AGB*, *AGPN*, SM_2 , SM_4 , *LAI*, *RESMES* with F2 and SM_1 to SM_4 with I3), but could also be increased (SM_1 , *NBGRAINS*, *RESMES* with F2), or left unchanged (*LAI* with F2).

When the bias was a significant part of initial MSE and a variable was a target variable, the bias was strongly reduced after calibration (*AGPN* and *NBGRAIN* with I12 and I3). The bias reduction was higher with I3 than with I12. If a variable was not used as a target variable, calibration was able to decrease the bias (*AGPN* with F2) or increase it (*NBGRAIN* with F2).

SDSD was always the smallest contributor to MSE after calibration for target or non-target variables, although its contribution to final MSE increased for *AGB* and *AGPN* with I12. The LCS term of target variables was always reduced with I3 but not with I12 (*SM₁*, *SM₄*, *LAI*, *RESMES*). The LCS term was always the major source of model error after calibration, and in some cases was essentially the only contribution.

Table 7 : Initial MSE values of dynamic variables used as target variables and absolute variation after calibration. Negative values indicate a reduction in the initial value after calibration, while positive values indicate an increase. MSE component contributions and variation after calibration are presented

		Initial value		I12		I3		F2			
		value	%	$\Delta(I12-ini)$	%	$\Delta(I3-ini)$	%	$\Delta(F2-ini)$	%		
Variables used in optimisation procedures	I12 & I3	AGB	MSE	2.96	-0.09	-0.83	-0.08				
			Bias ²	0.00	0%	0.00	0%	0.00	0%	0.04	2%
			SDSD	0.00	0%	0.12	4%	0.01	1%	0.12	4%
			LCS	2.96	100%	-0.21	96%	-0.84	99%	-0.25	94%
		AGPN	MSE	946	-165	-206	-128				
			Bias ²	201	21%	-153	6%	-163	5%	-83	14%
	SDSD		29	3%	25	7%	-2	4%	-6	3%	
	LAI	MSE	0.54	-0.04	-0.05	0.0					
		Bias ²	0.01	2%	-0.01	0%	-0.01	0%	0.0	0%	
		SDSD	0.05	8%	-0.04	0%	-0.05	0%	0.0	0%	
	NBGRAIN	MSE	2.73E+07	-2.20E+07	-2.26E+07	2.14E+07					
		Bias ²	2.04E+07	75%	-2.03E+07	2%	-2.04E+07	0%	2.05E+07	84%	
SDSD		1.15E+05	0%	-1.08E+05	0%	-1.13E+05	0%	2.50E+06	5%		
resmes	MSE	856	-75	-201	311						
	Bias ²	47	6%	-29	2%	-44	1%	169	19%		
	SDSD	103	12%	-72	4%	-73	4%	-39	5%		
SM ₁	MSE	4.54	0.10	-0.51	0.4						
	Bias ²	0.04	1%	-0.04	0%	0.11	4%	0.0	0%		
	SDSD	0.20	4%	-0.04	4%	-0.10	2%	0.2	8%		
SM ₂	MSE	5.04	-1.07	-0.15	-0.7						
	Bias ²	0.00	0%	0.62	16%	0.10	2%	0.6	14%		
	SDSD	0.20	4%	0.04	6%	-0.14	1%	0.2	10%		
SM ₃	MSE	5.25	-1.35	-1.16	-0.1						
	Bias ²	0.00	0%	0.03	1%	0.02	1%	0.5	9%		
	SDSD	0.00	0%	0.12	3%	0.01	0%	0.5	9%		
SM ₄	MSE	2.14	0.61	-0.34	-0.3						
	Bias ²	0.11	5%	0.25	13%	-0.11	0%	0.0	8%		
	SDSD	0.07	3%	0.00	2%	-0.06	0%	0.1	10%		
I3	azomes	MSE	374	-33	-5	-32					
		Bias ²	6	2%	95	30%	99	29%	19	7%	
		SDSD	41	11%	-21	6%	-9	8%	-3	11%	
		LCS	327	87%	-108	64%	-96	63%	-48	82%	

Target variables during calibration

Figure 13 presents MSE of *NBGRAIN* and *AGB* after each of the twelve calibration steps of I12. These variables were chosen because they exhibit contrasting behaviour. *NBGRAIN* was one of the two target variables in step 9, and MSE for *NBGRAIN* was strongly decreased by that step. *AGB* was the target variable in steps 2, 6 and 7. In steps 2 and 6, only *AGB* data without stresses were used to run calibration. In step 7 all the *AGB* data with interpolated measured *LAI* values were used. MSE for *AGB* (calculated using all the data and simulated *LAI*) slightly decreased in steps 2 and 6 and slightly increased in step 7.

When *AGB* and *NBGRAIN* were not target variables, MSE could increase or decrease as a result of calibrating the model for other target variables. The increase could be quite substantial (*NBGRAIN* in step 7 and to a lesser extent *AGB* in step 10). MSE of *NBGRAIN* after step 9 and *AGB* after step 10 remained stable because the parameters estimated in subsequent steps did not influence the simulation of these variables.

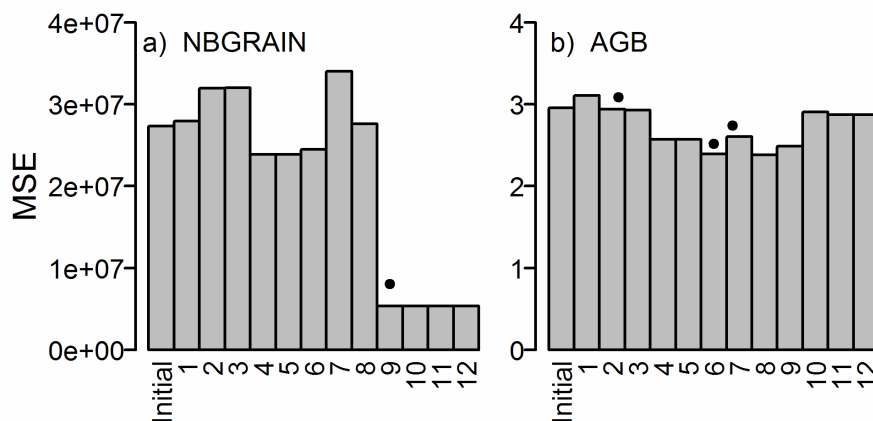


Figure 13: MSE evolution of NBGRAIN (left) and AGB (right) during 12 steps of I12. Numbers refers to optimisation step defined in Table 6. Points indicates that the response variable was the target variable for this step.

Decision variables after calibration

The results for variables of particular interest because they can be used as indicators for fertilisation and irrigation decisions are presented in Table 8. *INN* predictions at the stage ear 1 cm were improved after calibration with I12 and I3. However, the simulation error remained high (RRMSE ± 50%) and efficiency was negative. F2 did not decrease MSE compared with the initial value. Simulation errors for INN at flowering were lower than at the stage ear 1 cm. RRMSE decreased after calibration with I12 and I3. Model efficiency values were improved by calibration. F2 again did not lead to any improvement over the initial parameter values.

Simulation error of soil water was already quite good initially (RRMSE= 8% and model efficiency close to one), and was not much changed by calibration.

Table 8 : RRMSE and EF of variables that can be used as indicators for management

Variable	Criterion	Initial	I12	I3	F2
INN at 1cm ear stage	RRMSE	70	53	48	74
	EF	-6	-3	-2	-7
INN at flowering	RRMSE	29	24	24	31
	EF	0.2	0.5	0.5	0.2
RESMES	RRMSE	8	8	7	10
	EF	0.9	0.9	0.9	0.9

2.3.2 Parameter values

The values for parameters estimated in all procedures are shown in Table 9. These values differed from one procedure to another. Variations between procedures were relatively small for some parameters (*DLAIMAXBRUT*, *KMAX*), but were quite large for most of the parameters estimated (*CROIRAC*, *VMAX1*, *CGRAIN*).

The value of the genetic parameter '*VITIRAZOv*' differed between cultivars as well as between procedures. However, the order of the cultivars was more or less the same for all procedures, i.e. Biensur and Acalou always had the lowest values, while Lloyd and Amarillo always had the highest. The order for the parameter 'vitircarb' never differed by more than one placing between procedures, except for Neodur (ranked 6th with F2, 4th for I12 and 3rd for I3). The order of the parameter 'durvieF' for different cultivars was more variable. For example, Nefer had the smallest value of 'durvieF' with I12 and I3 but one of the highest values with F2.

Table 9: Process, estimated parameters and parameter values at initial situation (Initial) and after calibration with I12, I3 and F2 procedures. Bold characters refer to genetic parameters. Numbers in bracket for genetic parameters indicate cultivar ranking starting from the lowest value.

Process	Estimated parameter	Initial	I12	I3	F2
Potential root growth	CROIRAC	0.20	0.39	0.19	0.26
Potential above-ground biomass	EFCROIREPRO	4.25	3.71	2.65	3.41
Potential water uptake	KMAX	1.20	1.21	1.27	0.97
Plant Nitrogen uptake	VMAX1	0.0018	0.0002	0.0008	0.0078
	VMAX2	0.18	0.03	0.02	0.01
Potential leaf growth	DLAIMAXBRUT	0.00032	0.00030	0.00027	0.00024
	DURVIEF_NEFER	169	150 (1)	178 (1)	208 (6)
	DURVIEF_NEODUR	180	205 (5)	249 (7)	164 (2)
	DURVIEF_BIENSUR	180	249 (7)	245 (6)	196 (5)
	DURVIEF_ACALOU	170	151 (2)	224 (3)	159 (1)
	DURVIEF_AMARILLO	190	217 (6)	233 (4)	210 (7)
	DURVIEF_LLOYD	180	176 (4)	237 (5)	176 (3)
	DURVIEF_MONTSEGUR	205	157 (3)	217 (2)	195 (4)
Nitrogen stress effect	INIMIN	-0.19	0.26	-0.16	-0.21
Grain number formation	CGRAIN	0.03	0.05	0.04	0.59
	VITIRCARB_NEFER	0.0110	0.0107 (3)	0.0127 (4)	0.0107 (2)
	VITIRCARB_NEODUR	0.0110	0.0127 (4)	0.0121 (3)	0.0128 (6)
	VITIRCARB_BIENSUR	0.0110	0.0147 (6)	0.0129 (5)	0.0117 (4)
	VITIRCARB_ACALOU	0.0110	0.0106 (2)	0.0088 (1)	0.0112 (3)
	VITIRCARB_AMARILLO	0.0110	0.02 (7)	0.0199 (7)	0.0131 (7)
	VITIRCARB_LLOYD	0.0110	0.0145 (5)	0.0149 (6)	0.0125 (5)
	VITIRCARB_MONTSEGUR	0.0110	0.0106 (1)	0.0096 (2)	0.0095 (1)
	VITIRAZO_NEFER	0.0176	0.0226 (4)	0.0225 (5)	0.0194 (5)
	VITIRAZO_NEODUR	0.0176	0.0231 (5)	0.0207 (4)	0.0185 (4)
	VITIRAZO_BIENSUR	0.0176	0.0182 (1)	0.0194 (2)	0.0169 (1)
	VITIRAZO_ACALOU	0.0176	0.019 (2)	0.0161 (1)	0.017 (2)
	VITIRAZO_AMARILLO	0.0176	0.0301 (7)	0.0325 (7)	0.0206 (7)
	VITIRAZO_LLOYD	0.0176	0.0251 (6)	0.0269 (6)	0.0203 (6)
	VITIRAZO_MONTSEGUR	0.0176	0.0217 (3)	0.0196 (3)	0.0181 (3)

2.3.3 Model response to N management

2.3.3.1 Model response to increasing fertiliser-N dose

Figure 14 illustrates results for a single cultivar (Lloyd). Results for the other cultivars were comparable. Measured grain yields increased with increasing fertiliser-N dose. Simulated grain yield also increased with increasing N dose.

Figure 14 shows how well the different procedures represented the grain yield increase per added kg N, averaged over the four cultivars tested. F2 gave the best fit, but relative error after calibration remained quite high (RRMSE=44%) (Table 10). I12 and I3 did not improve model response compared with the initial parameter values.

Measured grain N concentration slightly increased as applied fertiliser-N increased, whereas simulated N concentrations increased much more strongly. Once again, F2 gave the best agreement with the data.

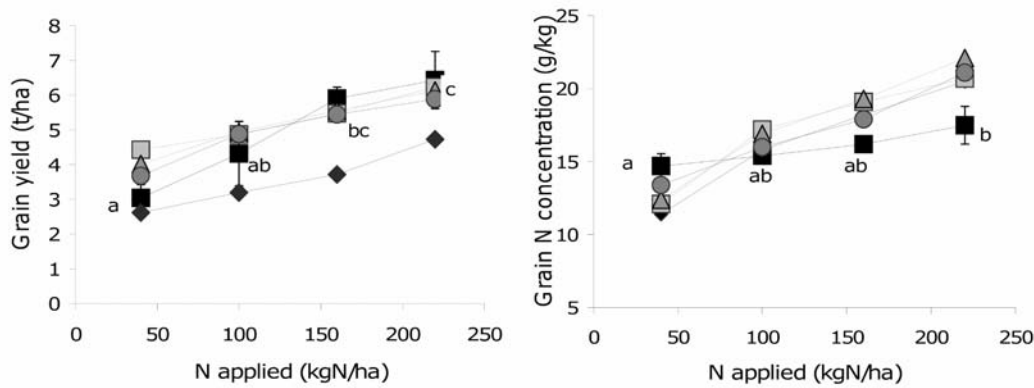


Figure 14: Measured and simulated grain yield (left) and grain N concentration (right) as a function of N applied in kg/ha (x-absciss) for the Lloyd cultivar. Symbols are ■ for measured values, ◆ for Initial values, □ for I12, ▲ for I3 and ● for F2 procedures. Vertical bars represent sample standard deviation of measurements. Letters indicate significant difference at $p < 0.05$ using ANOVA followed by Tukey's test.

Table 10 : Calculated MSEN values and associated RMSEN and RRMSEN for grain yield response and grain N concentration.

Variable	Criterion	Initial	I12	I3	F2
Grain yield	MSE_N	73	87	71	51
	$RMSE_N$	8.5	9.3	8.4	7.1
	$RRMSE_N$	52	57	52	44
Grain N concentration	MSE_N	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$2.1 \cdot 10^{-3}$	$1.9 \cdot 10^{-32}$	$1.6 \cdot 10^{-3}$
	$RMSE_N$	$4.6 \cdot 10^{-2}$	$4.6 \cdot 10^{-2}$	$4.4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$
	$RRMSE_N$	>100%	>100%	>100%	>100%

2.3.3.2 Model response to split N fertilisation

Figure 15 shows the effect of splitting the application of 220 kg N/ha into different doses, here for the cultivar Lloyd. Different split doses all led to nearly the same grain yield, both according to the measurements and the three calibration procedures.

Partitioning significantly affected measured grain N concentration. In particular, adding some of the N on the last two dates increased grain N concentration. None of the three calibration procedures reproduced this behaviour. The data for the other three cultivars led to similar conclusions (results not shown).

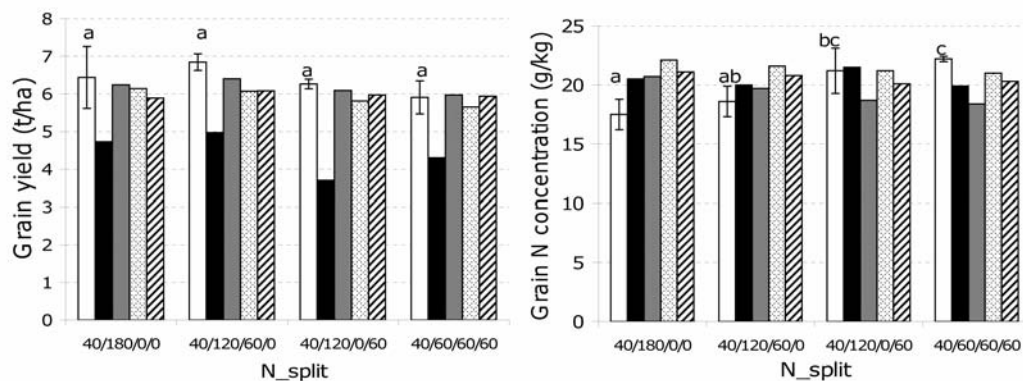


Figure 15: Measured and simulated grain yields (left) and grain N concentration (right) as function of N applications in four split doses for the Lloyd cultivar. Numbers of the x- absciss labels separated by slash bar represent N applied (kgN/ha) at tillering/ 1cm ear stage/flag leaf emergence/flowering. Total N applied was 220 kgN/ha. Symbols are □ for measured value, ■ for initial value, ▒ for I12 values, ▨ for I3 values and ▩ for F2 values.

Vertical bars represent sample standard deviation of measurement. Letters indicate significant difference at $p < 0.05$ using ANOVA followed by Tukey's test.

2.4 Discussion

We compared three different ways of using data to estimate the parameters of the STICS soil-crop model. The I12 and I3 procedures use dynamic variables as well as grain yield and grain N concentration, while the F2 procedure uses only the two final variables. I12 and I3 differ in that calibration in I12 proceeds step-wise, with only one or two target variables per step (except that all four soil water variables are used together), while in I3 all the dynamic variables appear together as target variables in a single step. The different parameter estimation procedures were evaluated using the same data as were used for parameter calibration, and also using an additional independent data set. The conclusions for the two data sets were quite similar.

It could be expected that the use of additional information, in the form of the dynamic variables, would improve model prediction overall, including for the final variables. This was found not to be the case. Surprisingly, the procedures I12 and I3, which use the dynamic

variables, had larger errors for grain yield and grain N concentration than F2. On the other hand, the dynamic variables themselves were in most cases (but not all) more accurately predicted by I12 and I3 than by F2. In some cases (grain number, overall soil moisture), F2 gave much worse predictions than I12 or I3. This suggests that if only final variables are of interest, calibration using only those variables could in fact be better than using additional variables. If on the other hand the dynamic variables are important, then they should be used in the calibration procedure.

Comparing I12 and I3, procedure I3 in most cases gave better results, which could be surprising. Procedure I12 seemed of interest because the parameters are estimated using only data directly related to those parameters. However, one consequence is that many of the calibration steps use only part of the overall data base, for example only those SYMU assumed to be without stress or those with sufficient *LAI* data to replace calculated *LAI*. This is probably one of the reasons why I3 performed better. Procedure I3 (and to a lesser extent I12) involves calibration using several target variables together. This requires a method for combining information from different variables. Here this was done using the concentrated likelihood method, which does not require weights to be chosen for each variable.

A more detailed analysis gives some understanding of how calibration operated in our study. First of all, calibration appeared to be quite effective in eliminating bias. When bias makes a major contribution to MSE, calibration is likely to be able to substantially reduce MSE by reducing or eliminating bias. The two best examples are *AGPN* and *NBGRAIN*, for which I12 and I3 both eliminated most of the bias.

An important feature of calibration is that while calibration reduces MSE for the target variables, it can increase MSE for other variables. This is illustrated in Fig. 6, where MSE for *NBGRAIN* and to a lesser extent for *AGB* increased in some of the steps where the variable in question was not the target variable. The most obvious example was *NBGRAIN* in procedure F2. MSE for *NBGRAIN*, which is not a target variable for F2, nearly doubled with F2 compared with the initial value.

Another aspect of calibration that emerged concerns the values of the model parameters. These values can be quite different for different calibration procedures. An extreme example here is the parameter 'cgrain', with values that varied greatly from 0.04 (procedure I3) to 0.59 (procedure F2). The parameters estimated compensate for errors elsewhere in the model, and these errors are different for the different procedures. Thus the parameter values are specific not only to a specific data set, but also to the specific calibration approach that is used. This could be considered an original finding of our work.

The capacity of the STICS soil-crop model to simulate or predict grain yield and grain N concentration over a large range of growing conditions was satisfactory with every procedure. In fact, RRMSE values for F2 were 14% for 'OptimDB' and 19% for EvalDB, which are comparable to the RRMSE of 23% obtained by Meinke *et al.* (1998) or RRMSE values reported by Brisson *et al.* (2002) for wheat and maize crops (15-20%). RRMSE for grain N concentration was 12% (OptimDB) or 15% (EvalDB), which is comparable to results reported for the APSIM soil-crop model (Asseng *et al.*, 2002). However efficiency was negative for grain N concentration using 'EvalDB'.

The capacity of the model to simulate dynamic variables that could be used as indicators in irrigation or fertilisation decision-making guidance was variable. Total soil moisture content was well reproduced in terms of dynamics (RRMSE less than 10% and EF close to one). On the other hand, *NNI* at the stage ear 1 cm had high RRMSE and negative efficiency. Nevertheless, at flowering the error in *NNI* was much smaller with I12 and I3 thanks to better simulation of *AGB* and *AGPN* at that time, indicating that the model could be of interest in deciding fertiliser-N doses during the crop cycle.

Detailed data from factorial experiments can be used to test the model in more detail. Here we used data where the fertiliser-N rates applied and the split doses and dates used for a given N dose varied. Simulated grain N concentration response to increasing N dose, or to adding some of the N late in the season, never matched the measured response, whatever the calibration procedure. It seems that the STICS model does not correctly take into account the effect of late N uptake on grain N redistribution. Our results indicate that a different representation of late N uptake must be tested, as in the AZODYN model (Barbottin *et al.*, 2006), in order to improve this aspect of the model. This illustrates that the parameter optimisation process can identify some weakness in the formulation of soil-crop models.

2.5 Conclusions

It is general practice to calibrate a crop model for each new set of conditions or cultivars. However, many different approaches to crop model calibration have been proposed, and there is very little information in the literature that could help choose the best procedure. This study, which compared three different approaches to parameter estimation, illustrates the consequences of choosing different approaches.

The three calibration procedures we compared gave quite different results. Specifically, some of the estimated parameter values were very variable, and the mean squared errors for certain variables were also very different. Thus the choice of calibration procedure is important in determining the results of the calibration.

The choice of the target variables (those variables that appear in the goodness-of-fit criterion) of the calibration procedure also proved to be very important. With relatively minor exceptions, fit in our study improved for variables that were among the target variables of the procedure. For other variables, however, it could not easily be predicted whether fit would be improved or worsened. There were examples where the fit to non-target variables was very seriously degraded. One use of crop models is to predict variables that are difficult to measure. In the absence of measurements, these variables cannot be used as target variables. Our results suggest that there is no assurance that calibration improves the prediction of these variables,

In this study, calibration was particularly effective when bias made a large contribution to MSE. When this was the case, calibration very substantially reduced bias and thus substantially reduced MSE.

An initial question in this study was the interaction between improving the fit to dynamic variables (such as *AGB*, *AGPN* or *LAI*) and improving the fit to the final variables grain yield and grain N concentration. We obtained a better fit to the final variables when those final variables were the only target variables than when the dynamic variables were also used as target variables.

For those interested in the dynamic variables and final variables, our results suggest that the dynamic variables should be included as target variables.

The question remains of how exactly to calibrate using multiple target variables. In our case, having a single step with all the dynamic variables together as target variables was better than performing multiple steps, possibly because many of the multiple steps only used a subset of the data. As a practical result of our work, the three-step procedure I3 was identified as the most efficient in improving both the calibration and the independent evaluation of the STICS model when considering dynamic and final variables. However, the qualitative evaluation of the model dealing with the model response to split-dose fertiliser-N application was useful in highlighting some unsatisfactory functioning of the soil-crop model. This indicates the necessity of renewing crop model evaluation using statistical criteria on the model response.

Ce qu'il faut retenir

Trois démarches d'estimation des paramètres ont été construites. Les démarches diffèrent par le nombre d'étapes d'estimations, le nombre de paramètres estimés simultanément à chaque étape, et par la nature des variables utilisées pour estimer les paramètres.

La première démarche consiste à estimer les paramètres intervenant dans la simulation des variables intermédiaires au rendement et à la teneur en protéines de façon successive. La seconde démarche consiste à estimer les paramètres intervenant dans la simulation des variables intermédiaires au rendement et à la teneur en protéines de façon simultanée. La troisième démarche consiste à estimer les paramètres intervenant dans la simulation des variables intermédiaires au rendement et à la teneur en protéines de façon simultanée en optimisant sur le rendement uniquement.

La seconde démarche s'avère être la plus pertinente pour améliorer la précision et la robustesse du modèle pour la simulation du rendement, de la teneur en protéines et des variables intermédiaires (biomasse arienne, quantité d'azote absorbée..). L'erreur relative sur la simulation du rendement varie entre 16 et 22% en fonction de la base de données. L'erreur relative sur la simulation de la teneur en protéine varie entre 12 e 16% en fonction de la base de données utilisée⁷.

Aucune des démarches ne permet de conduire à un modèle sensible à l'effet du fractionnement sur la teneur en protéines. La teneur en protéines est le résultat de la simulation de la quantité d'azote dans les grains et du rendement. La réponse du rendement à l'effet du fractionnement étant satisfaisante, j'ai fait l'hypothèse que le manque de sensibilité provient du formalisme adopté dans STICS pour simuler l'accumulation de l'azote dans les grains.

⁷ L'ensemble des paramètres utilisés avec cette procédure est fournie en annexe II

Chapitre 3 Modification du formalisme initial d'accumulation de l'azote dans les grains

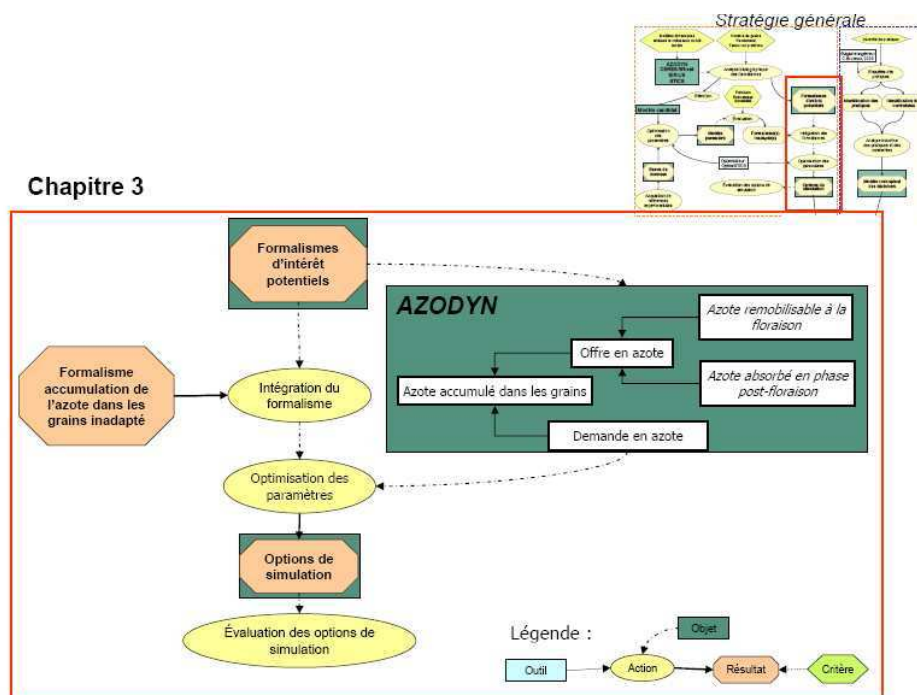


Figure 16 : Représentation simplifiée des éléments constituant le chapitre 3

Les conclusions du chapitre précédent indiquent que STICS ne simule pas correctement l'effet du fractionnement sur la teneur en protéines. Comme indiqué précédemment, j'ai fait l'hypothèse que ce manque de sensibilité pouvait provenir d'un manque de sensibilité du formalisme d'accumulation d'azote dans les grains de STICS qui est basé sur un indice de récolte en azote. A partir de l'analyse bibliographique que j'ai conduite sur les différents modèles de simulation de la culture du blé tendre (cf Introduction et annexe I), j'ai sélectionné le formalisme du modèle AZODYN et j'ai testé l'effet de son introduction sur la simulation de l'azote dans les grains et la teneur en azote. La Figure 16 représente les éléments abordés dans ce chapitre 3.

L'article qui suit intitulé « *Is the change of the STICS formalism for grain N accumulation sufficient to improve the simulation of grain N concentration?* » présente le travail conduit dans ce cadre. Il est destiné à être soumis prochainement à European Journal of Agronomy.

Is the change of the STICS formalism for grain N accumulation sufficient to improve the simulation of grain N concentration?

S. Guillaume, J-E Bergez, E. Justes

3.1 Introduction

European Union is the first durum wheat production area before Canada and the United-States and accounts for 26% of the global production (LCM International, 2009). Durum wheat is cultivated for pasta and semolina production. Grain N content (*GNC*, kgN/ha), together with Grain Yield (*GY*, t/ha), determines the Grain N Concentration (*GNC%*, %), which is one of the major characteristic of interest for transformers and producers. In durum wheat, as in most of cereals, the main source of Nitrogen (N) for the grains is N remobilized from the vegetative parts after flowering. This source can account for 60 to 92% of the nitrogen accumulated in the grains at maturity (Cox *et al.*, 1986). The second source of grain N comes from soil N uptake during grain filling period.

Growing condition during crop growth, genotype, and crop management techniques influence grain N accumulation. Crop simulation models are useful tools to evaluate the effect of crop management on final crop performances. They rely on several hypotheses concerning the functioning of the processes involved in crop growth and on hypotheses concerning interactions between the different state variables of the system. Depending on the purpose of the crop simulation model and the perspectives of the model developers there can be several hypotheses for the same process (Jones and Luyten, 1998; Weiss and Moreno-Sotomayer, 2006; Adam *et al.*, 2011).

Major crop models devoted to wheat simulate *GNC* and *GNC%* : SIRIUS (Jamieson *et al.*, 1998; Martre *et al.*, 2003; Martre *et al.*, 2006), CERES-Wheat (Asseng *et al.*, 2002; Weiss and Moreno-Sotomayer, 2006), AZODYN (Jeuffroy and Recous, 1999; Barbottin, 2004) and STICS (Brisson *et al.*, 2003; Brisson *et al.*, 2008). They all consider *GNC%* simulation as the result of grain dry matter accumulation and grain N accumulation but they differ in the way these processes are simulated.

In SIRIUS⁸, grain N is differentiated into structural grain N and storage grain N. Hypothesis behind the adopted formalisation is that the accumulation of structural proteins, which occurs during the first part of grain filling phase, is sink-driven and is function of temperature and

⁸ Une représentation graphique des différents formalismes est fournie en annexe 1

that the accumulation of storage proteins, which occurs in the second part of grain filling phase, is supply limited. Another distinction is made between the type of proteins with the differentiation of albumins-globulins and amphiphils (structural proteins) and gliadins and glutenines (storage proteins). N source for grain comes from the remobilisation of non structural N stem and leaves and from crop N uptake.

Formalisation of *GNC%* in CERES_wheat was modified by different authors (Asseng *et al.*, 2002; Weiss and Moreno-Sotomayer, 2006) . The original version provided by Ritchie in 1985 consists of the independent simulation of dry matter and N accumulation in the grain (Asseng *et al.*, 2002). Grain N accumulation is the result of the confrontation between the grain N demand, dependent on the temperature and the grain N demand supply, derived from the different crop organs (stem, leaves, roots) until the tissue N concentration is reduced to a phenologically dependent minimum concentration. Asseng *et al.* (2002) modified the original version to better simulate extrem low and high *GNC%* values by bounding the daily grain N transfer between 1.23% and 4% of the daily dry matter transfer and by fixing a minimum *GNC%* at the beginning of the grain filling phase equal to 3%. Weiss and Moreno-Sotomayer (2006) further introduced cultivar dependent minimum tissue N concentration to make the N translocation cultivar dependent. They also modified grain dry matter accumulation by introducing a temperature and a water stress effect on dry matter grain demand. CERES-Wheat and SIRIUS formalisations imply the simulation of the repartition of biomass and nitrogen into the different organs of the crop as well as the differentiation between structural and non structural N.

The AZODYN model determines grain N supply from above ground plant N uptake during post-flowering phase (*AGPNpostflo*) and from crop N remobilisation. *AGPNpostflo* depends on the Above-Ground Biomass accumulation during post-flowering phase (*AGBpostflo*) and the required minimum crop N concentration according to the reference dilution curve described by Justes *et al.* (1994). Grain N supply from remobilisation is determined at flowering and corresponds to a fixed fraction of the Above-Ground Plant N uptake at flowering (*AGPNflo*). Grain N demand depends on grain yield growth and it can limit the grain N accumulation during the first half of the grain filling phase.

In the STICS crop model (Brisson *et al.*, 2003; Brisson *et al.*, 2008), the formalisation of grain N accumulation and the resulting *GNC* and *GNC%* simulation involves the determination of a daily Nitrogen Harvest Index (NHI) which represents the daily fraction of the N accumulated in the vegetative parts transferred into grains. The rate of increase of the daily NHI depends on the number of days since the beginning of the grain filling phase and a constant rate fixed by a parameter value. This concept, inspired from the work conducted by

Amir and Sinclair (1991), was adopted in order to be applied to several crops since the STICS is a generic model. However Guillaume *et al.* (submitted) showed that the STICS crop model does not perform satisfactory in reproducing N split effect on increasing *GNC%* of several durum wheat cultivars. They also demonstrated that the effect of N fertilization was overestimated on *GNC%* simulated response. We assumed that origin of discrepancy could be found in the fact that formalisation of grain N accumulation adopted in STICS is not sensitive enough to change in environmental conditions accounted by the crop during its growth.

The objective of the present study is to modify the grain N accumulation algorithm of STICS, and consequently to evaluate the performance of the revisited version on *GNC* and *GNC%* simulations.

The rationale for model modification is first presented and followed by the presentation of model modifications. A brief description of the data bases and the calibration procedure are provided. The impact of modification on *GNC* and *GNC%* is evaluated and compared to the initial STICS version. Additional simulation values are presented to explain the obtained results. Results are then discuss.

3.2 Material and Methods

3.2.1 Rationale for model modification

Various considerations prevailed over the choice of the formalisation tested into STICS.

Our objective was to keep identical the original STICS formalisation of the processes influencing grain N accumulation. Since crop models have their own unity and integrity, modification of algorithms for grain N accumulation must blend seamlessly with existing algorithms which priory occur in the crop model (Weiss and Moreno-Sotomayer, 2006).

In order to not make the STICS model structure to much complex, we decided to introduce a formalisation that did not induce the creation of too many additional state variables or parameters. Simulation of grain N accumulation in CERES-Wheat and SIRIUS requires previously the simulation of stem and leaf biomass and minimum N concentration. Including theses formalisations requires splitting the above-ground biomass and accumulated N among the different crop organs. It also requires having available measurements of these state variables in the data base in order to be able to estimate the required parameters and to evaluate the accuracy of model simulations. AZODYN bases the grain N accumulation simulation on the global above-ground plant N uptake (*AGPN*). It does not distinguished the sources coming from the different plant organs but it distinguishes the sources coming from remobilisation of stored N from the source coming from post-flowering N uptake (*AGNPpostflo*). *AGPN* during crop cycle is simulated in AZODYN a similar way as it is simulated in STICS (

Figure 17). It defines the daily *AGPN* increase as the minimum between crop N requirement and extractable soil N. Crop N requirements are determined by the maximum N dilution curve proposed by Justes *et al.* (1994), as it is determined in STICS.

This considerations led us to introduce the algorithm inspired from the formalisation implemented into the AZODYN crop model and described by Barbottin (Barbottin, 2004).

3.2.2 Model modification

For AZODYN model, daily *GNC* increase results from the daily confrontation between grain N demand and grain N supply, during the first half of the grain filling phase. During the second half, *GNC* daily increase results only from daily grain N supply, assuming that grain N demand never limits grain N accumulation.

The grain N demand (kgN/ha) is determined from the daily increase in *GY* (ΔGY) and the parameter *COEFGRAINC* (kgN/t) which represents the N demand per ton of *GY* (Eq. 30). In STICS, the daily increase in *GY* is determined by the variable *DLTAGS* (t/ha). The parameter *COEFGRAINC* was introduced to simulate grain N demand (

Figure 17).

$$\text{Grain N demand } (d) = \text{DLTAGS } (d) * \text{COEFGRAINC} \quad (30)$$

Grain N supply is determined by the sum of daily plant N uptake during post-flowering phase (*AGPNpostflo*) and the daily remobilized N (*MAXREMOBN*). Daily plant N uptake is already simulated by the STICS model and was not modified by the integration of new formalism. The simulation of daily remobilized N required calculation of new variables and the introduction of new parameters into the original version of STICS.

At the beginning of grain filling phase, a maximum stock of available N for remobilisation *AGPNremob* (kgN/ha) is calculated as a fraction of plant N uptake at flowering *AGPNflo* (kgN/ha) (Eq. 31). The parameter *COEFREMOBN* (kgN/t) represents the fraction of *AGPNflo* available for remobilisation. It does not depend on cultivar (Barbottin *et al.*, 2005).

$$\text{AGPNremob} = \text{COEFREMOBN} * \text{AGPNflo} \quad (31)$$

Each day, a potential stock of remobilized N, *STOCKMAXNREMOB*(d), is determined. The first day of grain filling phase, it is equal to *AGPNremob*. The days after, *STOCKMAXNREMOB*(d) is equal to difference between *AGPN* present in the vegetative parts *AGPNveg*(d) and the quantity of N non available for remobilisation (Eq. 32). *AGPNveg* is estimated daily from the difference between total *AGPN* (kgN/ha), as it is simulated in the STICS model, and grain N content *GNC* (kgN/ha).

$$\text{If } d = \text{flowering } \text{STOCKMAXNREMOB}(d) = \text{AGPNremob} \quad (32)$$

$$\text{Else } \text{STOCKMAXNREMOB}(d) = \text{AGPNveg}(d) - \text{AGPNflo} * (1 - \text{COEFREMOBN})$$

with $\text{AGPNveg}(d) = \text{AGPN}(d) - \text{GNC}(d)$

This potential stock is transferred to grain every day. The variable $MAXREMOB(d)$ represents the daily transfer of $STOCKMAXNREMOB(d)$ to grain. It depends on a kinetic parameter of remobilisation $VITIRAZO^9$ which increases linearly with the number of days since the beginning of grain filling phase (eq. 33).

$$MAXREMOB(d) = STOCKMAXNREMOB(d) * VITIRAZO * (d - (d = flo)) \quad (33)$$

The set of equations 30 to 33 were introduced into the original STICS version as simulation option, allowing the user to choose between the two formalisms for GNC simulation. The modified model is called STIC-azo.

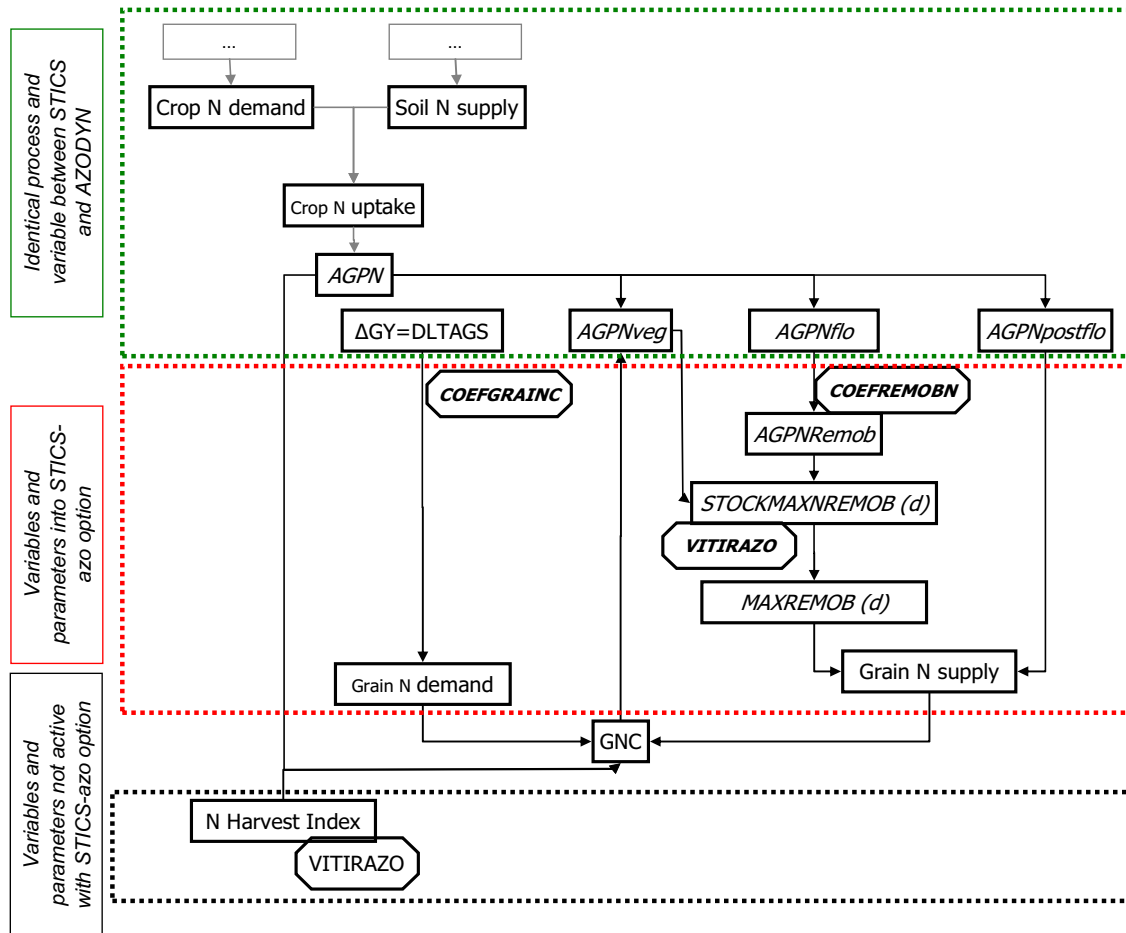


Figure 17 : Modifications, inspired from AZODYN, introduced into the original STICS version. Rectangular box stands for state variable and round box stands for parameter

3.2.3 Experimental data

Data used for the model calibration and for independent evaluation of the modified versions were identical to data used to conduct the original STICS calibration and evaluation (Guillaume *et al.*, submitted). The experimental data were collected from four experimental sites located in the south of France: Auzeville (43°31'N 1°28'E), Peyrens (43°21'N 1°57'E),

⁹ The original STICS signification of $VITIRAZO$ is modified after formalism integration

Nîmes (43°50'N 4°21'E) and Avignon (43°57'N 4°49'E). The data base contains data from 373 SYMU, covering 13 years (1996-2009) and seven cultivars (Table 11 and Table 12), each site or cultivar not necessarily being represented in each year. One SYMU (Site Year Management Unit) refer to the combination of one site*one year*one experimental treatment, including cultivar.

The data base was split into two parts. The experimental treatments with dynamic measurements were used for model calibration (the Optimisation Data Base: 'OptimDB'), while those SYMU with only end-of-season measurements were used only for evaluation (the Evaluation Data Base: 'EvalDB').

Table 11 : Description of 'OptimDB'. SYMU = Site Year Management Unit, Nsoil = measurement of soil mineral N content of a 30-cm deep soil horizon, SM = Soil Moisture of a 30-cm deep soil horizon, AGPN = Above-Ground Plant N, LAI = Leaf Area Index, AGB = Above Ground Biomass, GN = Grain Number, GY = Grain Yield, GNC% = Grain N concentration, Cultivars : Aca=Acalou, Ama=Amarillo, Llo=Lloyd, Nef=Nefer, Neo=Neodur, Mon=Montsegur

Site	Climate year	Cultivar	nb SYMU	Number of measurements						
				Nsoil	SM	AGPN	AGB	GN	GY	GNC %
Auzeville	1995-96	Neo	4	-	-	12	12	-	4	4
	1996-97	Neo	5	-	-	15	15	5	5	5
	1997-98	Neo	8	-	-	23	24	8	8	8
	1998-99	Nef/Neo	5	-	-	15	15	5	5	5
	1999-00	Nef/Neo	5	-	-	14	15	5	5	5
	2000-01	Ama/Llo/Mon /Nef/Neo	53	-	-	164	178	54	54	54
	2001-02	Ama/Llo/Mon /Nef/Neo	69	-	-	191	203	69	69	68
	2004-05	Ama/Bie/Nef/ Neo	24	72	72	84	84	24	24	24
	2005-06	Bie/Nef	15	88	88	48	48	15	15	15
	2006-07	Aca/Nef/Bie	10	94	94	44	48	11	11	11
Avignon	2001-02	Aca/Llo/Nef	3	25	160	17	36	-	-	-
	2002-03	Aca/Llo/Nef	3	10	75	16	32	-	-	-
Peyrens	2000-01	Llo/Mon/Nef/ Neo	15	-	-	58	58	15	15	15
	2001-02	Llo/Nef/Neo	12	-	-	44	44	11	11	11
Nîmes	2007-08	Nef	4	24	14	9	14	4	4	4
		Total	235	311	504	754	826	226	230	229

Table 12 : Description of 'EvalDB'. SYMU = Site Year Management Unit, GN = Grain Number, GY = Grain Yield, GNC% = Grain N concentration, Cultivars : Aca=Acalou, Ama=Amarillo, Llo=Lloyd, Nef=Nefer, Neo=Neodur, Mon=Montsegur

Site	Climate year	Cultivar	nb SYMU	Number of measurements		
				GN	GY	GNC%
Auzeville	2005-06	Aca/Ama/Bie/Mon/Nef/Neo	24	24	24	24
	2006-07	Aca/Ama/Bie/Mon/Nef/Neo	47	34	47	44
	2007-08	Bie	11	11	11	11
	2008-09	Bie	12	12	12	12
Nîmes	2000-01	Llo/Mon/Nef/Neo	16	16	16	16
	2001-02	Llo/Mon/Nef/Neo	16	16	16	16
	2005-06	Aca/Nef	8	8	8	8
	2006-07	Nef	4	4	4	4
		Total	138	125	138	135

When sufficient data were available for calculation, we decomposed *GNC* into two components: the grain N content from remobilisation of stored N in the vegetative part present at flowering (*GNCremob*, kgN/ha) and the grain N content from N uptake during post-flowering phase (*GNCpostflo*, kgN/ha) (eq. 34). As described by Barbottin *et al.* (2005), the amount of remobilized nitrogen *GNCremob* was estimated as grain nitrogen content at harvest not due to nitrogen uptake after flowering (*AGPNpostflo*, kgN/ha) (eq. 35). *AGPNpostflo* was estimated as the difference between total above-ground plant nitrogen uptake at harvest (*AGPNharvest*, kgN/ha) and above-ground plant nitrogen uptake at flowering (*AGPNflo*, kgN/ha) (eq. 36). *AGPNremob*, was set equal to *GNCremob*

$$GNC = GNCremob + GNCpostflo \quad (34)$$

$$GNCremob = GNC - AGPNpostflo = AGPNremob \quad (35)$$

$$AGPNpostflo = AGPNharvest - AGPNflo = GNCpostflo \quad (36)$$

3.2.4 Model calibration

The parameter **COEFGRAIN**C, **COEFREMOBN**, **VITIRAZO** introduced into the STICS-azo required estimation to be adapted for durum wheat. Guillaume *et al.* (submitted) estimated parameters values of the STICS crop model following three procedures. They concluded that the parameter set obtained after the three steps procedure was the most efficient one to reduce model error on both intermediate and final variables. We used the parameter set obtained after the two first steps of this procedure to simulate intermediate variables and *GY* and, since the model modification did not impact the simulation of other variables than *GNC* and *GNC%*, we only ran the last optimization step. **COEFGRAIN**C, **COEFREMOBN**, **VITIRAZO** parameters were estimated using *GNC* and *GNC%* as target variables.

3.2.5 Model evaluation

Most of the model evaluation works are done through regression plot of simulated value against measured value and/or through statistical criteria calculation (Donatelli *et al.*, 2004). This type of evaluation provides information on adequacy between simulated value and measured values but it does not provide any information on the quality of model responsiveness to change in the environment (White *et al.*, 2007). Because model evaluation procedures can inform users of the likely accuracy of a given model as well as guide for further experimental work and model revisions, we included two aspects in model evaluation. The first aspect consisted of the evaluation of model performance for *GNC* and *GNC%* simulations. We compared the performance of the two versions of the model by graphing the simulated values versus the measured ones. Evaluation was performed on 'OptimDB' and 'EvalDB' and RRMSE, MD and EF were computed. An agronomic evaluation was conducted to evaluate the capacity of the modified version to reproduce the effect of increasing fertiliser N on simulated *GY*, *GNC* and resulting *GNC%* in comparison with measurements. Subset of experimental treatments, called "NrateDB", conducted in one site (Auzeville), differing in N rate (ranging from 40 kgN to 260 kgN/ha), climatic year (2001 and 2002) and in cultivars (Lloyd, Nefer, Neodur and Montsegur) was used for this evaluation. We graphed the simulated versus the measured values of "NrateDB" and we plotted the simulated and measured values against N rate for Lloyd cultivar.

We also investigated the effect of splitting the application of 220 kg N/ha into different doses on simulated response on *GY*, *GNC* and *GNC%* (Table 13). This specific subset was called "NsplitDB".

Although *GY* (t/ha) was not affected by model modifications, illustrations of *GY* simulations are provided for each type of evaluation since it is involved in *GNC%* simulation.

Table 13 : Description of experimental treatments used as source for model response to effect of N splits : 'NsplitDB'

Treatment name	N application
E	40 kgN/ha at 3 leaves stages + 180 kgN/ha at one cm ear stage
E/DFL	40 kgN/ha at 3 leaves stages + 120 kgN/ha at one cm ear stage + 60 kgN/ha at flag leaf emergence
E/FLO	40 kgN/ha at 3 leaves stages + 120 kgN/ha at one cm ear stage + 60 kgN/ha at flowering
E/DFL/FLO	40 kgN/ha at 3 leaves stages + 60 kgN/ha at one cm ear stage + 60 kgN/ha at flag leaf emergence + 60 kgN/ha at flowering

The second aspect of the evaluation was concerned with the identification of source of model errors. We conducted this step through the graphing of model residues of *AGPNflo* and *AGPNpostflo* against measured values to identify some trends in model errors with available data from 'NsplitDB'. We finally analyse the simulated values of some state variables which influence the simulation of *AGPNpostflo*.

3.3 Results

3.3.1 Estimated parameter values

Estimated parameter values are given in Table 14.

Table 14 : Estimated parameters values and signification

Parameters	Signification	Units	Estimated value
<i>COEFREMOBN</i>	Fraction of <i>AGPNflo</i> available for remobilisation	(-)	0.69
<i>COEFGRAIN</i>	Ratio between N and C demand	kgN.kgC ⁻¹	0.027
<i>VITIRAZO</i>	Rate of N remobilisation	day ⁻¹	0.00772

3.3.2 Impact of modifications on 'OptimDB' simulations

Simulated *GY* on 'OptimDB' is presented in Figure 18.

GNC simulations with STICS and with STICS-azo are presented in Figure 19. Model modification decreased the systematic bias of simulation. There are less overestimated and underestimated situations than with the original version of STICS. However, EF and RRMSE were not significantly improved by model modification.

Impact of model modification on resulting *GNC%* simulation is shown in Figure 20. Model modification decreased the performance of *GNC%* simulations and introduced a bias with some cultivars: Acalou and Montsegur are overestimated and Lloyd is underestimated.

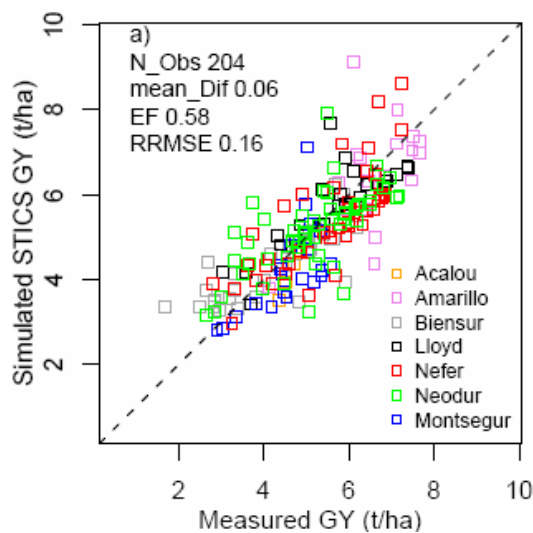


Figure 18 : Simulated GY (t/ha) with STICS on 'OptimDB'.

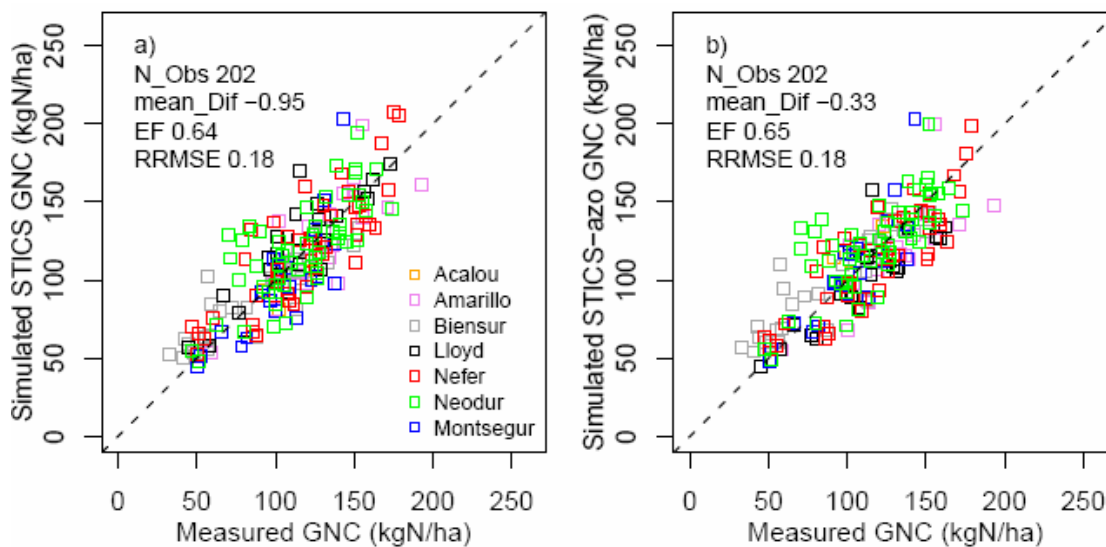


Figure 19 : Simulated GNC (kgN/ha) with STICS (a) and STICS-azo (b) versus measured GNC (kgN/ha) on 'OptimDB'.

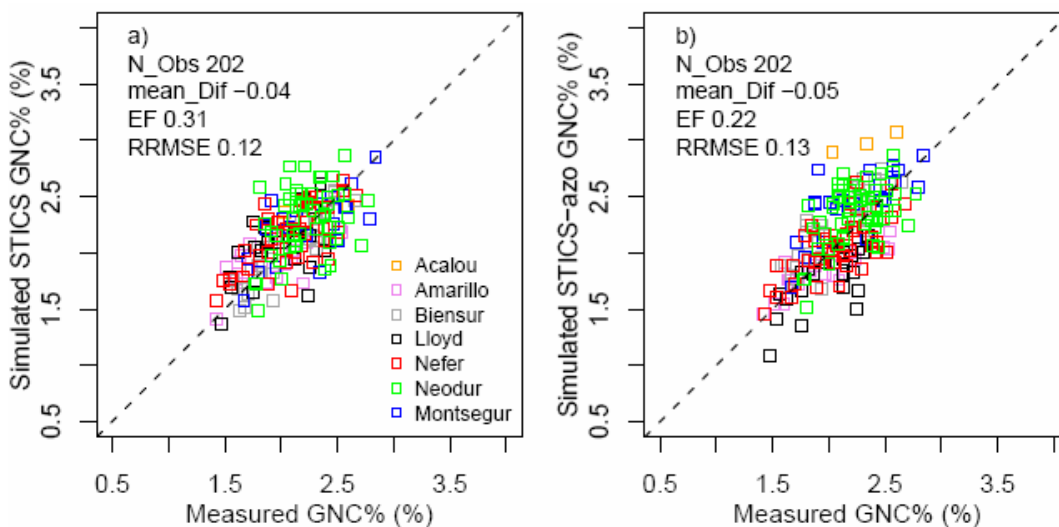


Figure 20 : Simulated GNC% (%) with STICS (a) and STICS-azo (b) versus measured GNC% (%) on the 'OptimDB'.

3.3.3 Impact of modifications on 'EvalDB' simulations

Simulated *GY* on 'EvalDB' is presented in Figure 21. *GY* for Biensur, Neodur and Lloyd are globally well estimated and simulations are distributed on each side of the line 1:1 but Montsegur and Acalou are systematically underestimated on this data base.

Simulated *GNC* with STICS and STICS-azo are presented in Figure 22. Model modification lightly increased EF and lightly decreased RRMSE and systematic bias. STICS overestimated the *GNC* values for Lloyd and Nefer cultivars which received around 200kgN/ha and STICS-azo now underestimates them.

Simulated *GNC%* with STICS and with STICS-azo are presented in Figure 23. Biensur and Lloyd benefited from model modification but the overall model performance for *GNC%* simulations was deteriorated after model modification (increase of mean-dif, and decrease of RRMSE). This is mainly due to an overestimation of a group of treatment comprising Acalou, Nefer and Montsegur cultivar.

Conclusions on model performance depend on how model is evaluated. Looking at regression graphs of simulated versus measured values of output variables and statistical criteria indicates how a model performs globally for a given output model variable. However, it does not give information of how sensitive is the model to change in environmental conditions. The objective of model modification was to obtain a more sensitive model to change in fertilizer N management. For these reason, we evaluated the response of the new model to change in N management and compared it with the original STICS version.

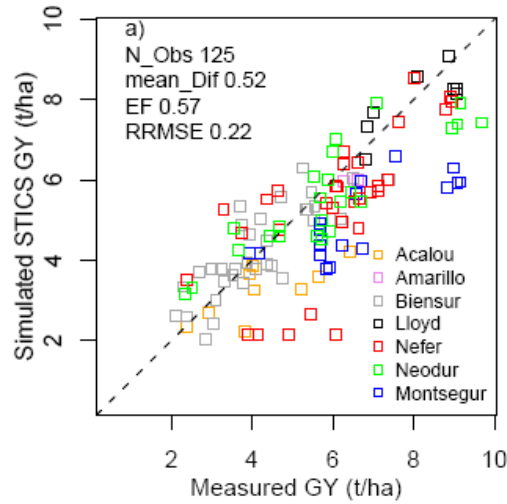


Figure 21 : Simulated GY (t/ha) with STICS on the 'EvalDB'.

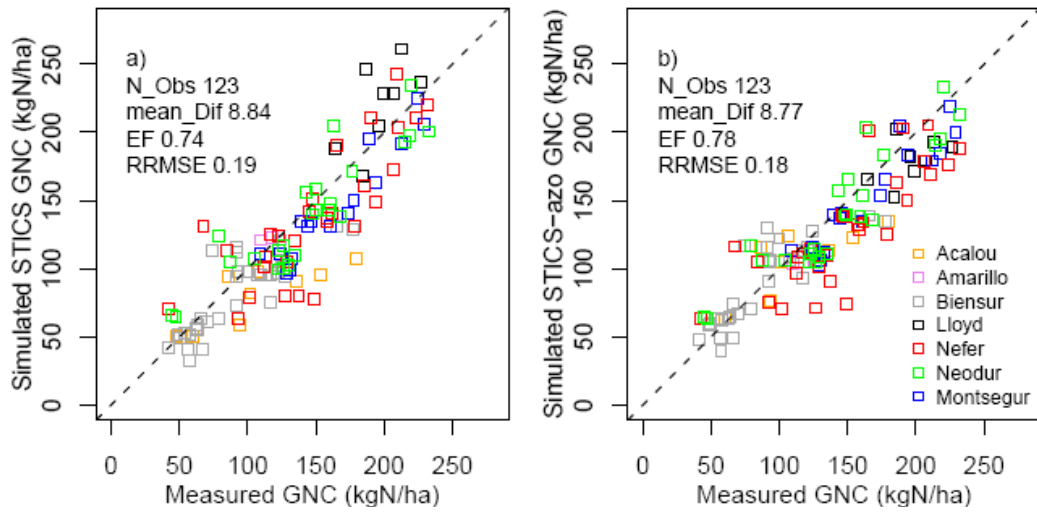


Figure 22 : Simulated GNC (kgN/ha) with STICS (a) and STICS-azo (b) versus measured GNC (kgN/ha) on the 'EvalDB'.

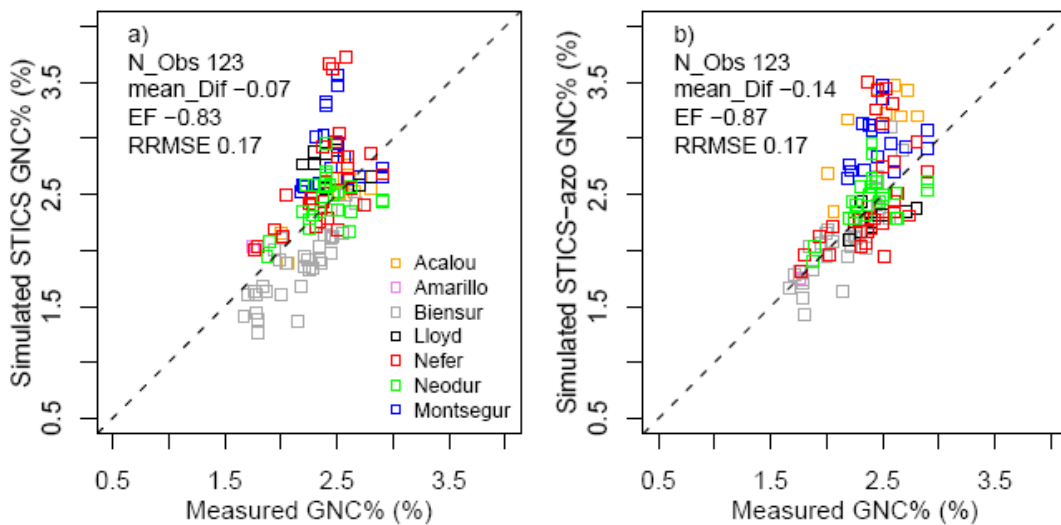


Figure 23 : Simulated GNC% (%) with STICS (a) and STICS-azo (b) versus measured GNC (kgN/ha) on the 'EvalDB'.

3.3.4 Model response to N rate

The simulated and measured *GY* for 'NrateDB' are presented in Figure 24. The model performs quite satisfactory for simulated *GY* of 'NrateDB' for the different cultivars and N rates. In 2002, the low N treatment is overestimated by the model but the other simulated values are within the range of measured values. The opposite is observed in 2001 with a satisfactory estimation of low N treatments and overestimation of high N treatments.

Measured and simulated *GNC* as function of N rate for four cultivars are presented in Figure 25. Model modification improved *GNC* simulation on 'NrateDB' (EF increase and RRMSE and mean difference decrease). When looking at Lloyd simulations, the *GNC* response to N rate was identical whatever the experimental year. In 2001, the response was overestimated leading to overestimation of high *GNC* values. In 2002, *GNC* values were systematically overestimated. Model modification led to a perfect reproduction of the *GNC* increase measured in 2002. The simulated response is still overestimated for the year 2001.

Figure 26 represents simulated *GNC%* (%) with STICS and STICS-azo as well as *GNC%* response for Lloyd. The modification reduced mean difference and RRMSE and increase EF. It improved model response to N rate in 2001 but not in 2002 for which the response is still over estimated compared to measurement.

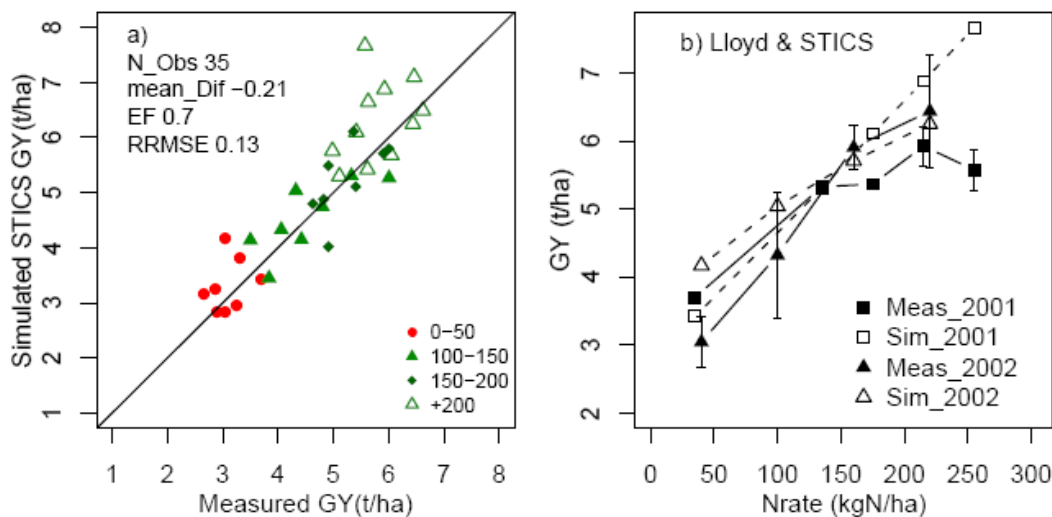


Figure 24 : Simulated vs measured *GY* (t/ha) for 'NrateDB' as function of N rate (kgN/ha) (a) and simulated and measured *GY* responses to change in Nrate for Lloyd (b).

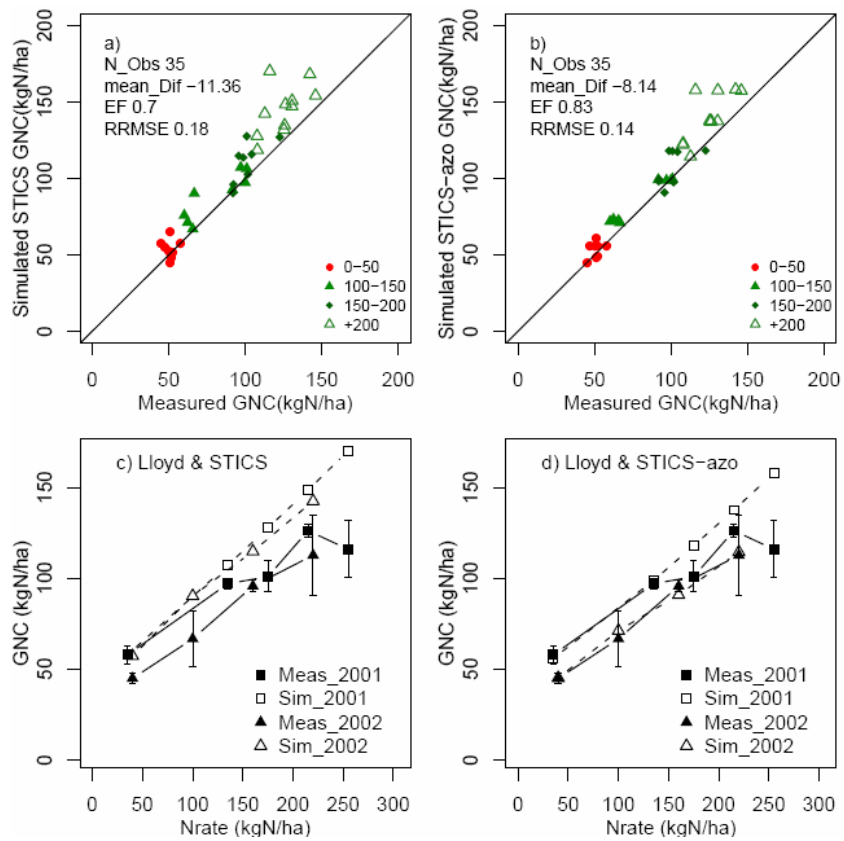


Figure 25 : Simulated vs measured GNC (kgN/ha) for 'NrateDB' with STICS(a) and and STICS-azo (b). Simulated and measured GNC response to change in Nrate for Lloyd with STICS (c) and STICS-azo (d).

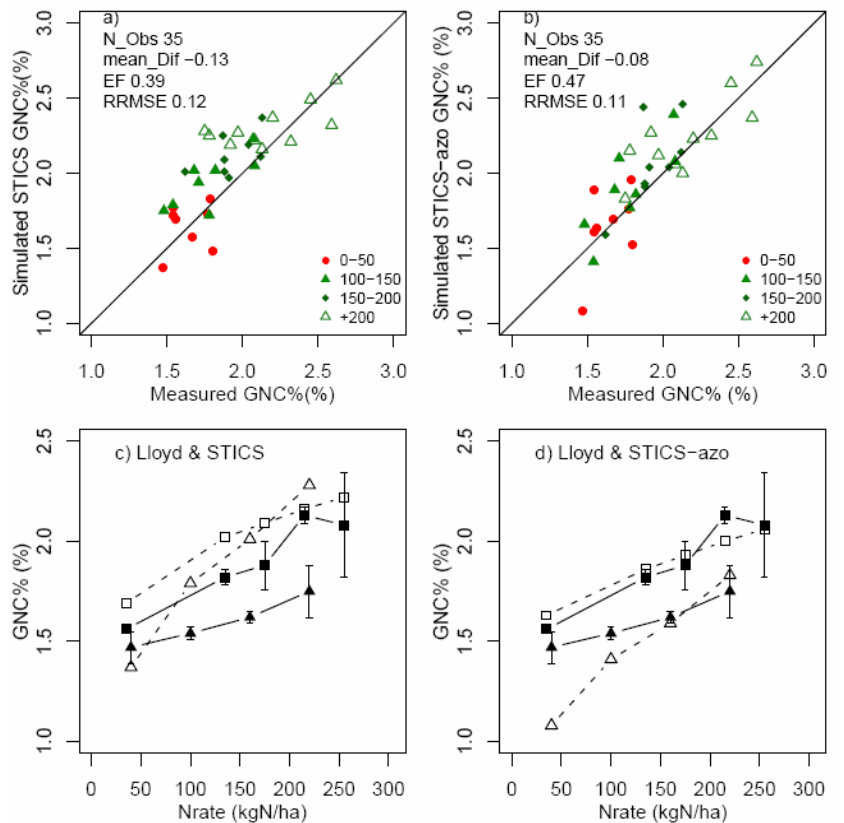


Figure 26 : Simulated vs measured $GNC\%$ (%) for 'NrateDB' with STICS(a) and and STICS-azo (b). Simulated and measured $GNC\%$ (%) response to change in Nrate for Lloyd with STICS (c) and STICS-azo (d).

3.3.5 Model response to N split

The other aspect concerning model response to N management refers to effect of N split on simulation.

Figure 27 represents measured and simulated *GY* for the four cultivars of 'NsplitDB'. For all of these cultivars, *GY* slightly decreased with number of N applications. Model responses are consistent with simulated result since simulated *GY* also decreases with N split and late N application.

Figure 28 presents the *GNC* (kgN/ha) for the four cultivars of 'NsplitDB'. For all treatment s the measured *GNC* increase with the number of application and late N application. STICS and STICS-azo differ in the value of simulated *GNC* but they produce a similar response to N split, opposite to what is measured: the more and the later the N is splitted, the lower the simulated *GNC* is. Considering the fact that *GY* response is correctly reproduced, these contrasting response leads to a non response of the simulated *GNC%* whatever the N split (Figure 29).

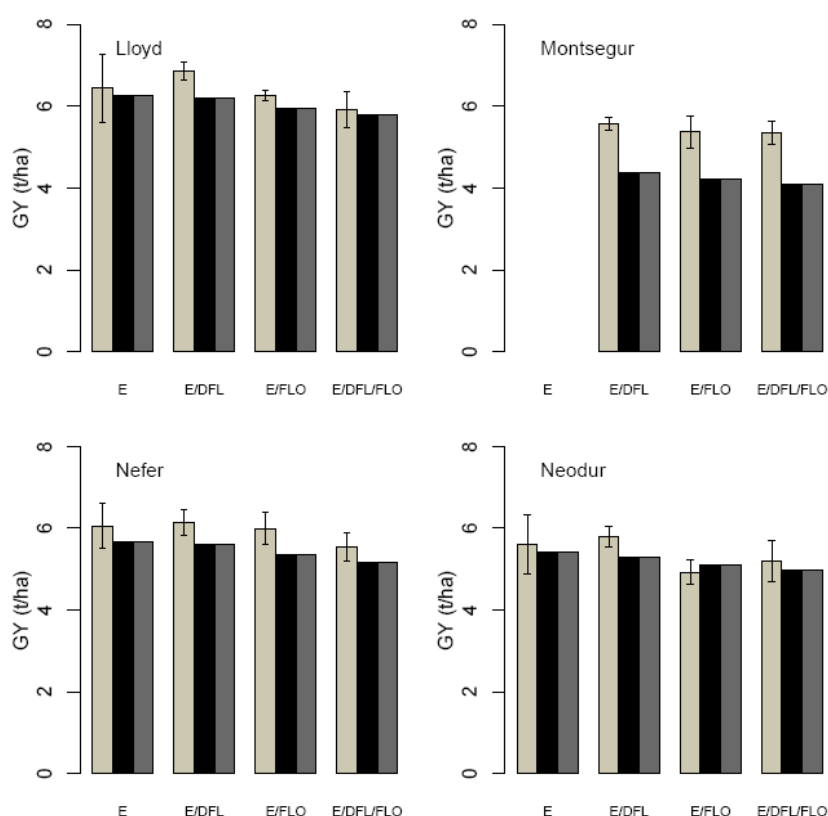


Figure 27 : Measured and simulated GY (t/ha) for four N splits and four cultivars of the 'NsplitDB'. Light grey bars represent measured values, dark bars represent simulated values with STICS and dark grey bars represent simulated value with STICS-azo. x label signification are founded in Table 13. The same legend is applied for Figure 26 and 27.

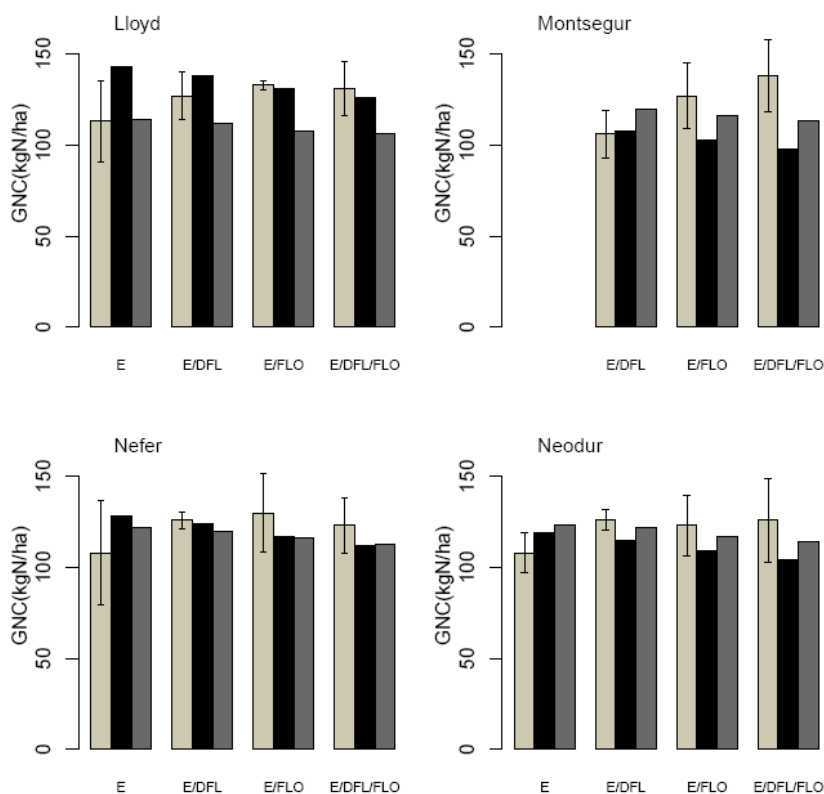


Figure 28 : Measured and simulated GNC (kgN/ha) for four N splits and four cultivars. The legend is the same as Figure 27.

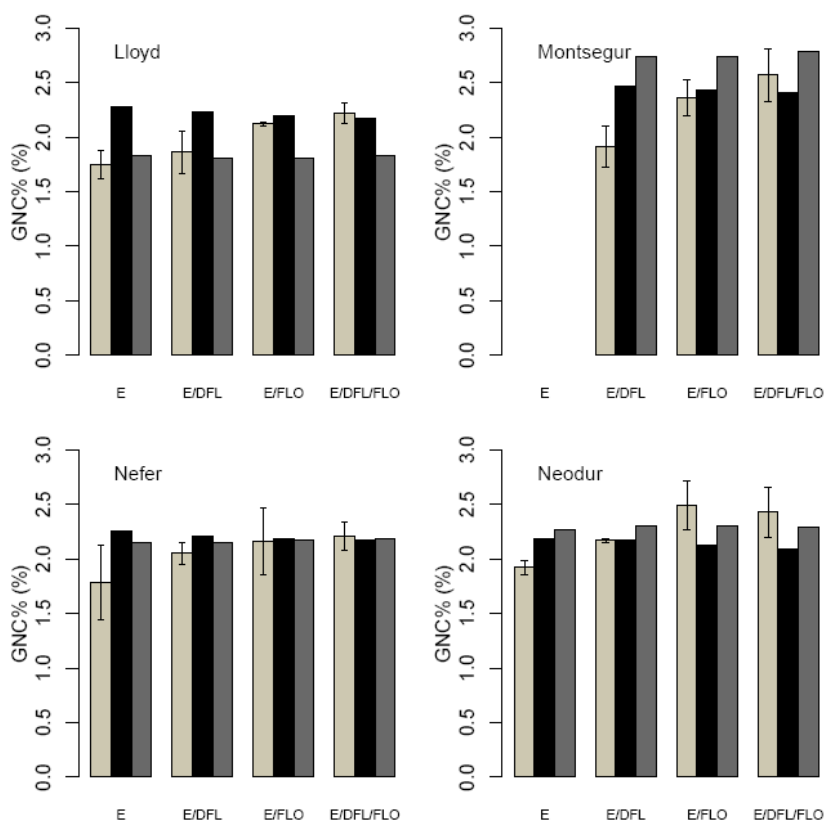


Figure 29 : Measured and simulated GNC% (%) for four N splits and four cultivars. The legend is the same as Figure 27.

3.3.6 Identification of source of model error

Model modification consists of transferring a fraction of the *AGPN* present at flowering and the entire post-flowering crop N uptake into the grain. The lack of sensible increase in *GNC* when N split increases suggests that the effect of N split and late fertilizer N application on *AGPNflo* and *AGPNpostflo* is not correctly taken into account.

Field experiments used in this study were not specifically designed to provide data for model evaluation. Hence measurements of state variables are lacking (no *LAI* dynamic, *AGPNflo* and *AGPNflo* for each treatments and cultivars...). We disposed of very few data to conduct the evaluation of sub-components.

Graphing the available *AGPNflo* and *AGPNpostflo* residuals as function of measured values and number of splits (Figure 30a) tends to indicate that *AGPNflo* is often underestimated (Figure 30a). For Lloyd, the underestimation is the same whatever the N application. For Neodur, *AGPNflo* is strongly underestimated. The reduced number of observation with regard to the number of complex dynamic processes involved in the simulation of this variable made impossible to identify the source of model error.

Figure 30 also indicates that the higher the measured *AGPNpostflo* is, the stronger the model underestimation is (Figure 30b).

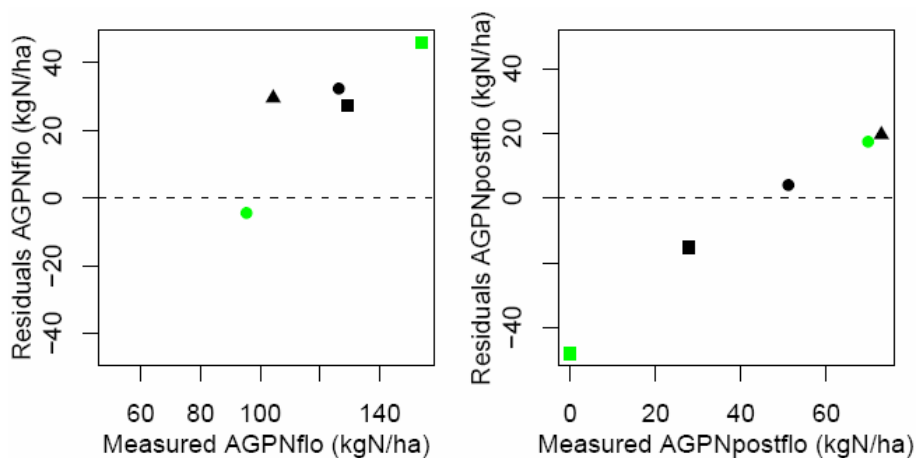


Figure 30 : Residuals (measurements-simulations) of *AGPNflo* (a) and *AGPNpostflo* (b) as function of measured values. Black symbols refer to Lloyd cultivar, green symbols refer to Neodur cultivar. Square represents E treatment, circles represent E/DFL treatment, triangles represent E/DFL/FLO treatment

The table 15 provides information on simulated values influencing *AGPNpostflo* values.

Table 15 : Values of simulated states variables influencing crop N uptake during post-flowering phase

Cultivars	Treatment	Simulated $AGPN_{postflo}$	Measured $AGPN_{postflo}$	Simulated extractable soil N during post-flo	Simulated crop N demand during post-flo	Simulated $AGB_{postflo}$	Measured $AGB_{postflo}$
Lloyd	E	43	28	50	76	4.0	5
	E/DFL	47	51	55	76	4.1	NA
	E/FLO	49	NA	57	77	4.1	6.4
	E/DFL/FLO	53	73	63	79	4.2	6.3
Montsegur	E	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	E/DFL	50	NA	55	80	4.4	NA
	E/FLO	52	NA	57	80	4.3	NA
Nefer	E	41	NA	48	82	4.5	NA
	E/DFL	51	NA	53	81	4.6	NA
	E/FLO	53	NA	56	81	4.5	NA
Neodur	E	48	0	50	82	4.3	4.5
	E/DFL	52	70	55	82	4.5	6.1
	E/FLO	54	NA	57	83	4.4	NA
	E/DFL/FLO	58	NA	63	84	4.5	NA

In STICS and in STICS-azo, daily $AGPN$ increase represents the minimum value between daily crop N demand and daily extractable soil N. Several hypotheses were formulated to explain the underestimation of $AGPN_{postflo}$ for late N application (Figure 31) : H1: the model does not uptake soil N during the post-flowering phase or H2 : the daily crop N demand is underestimated and/or H3: the extractable soil N supply is not sufficient and/or H4 the duration of post-flowering soil N uptake is too short.

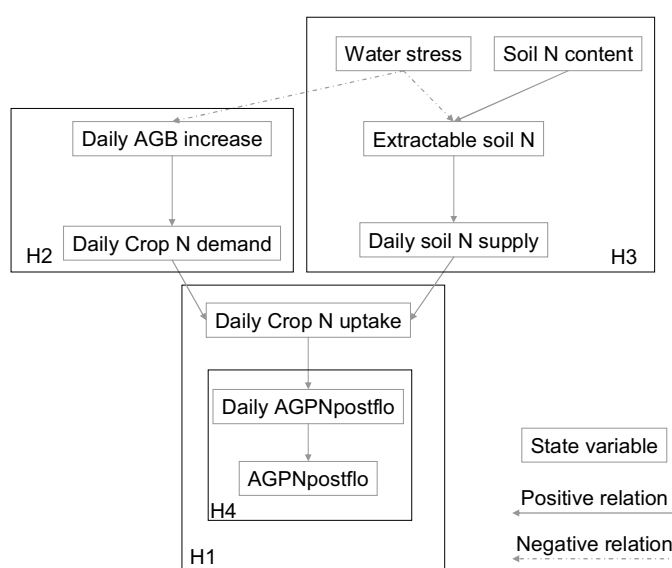


Figure 31 : The different variables involved in $AGPN_{postflo}$ simulation and the hypothesis build to find origin of model error.

- 1) During post-flowering phase, simulated $AGPN_{postflo}$ is positive, indicating that the simulated crop continues to uptake N from the soil profile during post-flowering phase. This invalid the first hypothesis
- 2) Adequacy between simulated crop N demand and real crop N demand can be tackled through the comparison of AGB values which determines crop N requirement. We have very few data but it seems that AGB is underestimated for late N application. Moreover, the measured increase in AGB with late N application is not reproduced among the simulated value. This could have been the source of underestimation of $AGPN_{postflo}$ but the fact that crop N demand is always higher than extractable soil N does not pull in this direction. It is not the crop N demand which limits the crop N uptake for late N applications.
- 3) Simulated extractable soil N increases with N splits and late N applications. This result indicates that the model takes into account the effect of late N application on soil N status. The fact that the $AGPN_{postflo}$ is not equal to the extractable soil N indicates that all the extractable soil N is not taken up by the crop and implies that crop N limitation occurs some days. Crop N limitation occurs when crop undergoes water stress due to depletion of soil water reserve. Since the water stress index is calculated as the ratio between the available water content and the water content threshold limiting transpiration, water stress undergone by the crop suggests that soil water status limits also soil N availability and so extractable soil N. However, in the case of early applications, crop N uptake is overestimated which suggests that soil water status does not limit too much soil N availability. Unfortunately, evaluating adequacy between simulated and real values is not possible given the available data.
- 4) Maturity is simulated 37 days after grain begun to fill. This is lower than the duration of the grain filling period estimated under controlled experiment by Dias and Lidon (2009) which ranges between 45 and 56 days depending on cultivars and heat stress but higher than the duration estimated by Bahlouli *et al.* (2008) who estimated the grain filling duration to 20 days under Algerian conditions. However the fact that the real harvest, delayed by two days of 30mm rainfall, occurred 10 days after the simulated maturity and that simulated grain water humidity was 10% at harvest day indicates that even if simulated grain filling period is shortened, it is not more than some few days. This can not explain alone the lack of differentiation between treatments.

Interpretation of model response without sufficient data representing the crop and soil dynamic status is quite complex because of the numerous interactions. This strongly limits the identification of the model discrepancy.

3.4 Discussion and conclusion

The modifications introduced into the STICS-azo version consisted in the transformation of the grain N accumulation formalism. In STICS-azo, the *GNC* comes from the remobilisation of stored N of the vegetative part and from post-flowering crop N uptake. This modification implied the estimation of the new parameter values. The fraction of *AGPN* available for remobilisation (*COEFREMOBN*) was estimated by optimisation to 0.69 in our study. It is lower than the value published by Barbottin *et al.* (2005) who estimated a value of 0.76 for soft wheat. The lower value we obtained might reflect a higher post-flowering N uptake contribution to grain N accumulation for durum wheat species compare to soft wheat. The lack of experimental studies comparing N remobilisation for soft wheat and durum wheat does not allow going deeper in the conclusion. The different parameter values might also reflect the different environmental conditions accounted in our experiments. Indeed, Cox *et al.* (1986) identified a reduced fraction available for remobilisation for higher N fertilisation treatments. The ratio between N and C demand (*COEFGRAINC*) was estimated to 0.27 kgN/kgC which is similar to the value included in the original version of AZODYN (Barbottin, 2004). The value of the rate of N remobilisation (*VITIRAZO*) was estimated to 7.72 day⁻¹. Reference value for this parameter was not published in AZODYN description (Barbottin, 2004; Barbottin *et al.*, 2006; David and Jeuffroy, 2009), making the interpretation of this value not feasible.

The introduction of the formalism inspired from the AZODYN crop model modified the *GNC* simulations. However, this modification induced only a slight improvement of *GNC* simulations on overall data of 'OptimDB' and 'EvalDB'. Concerning 'NrateDB', the effect of the modification on model response to increasing N rate was stronger than on the previous database. STICS-azo simulates more accurately the *GNC* values for treatments differing in N rate than STICS. It also better reproduces the effect of N rate increase on *GNC* increase, within a range 40-260 kgN/ha N.

The slight improvement observed concerning the *GNC* simulations was not followed by an improvement of *GNC%* simulations. Performance of STICS-azo to simulate *GNC%* values on 'OptimDB' and 'EvalDB' are worse than the performance of the STICS model. On OptimDB, the range of simulated values exceeds the ranges of the measured one and on EvalDB, even if the low *GNC%* values are better simulated after modification, a group of treatments are

strongly overestimated. On 'NrateDB' the *GNC%* response to increasing N rate in 2001 is strongly over estimated despite the perfect response of *GNC* for this year. Inversely, the *GNC%* response in 2002 is accurate despite an over response of *GNC*.

The fact that *GNC%* simulations depends simultaneously on *GNC* and *GY* simulated values explains that a better fit of simulated *GNC* values to measured values does not systematically lead to an improvement of *GNC%*. Accurate simulation of *GNC%* requires then the simultaneous accurate simulation of *GNC* and *GY*. The accuracy of these variables is determined by the process components involved in crop N uptake and biomass accumulation and transfer into the grain.

In STICS, the grain N accumulation is based on the daily transfer of a fraction of *AGPN*. The contribution of post-flowering N uptake to final *GNC* was not known. We assumed that the non response of the model to late N applications was due to this formalism. In the STICS-azo formalism, the entire post-flowering crop N uptake is transferred to the grain. By modifying the formalism of *GNC*, we assumed to achieve a better sensitivity of *GNC* and resulting *GNC%* simulations to the effect of N split. The result we obtained showed that the origin of non response was not due to the formalism of grain N accumulation. This led us to conduct a more detailed analysis of model behaviour. Detailed analysis of residuals and simulation on 'NsplitDB' revealed that the modified model reproduces the effect of late N application on higher post-flowering soil N supply and crop N uptake but without sufficient intensity to increase the final simulated *GNC*. The field experiments and the collected data used in this study were not designed for model development and evaluation. The limitations in the data set leave unanswered some questions on the source of model errors. More information regarding soil N and water dynamic would have been of great interest to identify the adequacy between simulation and real soil status. More information about crop N status and *LAI* dynamic during flowering and during the post-flowering phase would have helped to identify the consequences of the soil status on simulated crop dynamics. This eggs on for the introduction of a minimum recording of state variables at key development stages like flowering and maturity into experimental fields, if there is an objective of reusing the information into a modelling exercise.

Improvement of *GY* simulations would have required revisiting algorithm of dry matter accumulation in grain which was not the objective of this study. Revision of dry matter accumulation in grain could be conducted by the integration of a source/sink approach as it applied in the modified version of the CERES-Wheat proposed by Weiss and Moreno-Sotomayer (Weiss and Moreno-Sotomayer, 2006) or as it applied in STICS for indeterminate crops. This approach is based on the confrontation between sink strength factor representing

the potential dry matter increase and a source factor representing available biomass for grain. This approach implies to simulate the stem reserves available for translocation to grain. Difficulties in the revision does not necessary comes from the adaptation that has to be conducted to adopt these approach but rather on the data that should be available to estimate the required parameters and to evaluate model performances. Since field experiments used as source for this study were not specifically designed for model improvement or model evaluation, no information on biomass partition in the different organs or information with regard to the dynamic evolution of *GY* were available. Model further improvement requires that additional data should be collected to evaluate the dynamic of dry matter accumulation into grain and the contribution of the different vegetative organs.

In most crop models devoted to wheat simulation (Asseng *et al.*, 2001; Barbottin, 2004; Weiss and Moreno-Sotomayer, 2006; Martre *et al.*, 2006), *GNC%* is the result of *GY* and *GNC* simulation. Accurate simulation requires both accurate simulation of *GY* and *GNC*, which can be revealed quite complex given the number of processes interacting together. To overcome the necessity to have accurate simulation for both of these variables for *GNC%* prediction, Pan *et al* (2006) identified four meteorological and five genotypic factors which influence the value of *GNC%*. Meteorological factor were daily mean temperature, daily mean amplitude temperature, total sunshine hours and precipitation from anthesis to maturity. The genotypic factors were the average protein concentration of the cultivar, the physiological vernalization requirement, the temperature, photoperiod and rainfall sensitivity. They quantified by stepwise regression procedure their effect on *GNC%* and propose a statistical model to predict *GNC%* over different growing conditions. Application of this formalism into STICS would not have conducted toward a better response of *GNC%* to N management since management practices were not introduced into the model. However, the use of statistical approaches to quantify the effects of external factor together with crop status and management practice on *GNC%* value might be of interest to overcome the difficulties of achieving a simultaneous accurate *GY* and *GNC* simulations.

Ce qu'il faut retenir

Dans sa structure initiale et après le travail de paramétrage, STICS n'est pas sensible à l'effet du fractionnement sur l'augmentation de la quantité d'azote dans les grains et la teneur en protéines qui en dépend. J'ai fait l'hypothèse que ce manque de sensibilité provenait du formalisme générique mobilisé pour simuler l'accumulation d'azote dans les grains, basé sur un indice de récolte en azote.

Un formalisme inspiré du modèle AZODYN a été intégré à STICS pour différencier l'azote des grains provenant de la remobilisation de l'azote stocké par la plante de l'azote provenant de l'absorption tardive en phase post-floraison. L'introduction de ce formalisme a permis d'améliorer la précision des simulations de la quantité d'azote dans les grains mais n'a pas permis d'améliorer la sensibilité du modèle à l'effet du fractionnement de la fertilisation azotée. L'amélioration, même légère, de la simulation de la quantité d'azote dans les grains s'est opérée au détriment de la simulation de la teneur en azote.

L'introduction de ce formalisme a toutefois permis de révéler que le manque de sensibilité du modèle ne provenait pas du formalisme d'accumulation d'azote dans les grains mais d'un déficit d'absorption en phase post-floraison pour les applications tardives. L'absence de données expérimentales caractérisant l'état hydrique et la disponibilité en azote du sol n'a pas permis de conclure sur l'origine de cette sous-estimation. Ce travail démontre qu'il sera nécessaire d'acquérir de nouvelles données écophysiologiques en phase post-floraison pour pouvoir améliorer le diagnostic des sources d'erreur et d'être en mesure de proposer des améliorations pertinentes pour permettre une meilleure amélioration du formalisme STICS vis-à-vis de la simulation de la teneur en protéines.

Partie II : PRATIQUES ET DECISIONS RELATIVES A L'IRRIGATION ET A LA FERTILIZATION AZOTEE

Cette deuxième partie est consacrée à la présentation des travaux de thèse conduits dans le cadre de la conception d'un modèle de décision pour les pratiques de fertilisation et d'irrigation du blé dur.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats d'enquêtes et du modèle de décision construit à l'issue des enquêtes réalisées.

Le cinquième chapitre est consacré à l'évaluation par simulation de stratégies de gestion de l'irrigation et de la fertilisation, les stratégies ayant été construites sur la base des résultats de l'enquête.

Chapitre 4 Elaboration du modèle conceptuel des décisions d'irrigation et de fertilisation azotée

Chapitre 4

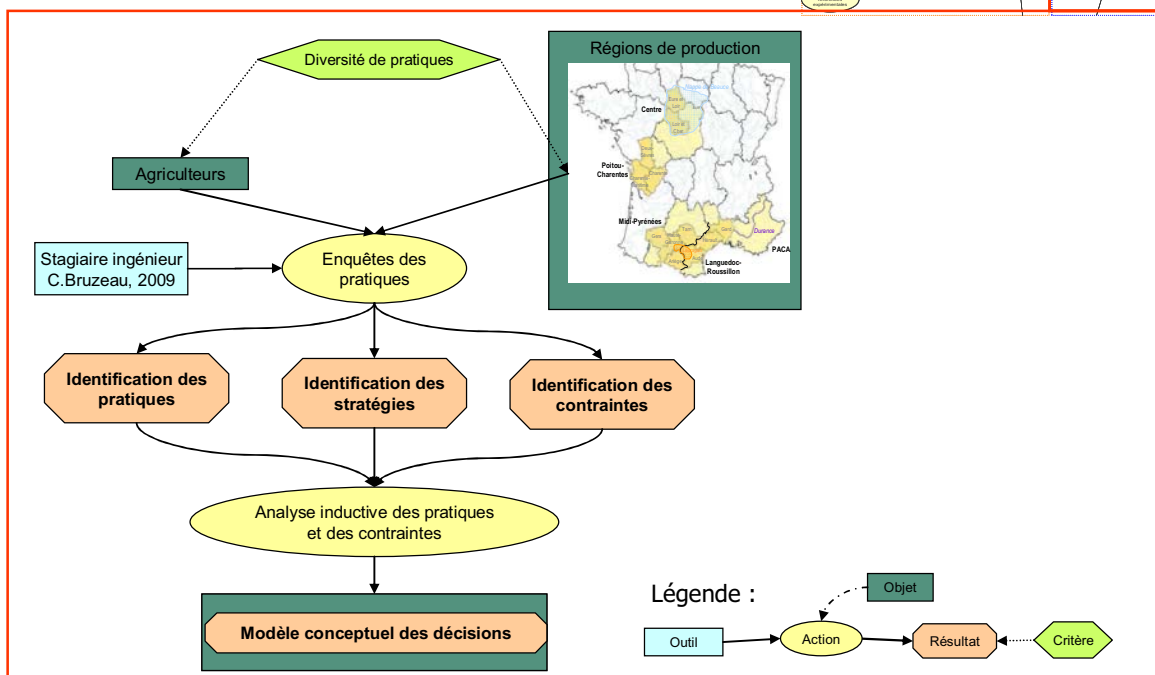
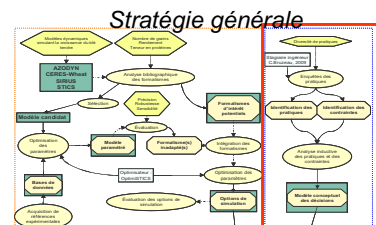


Figure 32 : Représentation simplifiée des éléments constituant le chapitre 4

Le deuxième objectif de la thèse est d'élaborer un modèle de décision de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur. Pour répondre à cet objectif, une enquête des pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation a été réalisée en exploitation agricole. L'enquête a permis d'identifier les pratiques, les stratégies et les contraintes des agriculteurs. Par une analyse inductive, un modèle conceptuel des décisions a été élaboré. La Figure 32 représente les éléments abordés dans ce quatrième chapitre.

L'article qui suit intitulé « Analysing farming practices to develop a conceptual model of farmers' decision-making processes for nitrogen fertilization and irrigation on durum wheat » présente le travail conduit dans ce cadre. Il est destiné à être soumis à *Agricultural Systems* dans le courant de l'année 2011.

Analysing farming practices to develop a conceptual model of farmers' decision-making processes for nitrogen fertilization and irrigation on durum wheat

S. Guillaume, C. Bruzeau, E., Justes, J-E. Bergez

4.1 Introduction

France, with an annual production of two million tons, is the first durum wheat production area of the European Union (FranceAgriMer, 2010). Durum wheat production requires to have high grain nitrogen concentration for transformation into pasta and semolina, which is its only market (Di Fonzo N. *et al.*, 2000; Troccoli *et al.*, 2000). Nitrogen fertilization ensures farmers to obtain a production satisfying this characteristic (Haberle *et al.*, 2008). Because water deficit reduces grain yield (Eck, 1988), depending on the annual climatic characteristic, irrigation might also be required to ensure economically profitable grain yield for farmer. Through its action on soil moisture, irrigation can increase soil N availability (Sluckhai and Zhabitskii, 1970 in Guttieri *et al.*, 2005) and contribute to the achievement of farmer objectives. However, irrigation may decrease grain protein content by dilution of nitrogen with carbohydrates if nitrogen availability is not increased adequately and thus reduce final grain N concentration (Eck, 1988; Guttieri *et al.*, 2005). Irrigation and nitrogen fertilization have then to be managed simultaneously to maximise grain yield production while avoiding low protein concentration (Saint Pierre *et al.*, 2008).

French durum wheat production is now moving in a context marked by energy prices increase, subsidies reduction, competition on water use and societal demand for the environment preservation. This new context calls for changes in crop management and raises the need for tool to evaluate alternative crop management strategies regarding coordinate irrigation and nitrogen fertilization that combine satisfactory high grain quality production levels and minimum environmental impacts.

Biophysical crop models have been developed for several decades to support the design and the evaluation of innovative crop management practices (Loyce and Wery, 2006). They provide opportunities for researchers to test many management options in a reasonable time step, to obtain different types of criteria which are difficult to measure on field, and to speculate on the long-term consequences of change in technical management (Meynard *et al.*, 2002; Semenov *et al.*, 2009). However, management practices in these models are represented as static parameters. They are not considered as the result of farmer decision-making process

and then, are not necessary adapted to the farmer production context in evolution (Vayssieres *et al.*, 2007). Bergez *et al.* (2010) argue that the development of biodecisional models, coupling a biophysical model to a decision model of farmer decision-making process, can help researcher to evaluate and propose cropping practices adapted to farmer context which better stick to reality.

Biodecisional models link biophysical crop models simulating the crop growth development in interaction with its physical environment, and a decision model representing the farmer decision making process and constraints (Merot, 2008). Example of such biodecisional models are MODERATO (Bergez *et al.*, 2001), IRRIGATE (Merot and Bergez, 2010) or DECIBLE (Aubry *et al.*, 1996; Chatelin *et al.*, 2005). Farmer decision making processes in these models are based on decision rules. MODERATO was developed for use by irrigation advisors confronted with the question “how to irrigate maize confronted with a limited amount of water?”. It aims at providing guidelines for strategic decisions related to irrigation, i.e. the decisions made before the irrigation campaign has begun (Trouvat, 1997 in Bergez *et al.*, 2007). IRRIGATE was developed for border hay irrigation, which is different from the irrigation operated in maize and durum wheat in term of organisation and technique. DECIBLE was developed to evaluate the impact of tillage, sowing and nitrogen fertilization decision on wheat growth. The crop model is made of empirical relations and does not provide information at a daily time step. Irrigation operations are not taken into account and water deficit affects only the final grain yield components and not overall the crop growth.

Concerning fertilization, practices on durum wheat were already the object of some studies (Aubry *et al.*, 1998 ; AGRESTE, 2004 ; AGRESTE, 2008b), but most of these studies were focused on the description of the technical operations and not on the explanation of the determinant of the operations (Aubry *et al.*, 1998). The way farmers are taken their decision is rarely explained. Concerning irrigation, durum wheat irrigation is far less important than maize irrigation (Morardet *et al.*, 1998) and is not submitted to administrative declaration. This explains that there is little knowledge on irrigation durum wheat practices (Deumier *et al.*, 2008). To our knowledge, the way farmers jointly manage irrigation and N fertilization in durum wheat cultivation have never been studied.

The study presented in this paper takes place in a project which aims at developing a biodecisional model for irrigation and nitrogen fertilization for durum wheat cultivars (Guillaume *et al.*, 2009). The biophysical crop model STICS has already been adapted for several durum cultivars (Guillaume *et al.*, submitted). In this study, we identified and analysed farming practices of irrigation and nitrogen fertilization in durum wheat production

in order to build the conceptual model of decision. The study was based on interviews with farmers about their practices and the determinants.

The goal of the paper is (i) to identify on-farm practices concerning nitrogen fertilization and irrigation management for durum wheat (ii) to identify if farmer jointly manage these two operations and (iii) to propose a conceptual decision model of irrigation and fertilization technical operation for durum wheat based on decision rules.

The material and methods used to conduct the study are presented in the next section. Farmers' management practices and strategies are presented in the result section together with the description of the decisional sequences and the decision-making process. Last section presents discussion and conclusion.

4.2 Material and methods

4.2.1 Theoretical background

We were interested into the identification and the formalization of technical decisions which refer to irrigation and nitrogen fertilization management on durum wheat. Technical decisions are the decisions that are taken to manage the production system (Vayssieres *et al.*, 2007). They are not to the decisions which represent production choices and productive resources gathering. Based on temporal horizon, different types of technical decisions are distinguished. For Trouvat (1987), the strategic decisions are the seasonal technical decisions that are taken at the beginning of the season, with possible adjustment during the season. The tactical decisions are the technical decisions that are taken during the season (Bergez *et al.*, 2007).

Sebillote and Soler proposed in 1988 the 'Model for action' to represent farmer's technical decision making process (Figure 33). The model for action is composed of i) one or several general objectives that guide technical decision making, (ii) an anticipated planning schedules of the technical operations that have to be conducted in order to reach the objectives and iii) a set of decision rules and indicators designed to run the operations (Sébillotte and Soler, 1988). For annual crops, this approach has been used successfully for representing the management of winter wheat crop (Aubry *et al.*, 1998), cotton (Dounias *et al.*, 2002).

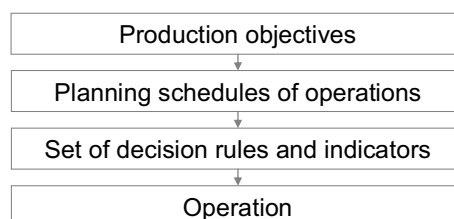


Figure 33 : A simplified representation of the 'model of action' proposed by Sébillotte and Soler (1988).

4.2.2 Study areas and farmers sampling

In order to identify the set of possible farmers' decision and constraints, we wanted to investigate a diversity of practices concerning irrigation and N fertilization management. In France, durum wheat is grown in five production regions: the Centre region (C), the Poitou-Charentes region (PC), the Midi-Pyrenees region (MP), the Languedoc-Roussillon region (LR) and the Provence-Alpes-Cotes d'Azur region (PACA) (Figure 34). The five study areas differ in term of climatic characteristic: C is the coldest region during spring time and the region with the lowest climatic demand (ETo). The water deficit ($P-ET_0 < 0$) starts from April and is the lowest of the five region. PC has oceanic climate with a cool and rainy winter and spring. The water deficit starts from May. Winter in MP is cool and humid. Spring and early summer are hot and humid. Water deficit starts from March. PACA and LR have Mediterranean climate with hot and dry summer. Water deficit is strong and start from February.

Because irrigation requirement depends on crop water needs which are influenced by climatic demand, the first source of practices diversity was though to be found between production areas.

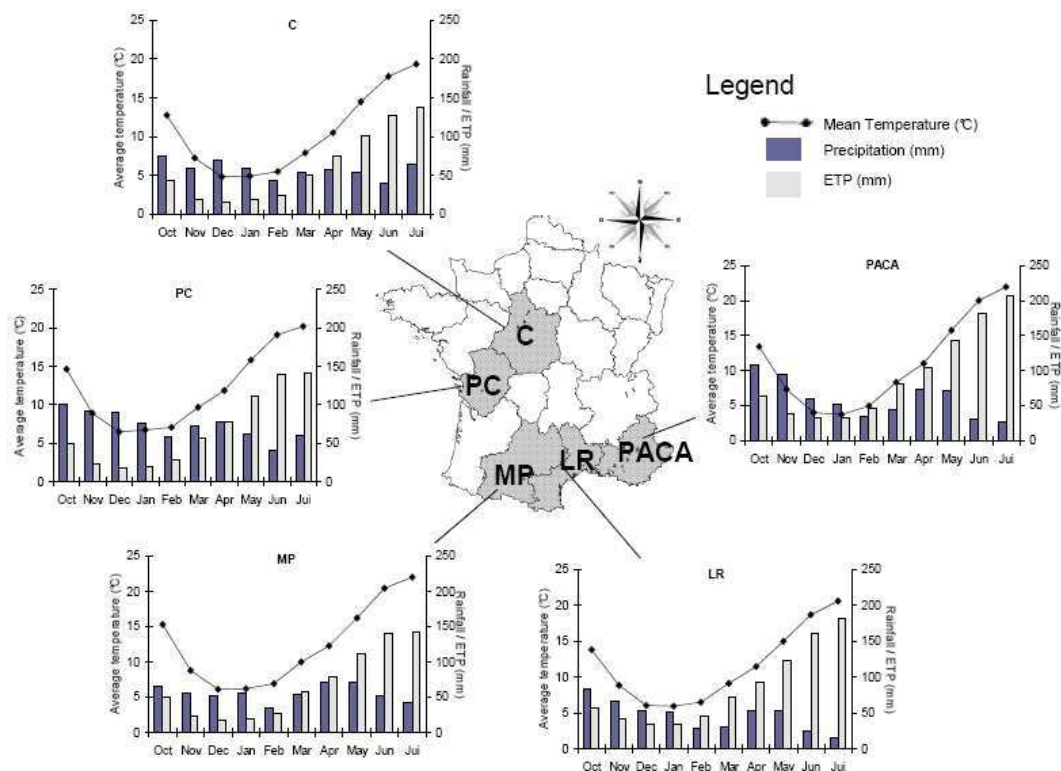


Figure 34 : French durum wheat production regions and climatic characteristics. Climatic data are averaged climatic data over the period 1998-2008 from the Arvalis Institut du Végétal climatic stations

The second source of practices diversity was thought to be found through farms production systems. A preliminary survey was conducted with four regional engineers from the French technical institute for cereals crops and maize production “Arvalis-Institut du Végétal” to localise precisely the area with irrigable durum wheat and identify sampling criteria which allow catching on-farm diversity practices among the selected areas. Criteria which were proposed and selected are presented in Table 16.

Table 16: Regional sampling criteria

	C	PC	MP	LR and PACA
Criteria 1	Number of cultivated crops	Attributed water volume	Number of irrigated crops	Attributed water volume
Criteria 2	Type of cultivated crop	Soil depth	Farm Size	Travelling sprinklers /center pivot irrigation
Criteria 3	Soil depth	Number of cultivated crops	Localisation in the area	-

4.2.3 Farm Survey

Farm surveys were conducted in May and June 2009. Six farmers per production area were interviewed, with an exception for LR where only five farmers were interviewed, making the sample size to 28 farmers.

We mobilised the concept of the ‘model of action’ to collected the information. Interview was semi-structured and organised into three phases¹⁰. The goal of the first phase was to identify farmer’s production objectives assigned to durum wheat cultivation and major production systems constraints which influence durum wheat production. Questions were asked about farmers’ general production objectives, type of crop production, land, equipment and water resources. The second phase of the interview was focused on N fertilization and irrigation management. Farmers were asked to position the different technical operations on a timeline and to describe their practices of irrigation and nitrogen fertilization. The third phase consisted in making explicit the choice to conduct the operation and in identifying the different indicators taken into account. Interviewer asked the farmers to comment on how they take decision, what information they use and what are the operations that has to be done when an option is selected.

4.2.4 Analysis of interviews and conception of the decision model

Objectives of the survey was to identify farmer practices and to generate the decision making process taken by farmers. We used the general inductive approach to analyse individual cases

¹⁰ Le guide d’entretien est présenté en annexe II.

and built up a conceptual model of the decision with a bottom-up approach (Blais and Martineau, 2006).

The first step in the analysis of farmers' interviews consisted in the individual synthesis of the collected information by the form of an individual monograph comprising several items. The items were inspired by the different parts constituting the 'model of actions'. The individual monographs were sent to each farmer who was asked to modify and/or validate it. Twenty-two farmers out of the twenty-nine returned the monograph as validated. The left seven farmers did not return the monograph¹¹.

The second step consisted in the illustrative representation of the technical operations met in each studied region along a unique timeline per region. From the illustrative representation of a first farmer practices, the practices of a second farmers were reported with emphasis on similarities and on variations between the previously reported practices. The action was repeated as many times as there were farmers surveyed by region. This step allowed us to identify decisions common to several farmers, to identify the common elements involved in the decision and to identify the elements encountered in specific situations. We then identified and defined the decisional sequences involved in the decision making process of fertilization and irrigation. A decisional sequence is defined as all decisions taken by the farmer who led him to define the modalities of intervention. The decisional sequences were detailed by the form of decision rules. Following propositions of Aubry *et al.* (1998), we structured the decision sequences according to time of intervention and distinguished the strategic decision sequences that are taken before the operation has to be done and the tactical sequences that are taken when the operation has to be done.

¹¹ Un exemple de monographie est fourni en annexe III

4.3 Results

Management practices and strategies identified from the survey will be presented first. Then, the decisional sequences and the decision-making process will be presented and detailed.

4.3.1 Farmer's management practices and strategies

Fertilization equipment, management and constraints

Durum wheat destination is in majority for food industry (Table 17). Three farms, exclusively in LR, cultivate durum wheat for breeding. Farmer who produce durum wheat for food industries have the objective to provide high grain N concentration production in quantity whereas farmers who produce durum wheat for breeding company do not have objective of grain N concentration.

In 2008, the total N dose applied varied between 110 kg N/ha and 260 kg N/ha. The total N dose was split into one to six applications.

All farms have their own equipment for N fertilization. Two types of equipment can be used for N fertilization: the spreader fertilizer (Se) and the sprayer fertilizer (Sy). Seventeen farms have only Se, three have only Sy and height farms have both equipments. Farms of LR, PACA and MP use only one equipment for N fertilization (Se in a large majority), whereas most of the farms of PC and C use both equipments.

Four types of fertilizers were applied: combined NPK fertilizer, solid ammonium nitrate, solid urea, combined and urea ammonium nitrate solution. Solid ammonium nitrate was the most common used fertilizer (18 farms). It provides rapidly available nitrogen for crop N uptake to soil. Urea was only used in south of France on five farms. Urea ammonium nitrate solution was only used in C and PC on farms equipped with storage tank. When different types of fertilizer were used during crop cycle, combined NPK fertilizer was used for early applications and ammonium nitrate was preferred for late N application around flowering. The choice of the type of fertilizer depends on price, on application period, on machinery available as well as on storage capacity.

Most of the durum wheat cultivated area is under specific legislation.

Table 17 : Durum wheat destination and fertilization practices and equipment. (Sy =Sprayer fertilizer , Se = spreader fertilizer, NPK = ternary fertilizer with Nitrogen/Phoporus/Potassium, Nliq = liquid fertilizer)

Area	Farm	Destination	N rate	N split	Fertilizer machinery	Fertiliser type	Constraining legislation
C	C1	Food industry	220-250	3	Sy & Se	NPK+Nliq	yes
	C2	Food industry	-	-	Sy	Nliq	yes
	C3	Food industry	140-110	-	Sy & Se	Nliq+ Ammo	yes
	C4	Food industry	220	-	Sy & Se	NPK+Nliq+ Ammo	yes
	C5	Food industry	200	3	Sy	Nliq	yes
	C6	Food industry	180-200	3-4	Sy & Se	Nliq+ Ammo	yes
PC	PC1	Food industry	220	4	Se	Ammo	yes
	PC2	Food industry	180-190	3	Se	NPK+ Ammo+ Urea	yes
	PC3	Food industry	200	3	Sy & Se	Nliq	yes
	PC4	Food industry	210	6	Sy & Se	Nliq+ Ammo	yes
	PC5	Food industry	210	3	Sy & Se	Nliq	yes
	PC6	Food industry	250	4	Sy & Se	Nliq+ Ammo	no
MP	MP1	Food industry	170-210	4	Se	Ammo+ Urea	no
	MP2	Food industry	250	4	Se	Urea+ Souffre	yes
	MP3	Food industry	220	4-5	Se	Ammo	yes
	MP4	Food industry	200	4	Se	Ammo	no
	MP5	Food industry	240	4	Se	Ammo	yes
	MP6	Food industry	230	4	Sy	Nliq	yes
LR	LR1	Breeding	160-240	2-3	Se	Ammo	no
	LR2	Food industry	140	2	Se	Ammo	no
	LR3	Food industry	180	2-4	Se	Urea	no
	LR4	Breeding	150	2-3	Se	Urea	no
	LR5	Breeding	90-150	1-3	Se	Ammo	yes
PACA	PACA1	Food industry	260	4	Se	Ammo	no
	PACA2	Food industry	175	3	Se	NPK+ Urea	no
	PACA3	Food industry	200	3-4	Se	Ammo	no
	PACA4	Food industry	180	3	Se	Ammo	no
	PACA5	Food industry	240	3	Se	NPK+ Ammo	no

Table 18 : Irrigation resource equipment and strategy. (C=Collective water resource, I = individual water resource and p/l/r subscripts = pumping/lack/river. TG=Travelling Gun, LM=Lateral Move, CP=Central Pivot)

Area	Farm	Irrigation resource	Limited water contract	Administrative water restriction	Limitation due to lack of resource?	Irrigation equipment	Irrigation strategy
C	C1	Ip	yes	yes	yes	5 TG; 1 LM	insurance
	C2	C	yes	no	yes	2 LM	insurance
	C3	Ip	yes	no	no	2 TG	supplementary
	C4	Ip/C	yes	no	yes	3 TG	insurance
	C5	Ip/C	yes	yes	no	3 TG	insurance
	C6	Ip	yes	no	no	2 TG	insurance
PC	PC1	Il	yes	yes	no	3 TG	supplementary
	PC2	Ip	yes	yes	yes	4 TG	supplementary
	PC3	Ip	yes	yes	no	2 TG	insurance
	PC4	Ip	yes	yes	no	2 TG	supplementary
	PC5	Ip/C	yes	yes	no	4 TG	insurance
	PC6	Ip	yes	yes	no	2 CP; 1 TG	supplementary
MP	MP1	C	no	no	yes	4 TG	supplementary
	MP2	Ip/C	no	no	no	1 CP; 1 TG	supplementary
	MP3	Il	yes	no	yes	5 TG	supplementary
	MP4	C	no	no	no	1 TG	supplementary
	MP5	C	no	no	no	1 TG	supplementary
	MP6	Ir	yes	no	no	2 CP; 4 TG	supplementary
LR	LR1	Ip, Ir	no	no	no	5 TG	survival
	LR2	C	no	no	no	1 TG	insurance
	LR3	C	no	yes	no	1 TG	survival
	LR4	C	no	no	yes	5 TG	insurance
	LR5	C	no	no	no	1 TG	supplementary
PACA	PACA1	C	no	no	no	1 CP; 5 TG	survival
	PACA2	C	no	no	no	3 CP; 2 LM; 3 TG	survival
	PACA3	Ip/C	no	no	no	15 TG	survival
	PACA4	C	no	no	no	5 TG	insurance
	PACA5	Ip/C	no	no	no	2 CP; 4 TG	survival

Irrigation equipment, management and constraints

Water resource for irrigation was collective (C) and shared between several users in 14 farms and/or came from individual resource (I) in 18 farms (Table 18). Four farms had both sources of water. In case of individual resource, water came from groundwater pumping (Ip) in 15 cases, or from individual lake (Il) in two cases. One farm had access to river pumping and one farm had access to river pumping together with groundwater pumping. Individual water resource was found in majority in C and PC whereas collective water resource was mostly founded in LR. Both types of resources were found in MP and PACA.

Sixteen farmers received a contract determining the available water volume to conduct irrigation over the farm irrigable area. These are all farmers located in C and PC and some farmers of MP. Farmers received their initial contract in March. In C and PC, the initial contract was often reviewed and reduced. Irrigation was also sometimes forbidden during summer when water reserves were too low to supply water for all non-agricultural usage.

Three type of equipment existed for durum wheat irrigation: the lateral move (LM), the travelling gun (TG) and the central pivot irrigation (CP). TG was the most common equipment since 27 farms had this equipment. TG was the only equipment for 20 out of these 27 farms. CP was used in six farms for durum wheat irrigation and LM was used in three farms. CP and LM are permanent equipments. They were used for durum wheat irrigation when durum wheat when located on field equipped with such equipment. Durum wheat allocation to this field was the result of crop rotation rather than a real desire of the farmer to irrigate durum wheat with such equipment.

Irrigation management results from farmers' motivations, regional climate, available on farm water resource and the presence of other cultivated crops. In C, durum wheat is irrigated to increase the attainable yield and increase durum wheat profitability. In PC, durum wheat irrigation is relatively recent. It is a result of an adaptation to the administrative limitations of irrigation that maize has to face more frequently. In MP, durum wheat irrigation is not a common practice. Durum wheat was located on irrigable area as a result of crop rotation. Irrigation water is uppermost reserved for summer crops like maize or soybean. In PACA and LR, irrigation was required by the climatic demand and the low soil water holding capacity. Without irrigation, grain yield were low.

Three irrigation strategies were identified from the survey: the supplementary irrigation strategy, the insurance irrigation strategy and the survival irrigation strategy.

The supplementary irrigation strategy consisted in irrigating durum wheat only in case of severe drought to limit yield losses. Irrigation was not planned at the beginning of crop cycle and water was applied only once in the crop cycle. Irrigation resulted in the application of 30

mm water per cycle. All farmers from MP and farmers of C and PC who suffered from the lack of available resources at farm level applied this strategy.

The insurance irrigation strategy consisted in irrigating crop to increase the attainable yield. Irrigation was planned at the beginning of crop cycle and consisted of one to three water applications. Irrigation could reach 90 mm over the crop cycle. Farmers from C and PC with unlimited water volume applied this strategy.

The survival irrigation strategy consisted of systematically irrigating durum wheat in order to maintain an economically profitable yield in area where water deficits are frequent and drastically limit rainfed durum wheat cultivation. The term “survival” refers to term used by some farmers to symbolize that rainfed durum wheat cultivation is non profitable. This strategy consisted of several systematic applications during crop cycle (between 3 and 7). Farmers from PACA followed this strategy.

Jointed management of fertilization and irrigation

One third of surveyed farmers declared that they never irrigated to increase N availability because they follow a supplementary irrigation strategy in which irrigation water is kept for sever water stress events. To limit the risk of inefficient N application, they split the total N dose into four applications.

Two third of sampled farmers declared that they jointly manage N fertilization and irrigation. It is seldom planned at the beginning of crop cycle and the decision comes once N fertilization has to be applied. Two situations were identified. In the first situation, N is applied first and farmers irrigate if N fertilization application is not followed by precipitation and the water soil status is considered not sufficient to make N available for crop. In the second situation, irrigation is planned in the coming days and fertilization is applied before the planned irrigation event in order to make the N available for crop.

4.3.2 Decisional sequences and decision-making process

Four decisional sequences for fertilization and five decisional sequences for irrigation were identified from farmer survey (Figure 35). The decisional sequences are of two types according to time dimension: the strategic decisions, which are taken at the beginning of the crop growth cycle and before the operation have to be conducted, and the tactical decision, which taken during the crop growth cycle when intervention has to be conducted. There are three strategic decisional sequences for fertilization and for irrigation. There is only one tactical decisional sequence for fertilization and two tactical decisional sequences for irrigation.

The strategic decision-making processes for irrigation are independent of the decision-making process for fertilization. Inter-relation occurred only at tactical level when fertilization or irrigation must be triggered.

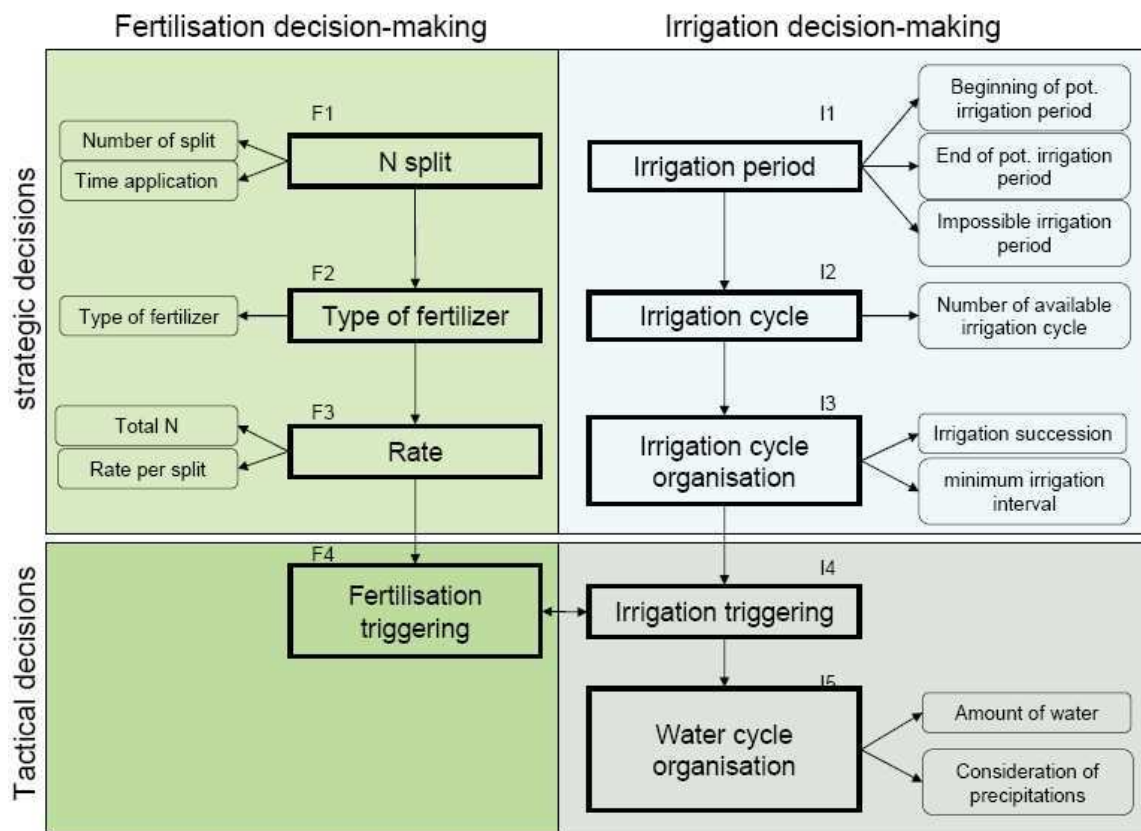


Figure 35 : Decisional sequences for N fertilization and irrigation

Strategic fertilization decision-making process

Three strategic decision sequences were identified after survey concerning fertilization. The first decisional sequence for fertilization F1 consists of determining i) the number and ii) the time of N application (Table 19). All farmers applied total N rate in at least two applications. Farmers who cultivate durum wheat for food industries have production objectives according to minimum grain protein concentration. They recognize the benefit of applying the last N application at the end of vegetative phase, around flowering, to increase grain quality. They all split N rate into three splits at a minimum. Farmers who cultivate durum wheat for breeders do not have objectives of high protein concentration. Their objective is to maximise the grain number. They do not apply N around flowering and split the total N in general in two splits. Farmers who have fields under special legislation (nitrate-vulnerable zone, Natura 2000 area for biodiversity, drinking water capture zones) express the necessity to split the total N rate into several splits in order to not exceed the maximum N rate per application fixed by the legislation to 100 kg N/ha.

The approximate times of N application is estimated in advances from observed date of appearance of key development stages during previous years. The key development stages are the one provided by technical adviser and they are not reconsidered every year by the farmer. The legislation in nitrate vulnerable zone forbids N application before the 15th of January. Farmers which produce durum wheat for food industries pay attention to apply the last N application around flowering.

The second decisional sequence F2 consists of the determination of the fertilizer type. Farmers who did not have storage tank or fertilizer sprayer bought only solid fertilizer (urea or solid ammonium nitrate). The price is then the most cited element taken into account by farmers to decide for a fertilizer type. Urea ammonium nitrate solution was then often used by farmers. Most of the farmer preferred solid ammonium nitrate to urea because of a more rapid availability of N to plant and lower risk of N loss due to urea hydrolyse. Solid ammonium nitrate was also preferred to urea ammonium nitrate solution for the late N application because farmers considered that the risk of leaves burning was high at that time.

The third decisional sequence F3 consists of the determination of the total N rate and the estimated rate for each split. This sequence occurs in January before the first N application and once the soil N mineralization has been estimated based on winter climatic conditions. Seventeen farmers estimated fertilizer N rate by making a nitrogen budget between soil N supply and crop N demand. N rate determination by nitrogen budget is mandatory for fields subject to specific legislation. Legislation also limits the maximal N rate to 210 kg N/ha. Eight farmers did not take into account soil N supply and determined the N rate only on crop need by multiplying the expecting grain yield by a 3.5 coefficient representing the durum wheat N demand per kg of grain. Three farmers applied always the same N rate irrespective of the year.

Farmers first estimated rate for the first N application, then the rate for late N application and finally, the rate for the other application. The first N application represented 25% of total N rate but it should not exceed the legal dose on specific legislation. Between 30 to 80 kg N/ha were reserved for late N application in case of food industry commercialisation. The left N to be applied was determinate by the difference between total N rate and first plus late N applications. In case this quantity exceeded 100kgN/ha, it was split into two applications.

Table 19 : Details of the three strategic decisional sequences identified for fertilization decision-making process

Decisional sequences	Action at the end of decisional sequences	Decision in the sequences	Decision rule	Indicator
F1 : N split	The number and time of N application : Nsplit and Dappli	1. Choice of the number of application Nsplit	If commercialisation= food industries → Nsplit>=3 If commercialisation = breeders→Nsplit>=2	Commercialisation {food industry ; breeders}
		2. Choice of the time application d'apport	If Farm localisation ∈ (ZV or Nat or Pot)→ Nsplit>=3	Farm localisation {ZV, Nat, Pot}
			Dappli = average date of reference development stage	Development stage Commercialisation
			If Commercialisation= food industries → Dlastappli =Day flag leaf emergence If Farm localisation ∈ (ZV) → Dappli >15 january	Farm localisation {ZV, Nat, Pot}
F2 : Type of fertilizer	Determination of fertilizer type (FTi) for each N application	1. Choice between fertilizer type (pFT) solid (S) or liquid (L) form	If Stockage tank=yes→ possible Fertilizer Type (pFT) =L&S else pFT=S	Stockage tank? {yes, no}
		2. Choice of fertilizer at each application (FTi)	If pFT=L&S and Machinery = (Sy,Se). → pFT=L&S If pFT=L&S and If Machinery = only Se. →pFT=S	Machinery {Sy ; Se}
			If pFT=L&S → FT=min (priceL, priceS) else FT=min(priceS)	Fertilizer price
			If FT= S or L&S and Dappli = flag leaf emergence then FTlastappli = Ammonitre	Machinery {Sy ; Se} Dappli
F3 : Total N Rate	Determination of the total N rate (Ntot) and dose for each split (Ni)	1. Computation of total N rate (Ntot)	If Farm localisation ∈ (ZV or Nat or Pot)→ Ntot = min (f(N budget), 210 kgN/ha) Else Ntot = min(f(N budget) , 3.5 * grain yield objective) N first appli =0.25*Ntot	Farm localisation Indicator use for N budget grain yield objective
		2. determination of N rate for each split (Ni)	If Commercialisation= food industries →N last appli ∈ [30-80] kgN/h 2 nd Nappli = Ntot-N first appli - N last appli Farm localisation ∈ (ZV or Nat or Pot) and if 2 nd Nappli>100 then split again N appli	Commercialisation Ntot Farm localisation {ZV, Nat, Pot}

Planning irrigation decision-making process

Irrigation decision-making process consists in the determination of the potential irrigation period (I1), the determination of potential number of irrigation cycle (I2), and in the organisation of the irrigation among the different fields (I3) (Table 20).

In the first sequence I1, the beginning, the end and the impossible irrigation period are set. Irrigation often required electricity for individual pumping or for collective water distribution among the canal. The date of commissioning of preferential electricity contracts offered by national French electricity company determined the beginning of the possible period irrigation. It happens on the first of April. Before this date, all farmers consider that electricity costs are too high to make irrigation economically profitable. Eleven farmers declared that they have never irrigated before this date even if the crop needed it. The rest of the sample declared that they never have suffered from such a water deficit that irrigation was needed before April. One farmer declared the potential irrigation period for durum wheat starts once potatoes are planted.

Nine farmers declared to avoid irrigation during period surrounding flowering in order to limit the risk of Fusarium. Farmers who decide to irrigate within the period adapt their protection strategy by applying fungicide before and after water application.

End of possible irrigation period is set according to development stage. Ten farmers considered dough stage as the last intervention stage, four considered milk stage and four considered the flowering stage. Two farmers mentioned that the possible irrigation period finished once the irrigation period for the priority crop has started because of irrigation equipment scarcity. Farmers who follow a supplementary irrigation strategy did not decide for the end of irrigation period.

The second irrigation decision sequence I2 consists in the determination of the maximum number of water applications possible for durum wheat. This decision sequence concerns only farmers who considered their water volume is generally insufficient to irrigate all the irrigable area. They are relatively few but the result influences the rest of irrigation management. Compared to summer crops, durum wheat is never the priority crop for irrigation. It is however the priority crop among winter irrigable crops. The number of maximum allowed application was determined according to the water volume allocated to the farm and the water volume reserved for summer crop irrigation. The irrigable durum wheat area influences the possible number of water application.

The third irrigation decisional sequence I3 consists in determining the succession of the irrigable fields and the minimum irrigation interval between two water applications.

Ten farmers declared that the fields with the lowest soil water holding capacity are the fields which require irrigation at first. For seven farmers, the “easier” fields are irrigated first. The term “easier” had different significations. For some farmers it refers to the nearest fields from the farm. Starting irrigation on these fields permits to verify the good functioning of irrigation devices. For other farmers, “easier” refers to fields equipped with permanent canalisation, LM or CP because they do not need additional labour work to install irrigation equipment. The minimum irrigation interval is determined by farmers who follow a strategy of insurance or a survival irrigation because they plan to irrigate more than once over the crop cycle. The determination of the minimum irrigation interval will later influence the amount of water to be applied at each irrigation. The most common interval mentioned by farmer was 10 days but it ranged between 5 to 15 days. Minimum irrigation interval was always set to the duration of irrigation cycle plus additional days in order to allow the farmer to conduct the other on-farm activity.

Table 20 Details of the three strategic decisional sequences identified for irrigation decision-making process

Decisional sequences	Action at the end of decisional sequences	Decision in the sequences	Decision rule	Indicator
<u>I1 : Possible Irrigation period</u>	Possible irrigation period (Pirri)	1. beginning irrigation period (Pirri_start)	If water resource=l → Pirri > 1th April If water resource =C → Pirri > day of start of water distribution	Water ressource {I,C} Date
		2. impossible irrigation period (PNolrri)	If Day= +/- 7 days around flowering → PNolrri	Date Flowering
		3. End of irrigation period (Pirri_end)	If Equipment competition=No → Pirri_end = reference development stage If Equipment competition=Yes → Pirri_end = beginning of irrigation period for summer crops	Equipment competition {yes, no} Development stage
<u>I2 Possible Irrigation cycle</u>	Number possible irrigation cycle (Nwater)	1. How many irrigation cycles are possible for durum wheat (Nwater)	$N_{water} = \frac{\left(\frac{Water\ volume_{total} - Water\ volume_{summer\ crops}}{Irrigable\ durum\ wheat\ area} \right)}{Average\ water\ application\ on\ durum\ wheat} / 10$	Water volume Water volume for summer crops Irrigable durum wheat area
<u>I3 : Irrigation cycle organisation</u>	Irrigation succession and minimum irrigation interval	1. Which field will be irrigated first (F_Irri_first)	F_Irri_first = the nearest field from homestead or F_Irri_first = fields equipped within permanent equipment	Distance from farm Permanent equipment
		2. Determination of minimum irrigation interval (Interval)	Interval = water cycle duration+ additionnal days for other farm activities	Water cycle duration Farm activities

Tactical fertilization and irrigation decision making-process

Two thirds of surveyed farmers declared they jointly manage fertilization and irrigation triggering at the tactical time horizon. The decision-making process for the two operations is represented in Figure 36. There are two distinct situations which depend on the farmer irrigation strategy. Farmers who have a supplementary or insurance irrigation strategy decide first to trigger N fertilization and then (or not) to irrigate. They will first enter into the fertilization triggering decision process and then in the irrigation triggering decision process. Farmers who follow a survival irrigation strategy do the opposite, they plan first to irrigate and then, they enter into the fertilization triggering decision process.

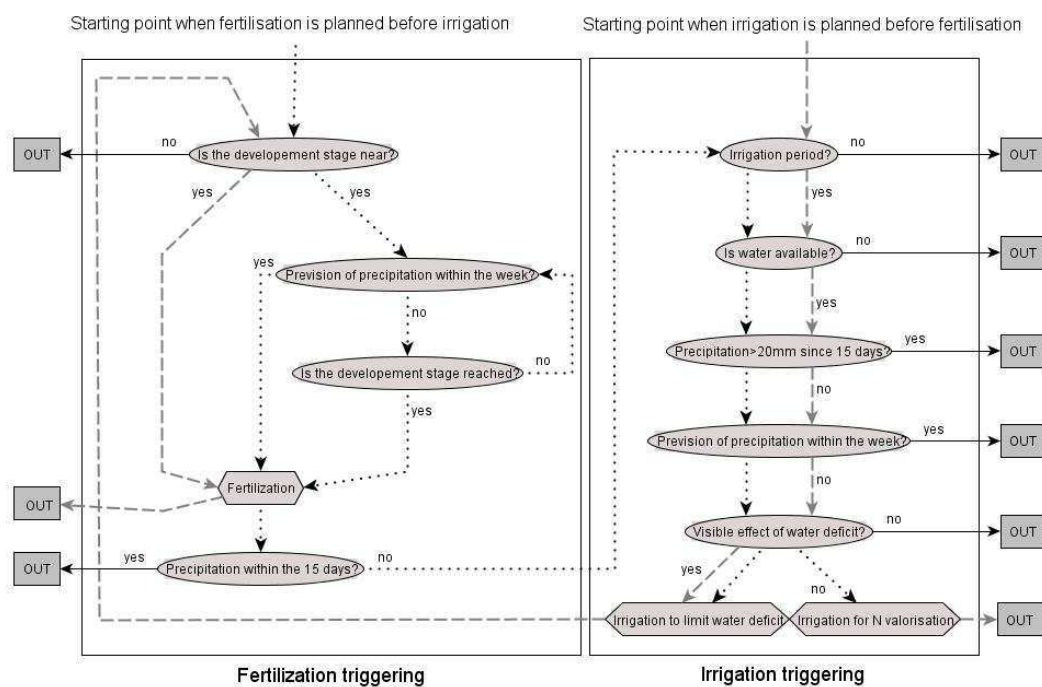


Figure 36 : Tactical decision-making process for fertilization (F4) and irrigation (I4) triggering

The opportunity of triggering N application is measured through the achievement of the previously defined key developmental stages. Farmers regularly follow the crop development along the crop cycle. When key development stage is coming up, all farmers look at precipitation prediction to evaluate the opportunity of fertilization application. When precipitations are expected within the coming week, fertilization is operated. When no precipitation is expected and that irrigation is not already planned, farmer will wait one week after the development had been reached and will operate fertilization even without precipitation.

The opportunity of starting an irrigation cycle is evaluated firstly by the level of previous precipitations. If no precipitation were recorded during the last two to three preceding weeks

and that potential irrigation period has started, irrigation is envisaged. The threshold for precipitation was about 20 mm. Six farmers used the decision support system IRRINOV[®] to manage irrigation. They have real-time access to the soil water potential and they decide to irrigate when the recommended threshold of soil water potential has been exceeded. Thirteen farmers look at the soil aspect. If it starts to crack, irrigation is provided. Twelve farmers look at the crop aspect: leaf rolling, leaf wilting or leaves yellowing are indicators that are taken into account for irrigation triggering.

Once farmers have decided to trigger irrigation, the water cycle is organised. Farmers determine the amount of water that will be applied to the irrigated field (Table 21). If irrigation is provided to limit water deficit, the amount of applied water is chosen according to the local recommendations received weekly which indicates the approximate crop water need for the period according to the soil type. The recommendations are adapted to be applied during the duration of the water cycle defined before the beginning of the irrigation. The water applied at each irrigation cycle is on average of 30 mm and varies between 25 and 45 mm. One farmer declared that he reduced the water applied for the last water cycle in order to limit the risk of crop lodging.

Once the irrigation cycle has started, it can be modified by climatic events. Twenty-farmer interrupted irrigation cycle if precipitation is higher than a given threshold. Precipitation is then taken into account as irrigation application. The declared threshold varied between 15 to 35 mm. If the level of precipitation is below the threshold, irrigation is not stopped. Three farmers declared they accelerate the speed of the irrigation to reduce the duration of the water cycle and reduce the water applied. Two farmers declared they continue to irrigate, whatever the precipitation, because of a lack of manpower during this period.

The decision sequence relative to the irrigation trigger and to water cycle organisation is repeated during the whole potential irrigation period.

The opportunity to irrigate (or not) after nitrogen fertilization is decided when no precipitation occurs within the fifteen days after nitrogen fertilization. Two situations were identified. The first situation was characterised by the fact that the irrigation period did not start and/or farmers had limited water cycle, reserved for water deficit only. The irrigation for N availability increase was not considered by farmer as possible. The second situation was encountered when the potential irrigation period had already started and that farmer considered not being limited by water volume. In this situation, farmer will evaluate if the irrigation required for fertilizer N valorisation can coincide with irrigation against water deficit. If the crop or soil shows water deficit, irrigation to limit water deficit effect will be done. If no sign of water deficit are shown, water is provided only to make the fertilizer N

available for crop. The quantity applied is less than irrigation for water deficit. It is about 20 mm.

Table 21 : Details of the operating decisional sequences identified for irrigation decision-making process

Decisional sequences	Decision in the sequences	Decision rule	Indicator
15: Water cycle organisation	1.Determination of water applied	Water applied= f(recommendation(mm/jday), number of days of the minimum irrigation interval, soil type)	Recommendation, soil water storage capacity Minimum irrigation interval
	2. Adaptation to climatic event	If P>threshold→Irrigation is stopped If wind is strong and irrigation homogeneity is bad→Irrigation is stopped	Precipitation Wind speed Evaluation of water-jet homogeneity

4.4 Discussion and conclusions

We surveyed and analysed irrigation and N fertilization practices and their determinants on durum wheat production of 29 farmers.

Advices, type of production, and legislation are the main factors identified by survey which influence durum wheat fertilization practices. Legislation, by regulating the maximal N dose and the permitted period, is an important factor in the fertilization management for areas under special legislation. Advices that farmers receive and have received in the past solely drive fertilization practices. The use of development stages as key indicators for N applications, the increasing number of N splits for N applications of higher than 100 kg N/ha, the late N application for grain protein concentration or the use of a nitrogen budget to determine the N application are the result of the recommendations provided by agricultural advisers.

The type of production determines the objectives of the fertilization given by farmers and the resulting management for fertilization. For breeders, fertilization should increase biomass production and depending grain numbers. The application of N fertilizer is not conducted by the objective of getting high grain N concentration, as it is for food industry producers. As a result, late N application is not provided to crop by breeders and total N applied is slightly lower than food industry producers. As stated by Aubry *et al.* (1998) and Sébillotte and Soler (1988), fertilization management is then driven by the objectives of crop production.

We identified three different strategies for durum wheat irrigation: i) a supplementary irrigation strategy to avoid strong water stress, ii) an insurance irrigation strategy to increase the attainable yield and iii) a survival strategy to insure an economically profitable yield. Adoption of a strategy is mostly dependent on regional climatic demand but also on the water resource availability.

At the farm level, durum wheat is never the priority crop for irrigation. Water resource availability is mostly constrained by the presence of other irrigated crops (maize and/or seed production). The water volume devoted to durum wheat and the resulting numbers of irrigation cycles are dependent on available irrigation equipment and on the area of other irrigated crops (maize or seed). This aspect reveals that durum wheat irrigation management depends on the farm production system and not only on durum wheat production objectives. This implies that the research of alternative irrigation management practices will differ with farm production systems. For farmers with limited water volume for durum wheat irrigation, the research of optimal irrigation management strategy will consist in the determination of the optimal time for water irrigation, given a limited water volume. For farmers with non limited water volume, optimal irrigation management will consist in the determination of the optimal number of irrigation cycles and the water applied at each irrigation cycle.

It is likely that the reduction of attributed water volume and the increasing climatic demand that are forecasted for certain production areas (Levrault *et al.*, 2010) will modify farmers' irrigation strategy adoption. An illustration is given by some farmers of the PC region. They progressively increase durum wheat cultivated area to the detriment of maize cultivated area in order to reduce water demand during summer and to spread water demand on a larger time period. These farmers adopt mostly an insurance strategy while the other have a insurance irrigation strategy. Once again the objective of durum wheat production is crucial in the way farmers manage their crop.

As for fertilization management, technical advices take an important role in irrigation management and especially in the determination of the water volume applied. This aspect reveals the role that a biodecisional model for irrigation and fertilization can play in providing references to agricultural advisers who advice farmers.

The survey we conducted over the five French production areas allowed us to identify the different decisional sequences that farmers are taken to conduct irrigation and nitrogen fertilization. We identified four decisional sequences for fertilization and five for irrigation. For each operation, three decisional sequences refer to strategic decisions. The other decisional sequences refer to tactical decision.

The objective in the development of a biodecisional model for durum wheat irrigation and fertilization is not to obtain a decision support tool for day-to-day tactical management. We aim at, by the use of the model, to provide guidelines for strategic management and help the technical advisers and farmers to answer the questions : Is it economically profitable to increase fertilizer N availability with irrigation? Will it be economically profitable to plan for an additional irrigation cycles? When will be the best moment for durum wheat irrigation to

increase grain protein concentration?. However, since irrigation and fertilization management imply tactical decisions, the biodecisional model should also include this type of decisions. It also implies that the reflection around the strategic management includes necessary tactical management.

We focused the survey on irrigation and fertilisation management. Little attention was paid on crop protection measures, which should be adapted to irrigation and fertilisation strategies (Olesen *et al.*, 2000; Olesen *et al.*, 2000). Some farmers explained that their crop protection strategy was adapted to irrigation during flowering period but no further investigation was conducted to evaluate the efficiency of this crop protection. We also did not put much emphasis on the cultivar choice and its consequence. The choice of the cultivar can however modify the day of sowing and the development stages appearance and so the timing of some intervention.

We proposed a basis of conceptual model describing the most common decision rules applied by farmers. The decision rules include indicators for operations. Our objective is to couple the decision model with a biophysical model as it was done for MODERATO (Bergez *et al.*, 2001) and IRRIGATE (Merot and Bergez, 2010). This requires that both models can exchange information on the state variables of the system that serve as indicators for decision. Development stages and soil water storage capacity are variables already simulated by the crop model but “soil cracking” or “leaf rolling” which are used to trigger irrigation are not simulated by the crop model. A translation of these indicators into variables of the biophysical crop model will be required for coupling. Then, considering the coupling with the STICS crop model, the day when the soil is cracking might be evaluated as the day the soil water content reach a certain threshold and the leaf are rolling might be evaluated as the day the water stress is so that the LAI growth is reduced or the day LAI senescence is increased.

Ce qu'il faut retenir

Les débouchés de la production, la législation et le matériel utilisé influencent les pratiques et les stratégies de fertilisation azotée mises en place par l'agriculteur.

La localisation géographique de l'exploitation, le volume d'eau disponible pour l'irrigation et la présence de cultures prioritaires sont les principaux facteurs influençant les pratiques et les stratégies d'irrigation des agriculteurs.

Les décisions intervenant dans la réalisation des opérations relèvent d'un niveau stratégique et tactique. Certaines décisions sont prises en début de campagne et certaines décisions sont prises au moment du déclenchement des opérations.

La gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation est opérée au niveau tactique, au moment du déclenchement des opérations de fertilisation et/ou d'irrigation.

Chapitre 5 Evaluation par simulation de stratégies de fertilisation azotée et d'irrigation du blé dur

5.1 Introduction

Dans ce cinquième et dernier chapitre, je propose d'illustrer, au travers d'un cas d'étude localisé, l'utilisation potentielle du futur modèle biodécisionnel comme outil d'aide à la conception et à l'évaluation de stratégies de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur. Etant donné que le modèle de décision n'a pu être implémenté informatiquement dans le temps de la thèse, les décisions et les contraintes relatives aux opérations de fertilisation et d'irrigation ont été prises en compte manuellement en générant certaines des stratégies pas-à-pas.

L'objectif du travail présenté dans cette partie est double. Il s'agit i) d'évaluer la pertinence d'une démarche biodécisionnelle intégrant les contraintes et les décisions des agriculteurs et ii) de comparer, dans un contexte localisé, à titre d'illustration de la démarche qu'il sera possible de mettre en œuvre une fois le modèle biodécisionnel couplé informatiquement, les performances de plusieurs stratégies d'irrigation et de fertilisation du blé dur.

5.2 Matériel et méthodes

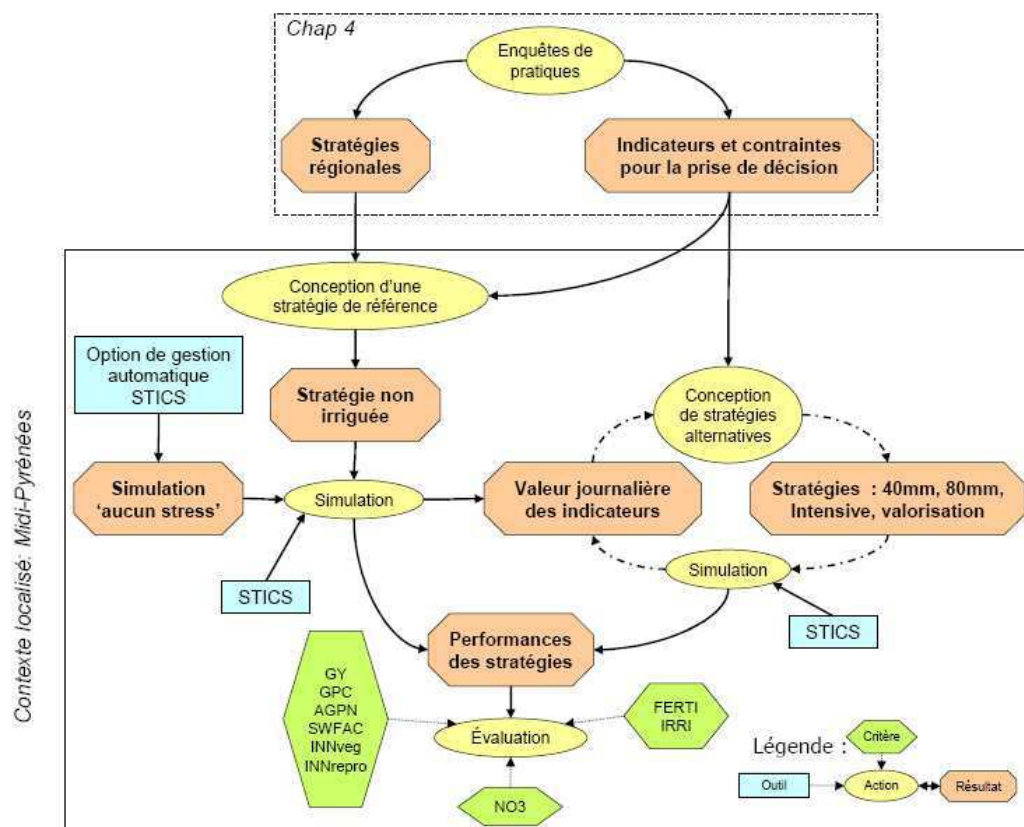


Figure 37 : Présentation de la démarche globale de conception et d'évaluation des stratégies

Démarche globale

Dans le chapitre précédent, j'ai identifié les contraintes et les décisions intervenant dans la prise de décision et j'ai présenté les différentes stratégies mises en œuvre par les agriculteurs de cinq bassins de production (Figure 37).

A partir de ces résultats, une première stratégie non irriguée a été construite. La simulation de cette stratégie a permis d'obtenir les valeurs journalières des indicateurs qui pourraient intervenir dans les décisions relatives à l'irrigation et à la fertilisation. L'analyse de l'évolution de ces indicateurs a permis de construire puis de simuler des stratégies alternatives mobilisant irrigation et fertilisation. Les performances estimées par simulation des différentes stratégies ont alors été évaluées sur différents critères.

En parallèle, une simulation a été élaborée dans l'objectif d'estimer les performances en rendement et teneur en protéines potentielles permises par le climat (température et rayonnement) et pour le type de sol choisi. Cette simulation a été réalisée en utilisant les options de calcul automatique de fertilisation et d'irrigation implémentée dans la version 69 de STICS et a été paramétrée pour éviter tout stress hydrique ou en azote.

La modification du formalisme d'accumulation d'azote dans le grain présentée dans le troisième chapitre n'ayant amélioré significativement les simulations pour cette variable, j'ai choisi de réaliser les simulations de stratégies avec le formalisme original de STICS de la version 69.

Principe de l'option de gestion automatique

Lorsque l'option de calcul automatique de l'irrigation est activée, STICS déclenche une irrigation dès que l'indice de stress hydrique *SWFAC* est inférieur au paramètre *RATIOL*. Le volume apporté est déterminé comme la quantité d'eau nécessaire à apporter pour remplir la réserve en eau jusqu'à l'humidité à la capacité au champ le long du profil racinaire. Il est limité par un volume maximal autorisé fixé par le paramètre *DOSIMX*.

En ce qui concerne le calcul automatique des fertilisations azotées, le modèle calcule la dose d'azote à appliquer pour maintenir un indice de nutrition azoté supérieur à un certain seuil fixé par le paramètre *RATIOLN*. Un apport d'azote est alors déclenché lorsque l'offre du sol est inférieure à la demande de la plante à condition que l'humidité du premier centimètre de sol soit supérieure ou égale à la capacité au champ.

Simulations

Les différentes stratégies de gestion de l'irrigation et de la fertilisation ont été élaborées et évaluées pour la région Midi-Pyrénées. Elles ont été simulées sur le site d'Auzeville (43°31'N 1°28'E) en utilisant les données climatiques de onze campagnes couvrant la période 1998-2008. Pendant la période potentielle de culture du blé dur (octobre à juillet), la température mensuelle moyenne varie entre 6.5 °C (décembre et janvier) et 22.2 °C en juillet (Figure 38). Les précipitations sont en moyenne de 527 mm sur cette période et l'ETP de 733 mm. L'écart-type des précipitations est de 96 mm et celui de l'ETP est de 63 mm.

Le sol est défini par une succession de quatre horizons de type limono argileux de 30 cm chacun dont les humidités à la capacité au champ varient entre 19 et 23% et les humidités au point de flétrissement varient entre 10 et 14%. La réserve utile est estimée à 160 mm et correspond à une réserve en eau de 1.3 mm/cm de terre fine.

La variété semée simulée est la variété Biensur ; il s'agit d'une des variétés la plus cultivées dans le Sud-Ouest de la France (AGRESTE, 2008b) pour lesquelles les paramètres ont été optimisés. La date de semis a été fixée au 1^{er} novembre de chaque année. La densité de semis a été fixée de manière à obtenir une densité de peuplement de 260 plantes/m². Le précédent est un tournesol puisqu'en Midi-Pyrénées, la moitié des surfaces en blé dur sont semées derrière cette culture (AGRESTE, 2008b).

Les simulations ont débuté au 1^{er} septembre, jour de l'enfouissement des résidus et ont été arrêtées au jour de la récolte du blé dur estimé par le modèle comme le jour où la teneur en eau du grain est inférieure à 15% d'humidité.

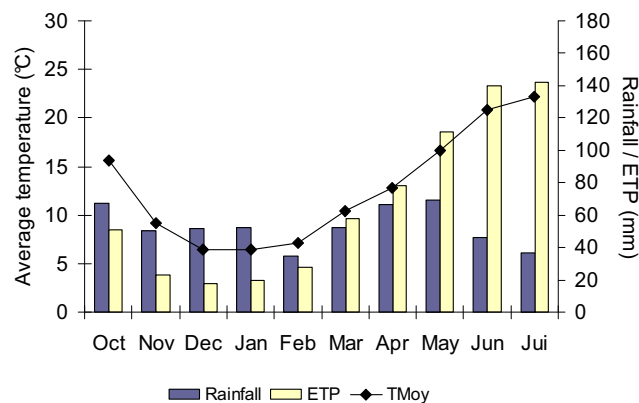


Figure 38 : Caractéristiques climatiques moyenne d'Auzeville pour la période 1998-2008
Description des stratégies

La **simulation 'aucun stress'** consiste à irriguer et fertiliser de manière à ce que la culture ne subisse aucun stress hydrique ou azoté. Elle permet d'estimer les performances potentielles de la culture en conditions non limitantes pour l'eau ou l'azote. Elle a été construite automatiquement par le modèle STICS pour chacune des campagnes.

- Une irrigation est réalisée dès que l'indice de stress hydrique *SWFAC* est inférieur à 0.99. La quantité maximale à chaque apport a été paramétrée à 40 mm.
- Une fertilisation est réalisée dès que l'indice de nutrition azotée *INNS* est inférieur à 0.99. La quantité maximale à chaque apport a été paramétrée à 60 kg N/ha.

La **stratégie 'non irriguée'** représente la stratégie de référence mise en œuvre par les agriculteurs de Midi-Pyrénées en situation pluviale, c'est-à-dire sans recours à l'irrigation :

- Aucune irrigation n'est faite pendant le cycle de la culture.
- La fertilisation azotée est basée sur la méthode du bilan prévisionnel qui tient compte des fournitures du sol (variation de stock d'azote minéral initial et final et minéralisation de l'azote organique du sol et des résidus de culture du précédent) et d'un objectif de rendement de 55 q/ha choisis *a priori*.
- La quantité d'azote estimée est fractionnée en trois apports en reprenant les règles décrites dans le tableau 19. Ainsi 25% de la dose totale calculée sont épanchés pour le premier apport, 60 kg N/ha sont réservés pour le troisième apport dit « qualité » au stade dernière feuille et la quantité restante est apportée au stade « épi 1 cm » au

début de la montaison, correspondant au second apport d'engrais azoté. Le premier apport a été effectué le 15 janvier pour correspondre à un apport au moment du tallage et respecter la période autorisée d'épandage d'engrais en zone vulnérable qui fixe la date avant laquelle tout épandage d'engrais azoté est interdit. La détermination des dates du deuxième et du troisième apport s'est faite en fonction du rythme de développement de la culture et du niveau de précipitations précédent et/ou succédant la date du stade considéré. Le stade considéré pour le second apport était le stade *AMF*, représentant le jour où la croissance foliaire devient maximale, équivalent au stade « épi 1 cm ». Le stade considéré pour l'apport qualité était le stade *LAX* correspondant au jour où le *LAI* est maximum. En reproduisant « manuellement » le processus de décision présenté dans la Figure 36, tous les apports ont été réalisés la veille d'un jour de pluie, à condition que celui-ci intervienne la semaine qui précède ou qui succède la date d'apparition du stade de développement.

La **stratégie 'intensive'** est construite pour viser un objectif de rendement élevé de 70 q/ha et de teneur en protéines de 14% ; elle consiste i) à augmenter les doses d'azote par rapport à la stratégie non irriguée afin d'augmenter les rendements et la teneur en protéines et ii) à irriguer si nécessaire.

- Une ou deux irrigations de 40 mm par cycle sont réalisées lorsque 70% de la réserve utile est consommée.
- 210 unités d'azote sont réparties selon les mêmes modalités (date et fractionnement) que la stratégie non irriguée.

La stratégie '**40 mm**' consiste à valoriser un potentiel de rendement > 55 q/ha (correspondant à la stratégie non irriguée) par une irrigation si nécessaire.

- Une irrigation de 40 mm par cycle est réalisée lorsque 70% de la réserve utile du sol est utilisée.
- La fertilisation est identique à la stratégie non irriguée.

La stratégie '**80 mm**' consiste à valoriser un potentiel de rendement > 55 q/ha par deux irrigations si nécessaire.

- Deux irrigations de 40 mm par cycle sont réalisées à chaque fois que 70% de la réserve utile du sol est utilisée.
- La fertilisation est identique à la stratégie non irriguée.

La stratégie de '**valorisation de l'azote**' consiste à irriguer dans le but de valoriser les apports d'engrais réalisés.

- Une irrigation de valorisation est réalisée 15 jours après l'apport d'azote si celui-ci n'a pas été suivi de précipitations supérieures à 20mm. Si une irrigation avait été prévue par la stratégie '40mm' ou '80mm' pendant ces 15 jours, l'irrigation est de 40mm. Dans le cas contraire, elle est de 20mm.
- La fertilisation est identique à la stratégie non irriguée.

Pour chaque irrigation des stratégies 40mm, 80mm ou « de valorisation de l'azote », une période d'irrigation a été définie à partir des règles établies lors de l'enquête. Ainsi une irrigation peut intervenir à partir du 1^{er} avril et jusqu'à une semaine avant la maturité physiologique. Les quinze jours entourant le stade floraison ne sont pas considérés propices pour l'irrigation. Aucune irrigation n'est pratiquée pendant cette période.

Evaluation

Nous avons choisi d'évaluer les stratégies selon les trois dimensions agronomiques, environnementales et techniques.

Du point de vue agronomique, les indicateurs choisis sont : le rendement à 0% d'humidité (*GY* t/ha), la teneur en protéines (*GPC*, %), la quantité d'azote absorbée par la plante (*AGPN*, kgN/ha), l'indice de stress hydrique moyen pendant la phase de remplissage des grains (*SWFAC*, -), l'indice de nutrition azoté moyen pendant la phase de croissance végétative (*INNveg*, -) et l'indice de nutrition azoté moyen pendant la phase de remplissage des grains (*INNrepro*, -).

Du point de vue technique, les indicateurs choisis sont la quantité d'azote apportée à la culture (*FERTI*, kgN/ha) et la quantité totale d'eau apportée par l'irrigation (*IRRI*, mm).

Pour les indicateurs environnementaux, nous avons choisi la quantité d'azote nitrique présent dans le sol au moment de la récolte (*NO3*, kgN/ha). Cette variable représente un premier indicateur du risque de fuite d'azote sous forme de nitrate vers les eaux souterraines au cours de la période hivernale suivant la culture du blé dur.

Les moyennes et les valeurs minimales et maximales obtenues avec chaque stratégie pour chacune de ces variables seront présentées sous forme de tableau. Les résultats obtenus pour les campagnes ayant fait l'objet des stratégies Agricole+40mm, Agricole+80mm ou « de Valorisation » seront présentés sous la forme de graphe radars.

5.3 Résultats

Itinéraires techniques des différentes stratégies

Le calendrier des opérations de fertilisation et d'irrigation pour les différentes stratégies est présenté Figure 39.

Dans le cas de la **stratégie 'non irriguée'**, le premier apport a lieu le 15 janvier pour la majorité des campagnes. Les campagnes 2000, 2006 et 2008 voient le premier apport retardé de 7, 7 et 4 jours respectivement pour tenir compte des précipitations. La date du second apport varie entre le 9 février et le 19 mars. La date du troisième apport varie entre le 11 avril et le 3 mai.

Pour la **simulation 'aucun stress'**, les premiers apports d'azote ont lieu entre le 3 février et le 5 mars. Les derniers apports d'azote peuvent intervenir jusqu'au 27 juin. Entre cinq et huit applications sont réalisés au cours du cycle. Le nombre d'irrigation varie entre 0 et 6. Les campagnes 2007 et 2000 ne nécessitent aucun recours à l'irrigation. Pour les campagnes nécessitant une irrigation, le nombre de passage est en moyenne de trois par cycle. La campagne d'irrigation débute au plus tôt le 28 avril et se termine au plus tard le 30 juin.

Pour la stratégie **'intensive'**, les opérations de fertilisation interviennent au même moment que pour la stratégie non irriguée. Les campagnes nécessitant une irrigation sont les campagnes 2002, 2003, 2005 et 2006. Deux irrigations de 40 mm sont nécessaires pour maintenir la réserve utile à plus de 30% de sa capacité de stockage.

Avec la stratégie **'non irriguée'**, seules les campagnes 2002, 2003, 2005 et 2006 voient leur réserve en eau du sol consommée à plus de 70% et ont recours à une irrigation d'appoint (stratégie **'40 mm'**). Deux de ces campagnes (2003 et 2006) voient une nouvelle fois leur réserve réduite à 30% de leur capacité de stockage et nécessite une deuxième irrigation (stratégie **'80 mm'**).

La stratégie **'valorisation de l'azote'** n'est nécessaire que pour deux campagnes : 2003 et 2008. En 2003, cette irrigation coïncide avec une irrigation d'appoint et 40 mm sont appliqués. En 2008, il s'agit uniquement d'une irrigation de 20 mm pour rendre disponible l'azote apporté à la plante.

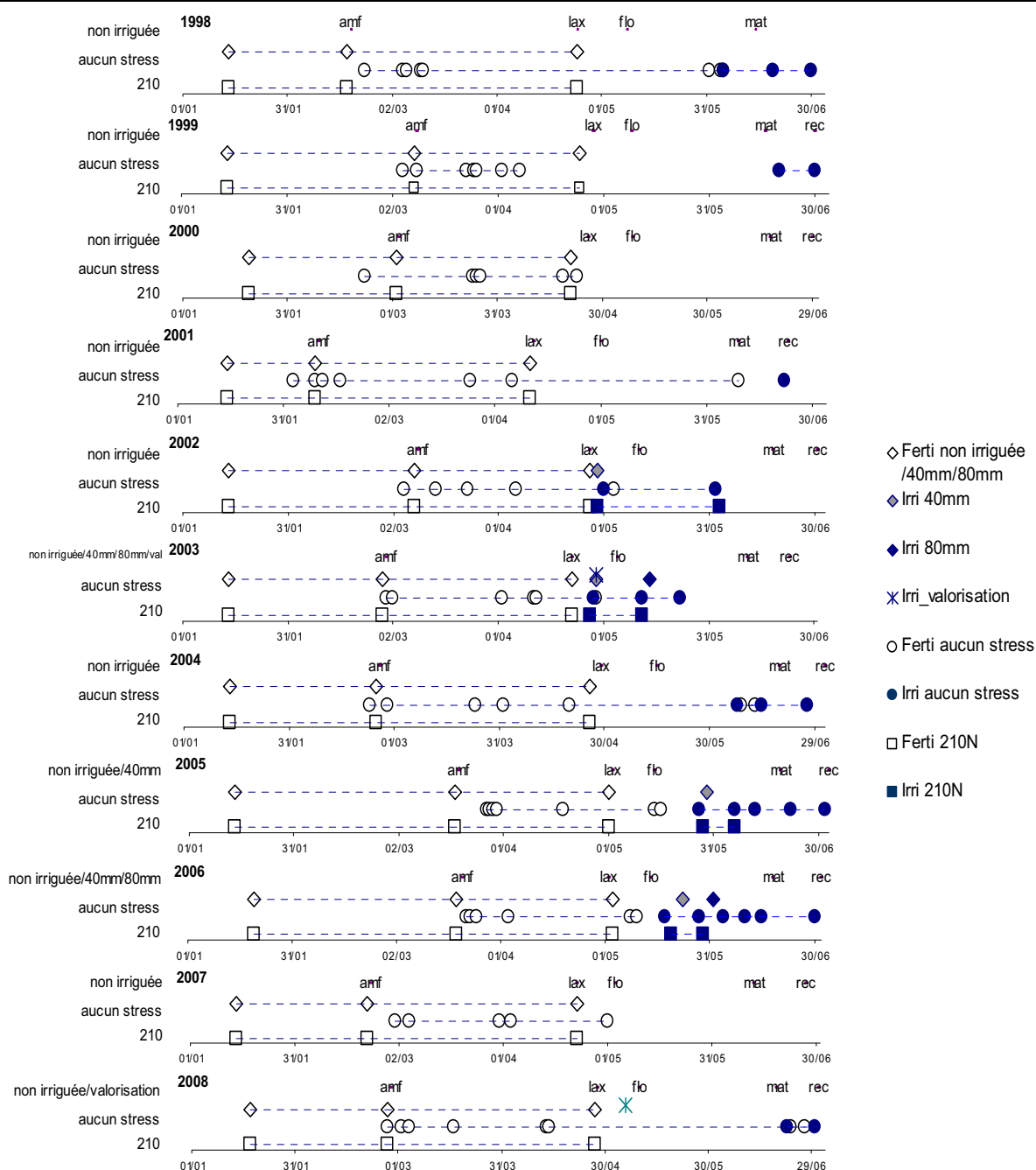


Figure 39 : Calendrier pluriannuel des opérations techniques pour les différentes stratégies. amf= jour où l'accélération de la croissance foliaire devient maximale (~epi 1 cm), lax= jour où le LAI est maximal, flo=jour de la floraison, mat= jour de la maturité à 40% d'humidité, rec= jour de la récolte. Exemple de lecture : « Lors de la campagne 2003, La stratégie 'non irriguée' implique trois opérations de fertilisation le 15 janvier, 27 février et le 22 avril. La stratégie '40mm' implique les trois mêmes dates d'intervention pour la fertilisation ainsi qu'une irrigation de 40 mm le 29 avril. La stratégie '80mm' implique le même calendrier que le stratégie '40 mm' avec une irrigation supplémentaire de 40 mm le 2 juin. La stratégie de valorisation implique une irrigation le 29 avril.

Performance des différentes stratégies

Les performances moyennes des différentes stratégies évaluées sont présentées dans le Tableau 22. La Figure 40 présente les résultats de chaque stratégie pour les campagnes 1998, 2002, 2003, 2005, 2006 et 2008.

La moyenne des rendements simulés avec la stratégie ‘non irriguée’ est de 5.5 t/ha (Tableau 22). La gamme des rendements s’étend de 4.7 t/ha obtenus lors de la campagne 2003 (Figure 40) à 6.6 t/ha obtenus lors de la campagne 2000. La teneur en protéines varie de 11.6 % en 2006 (Figure 40) à 13.6% lors de la campagne 2007 et atteint une valeur moyenne de 12.5%. La quantité d’azote absorbée par la culture et contenue dans les parties aériennes varie entre 152 kg N/ha en 2003 et 188 kg N/ha en 2000 et représente en moyenne 173 kg N/ha. Les indices de stress hydrique pendant la phase de remplissage sont en moyenne égaux à 0.89 et varient entre 0.58 en 2006 et 1. Quatre campagnes ont subi un stress hydrique réduisant la production de biomasse de la culture : 2002, 2003, 2005 et 2006 (Figure 40). Toutes les campagnes ont subi un stress azoté pendant la phase végétative. L’indice de déficit en azote est de 0.9 en moyenne sur les onze années de simulation, et varie entre 0.87 et 0.92. De même, toutes les campagnes ont subi un stress azoté pendant la phase de remplissage des grains. La valeur moyenne est de 0.80 avec des variations allant de 0.61 pour la campagne 2006 à 0.88 pour la campagne 2008. Ces niveaux de performances sont obtenus en apportant une quantité moyenne de 165 kg N/ha mais pouvant varier de 149 kg N/ha en 2007 à 181 kg N/ha en 2002. Les reliquats d’azote minéral à la récolte sont en moyenne de 9 kg N/ha avec un niveau maximal simulé de 29 kg N/ha en 2005.

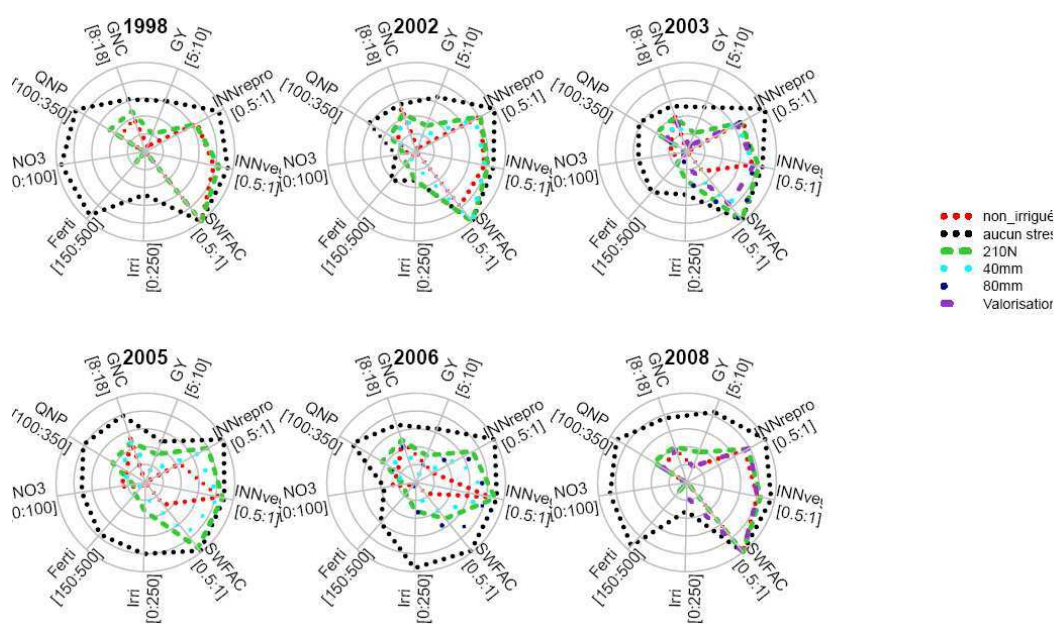


Figure 40 : Performances des différentes stratégies testées pour les campagnes 1998, 2002, 2003, 2005, 2006 et 2008.

Tableau 22 : Performances agronomiques, techniques et environnementales des différentes stratégies simulées

Type sortie	stratégie ↓	variable →		GY		GPC		QN		SWFAC		INNveg		INNrepro	
		μ	max min	μ	max min	μ	max min	μ	max min	μ	max min	μ	max min	μ	max min
agronomique	sans irrigation	5.5	6.6 4.7	12.5	13.6 11.6	173	188 152	0.89	1 0.58	0.90	0.92 0.87	0.80	0.91 0.61		
	aucun stress	8.3	9.7 7.5	14.7	16.4 13.4	307	352 255	1.00	1 0.99	0.96	0.98 0.93	0.99	1.00 0.94		
	intensive	6.6	7.5 6.1	12.8	14.1 12.1	211	232 185	0.97	1 0.76	0.93	0.95 0.91	0.85	0.94 0.65		
	sans irri_stress hydrique ¹	4.9	5.2 4.7	13.0	13.3 12.4	158	160 152	0.69	0.89 0.58	0.90	0.92 0.87	0.78	0.91 0.61		
	40mm ¹	5.6	6.0 5.4	12.3	12.9 11.6	171	176 166	0.87	1 0.71	0.90	0.92 0.88	0.83	0.88 0.77		
	sans irri_stress hydrique ²	4.8	4.9 4.7	12.7	13.0 12.4	156	159 152	0.61	0.64 0.58	0.90	0.92 0.87	0.74	0.86 0.61		
	40mm ²	5.4	5.5 5.4	12.1	12.6 11.6	171	175 167	0.80	0.88 0.71	0.90	0.92 0.88	0.80	0.82 0.77		
	80mm ²	5.7	6.1 5.4	11.9	12.3 11.5	179	183 175	0.94	1 0.87	0.90	0.92 0.88	0.84	0.85 0.82		
	sans valorisation ³	5.3	6.0 4.7	12.2	12.4 11.9	165	177 152	0.82	1 0.64	0.89	0.90 0.87	0.87	0.87 0.86		
	valorisation ³	5.7	6.0 5.4	11.7	11.8 11.6	174	181 167	0.94	1 0.88	0.89	0.90 0.88	0.86	0.90 0.82		
technique & environnementale	stratégie ↓	variable →		Ferti		Irri		NO ₃							
		μ	max min	μ	max min	μ	max min	μ	max min						
	sans irrigation	165	181 149	0	0 0	10	28 1								
	aucun stress	391	480 300	116	240 0	49	95 9								
	intensive	210	210 210	29.1	80 0	6	14 1								
	sans irri_stress hydrique ¹	172	181 162	0	0 0	21	28 10								
	Agri_40mm	172	181 162	40	40 40	11	17 3								
	sans irri_stress hydrique ²	169	172 166	0	0 0	10	18 1								
	Agri_40mm ²	169	172 162	40	40 40	5	8 2								
	Agri_80mm ²	169	172 162	80	80 80	5	8 2								
sans valorisation ³	169	172 166	0	0 0	10	18 1									
valorisation ³	169	172 166	40	40 40	2	3 1									

1 : Seules les campagnes ayant nécessité au moins une irrigation sont comptabilisées : 2002, 2003, 2005 et 2006.

2 : Seules les campagnes ayant nécessité deux irrigations sont comptabilisées : 2003 et 2006

3 : Seules les campagnes ayant nécessité une irrigation de valorisation de l'azote sont comptabilisées: 2003 et 2008.

La simulation '**aucun stress**' évalue le potentiel de rendement à 8.3 t/ha en moyenne sur les onze années de simulation, variant entre 7.5 t/ha en 2005 et 9.7 t/ha en 2001. La teneur en protéines moyenne estimée est de 14.7% variant dans une gamme allant de 13.4 à 16.4 %. Pour atteindre de tels niveaux de performances, il est nécessaire d'apporter des quantités d'azote importantes (390 kg N/ha). Cette simulation indique que de telles quantités d'azote augmentent très fortement les reliquats azotés à la récolte. Ils sont en moyenne de 49 kgN/ha et en 1998, les reliquats azotés représentent jusqu'à 20% de la quantité totale apportée. Elle montre également qu'un premier apport réalisé systématiquement au 15 janvier n'est pas justifié puisque l'INN ne descend jamais en dessous de 0.99 et donc qu'aucun apport d'azote n'a été déclenché automatiquement par le modèle STICS. Le modèle simule généralement un premier apport d'engrais azote au stade « épi 1 cm ».

La **stratégie 'intensive'** permet d'augmenter le rendement moyen d'1.1 t/ha par rapport à la stratégie non irriguée et les quantités d'azote absorbées de 38 kgN/ha en moyenne sur les onze années de simulation. Elle permet une augmentation de la teneur en protéines moyenne de 0.3 points. Malgré l'augmentation des quantités d'azote apportées, les reliquats sont proches voire même réduits par rapport à la stratégie sans irrigation.

Les résultats obtenus par la stratégie non irriguée ont révélé que les performances de quatre campagnes ont été limitées par un stress hydrique au cours du remplissage. Les stratégies '40mm' et '80mm' représentent des stratégies aux cours desquelles une ou deux irrigation d'appoint a été apportée afin d'évaluer l'effet de cette irrigation sur les différentes variables étudiées.

La stratégie '**40 mm**' permet de réduire l'intensité des stress hydriques et azotés subis par la culture. Ces réductions de stress se traduisent par une augmentation de la quantité d'azote absorbée par la plante de 13 kgN/ha en moyenne. Cependant, cette augmentation bénéficie davantage à une augmentation du rendement final qu'à la teneur en protéines qui se trouve être inférieure à celle simulée par la stratégie agricole sans irrigation. Une irrigation de 40 mm a pour conséquences une réduction des quantités d'azote minéral présent dans le sol au moment de la récolte, représentant la moitié des quantités de la stratégie agricole non irriguée.

La stratégie '**80 mm**' permet de réduire de nouveau l'intensité des stress hydrique et azotés. Cette réduction permet d'augmenter les quantités d'azote absorbées pour qu'elles atteignent en moyenne 179 kg N/ha. De même qu'une irrigation de 40 mm ne permettait pas d'augmenter de façon significative la teneur moyenne en protéines du grain, deux irrigations de 40 mm ne conduisent pas davantage à une augmentation de cette variable. Le gain de rendement est évalué à 0.9 t/ha par rapport à la stratégie non irriguée et à 0.3 t/ha par rapport à

une irrigation unique de 40 mm. Le deuxième apport d'eau est donc moins efficace sur l'augmentation du rendement que ne l'aurait été le premier apport.

Lors des campagnes 2003 et 2008, les derniers apports d'azote n'ont pas été suivis de précipitations supérieures à 20 mm pendant les 15 derniers jours ayant suivi l'apport. En suivant les règles observées par les agriculteurs, une irrigation « **de valorisation** » de l'azote aurait été opérée afin de rendre disponible l'azote apporté pour la culture. Cette irrigation engendrerait une réduction du niveau de stress azoté et hydrique et une augmentation de la quantité d'azote absorbée par la culture. Cette stratégie permettrait d'augmenter de 0.4 t/ha la moyenne et la gamme des rendements simulés. Cette stratégie n'augmenterait pas la valeur des teneurs en protéines simulées.

5.4 Discussion et conclusion

Le rendement moyen obtenu à l'issue de la simulation de la stratégie 'sans irrigation' est de 5.5 t/ha et ce qui représente 66% du rendement potentiel estimé avec la simulation 'aucun stress'. Ces performances se situent dans la fourchette haute des rendements obtenus dans la région puisque le rendement moyen en Midi-Pyrénées, ramené à 0% d'humidité, est estimé à 4.3 t/ha et que seules 36% des surfaces obtiennent des rendements supérieurs à 4.6 t/ha (AGRESTE, 2008b).

La teneur en protéines moyenne avec la stratégie non irriguée est de 12.5% alors que la teneur en protéine moyenne déclarée à l'échelle de la région se situe à 14.5 % (AGRESTE, 2008b). Le fait qu'il existe une relation négative entre le rendement et la teneur en protéines et que les rendements régionaux observés soient globalement plus faibles que les rendements simulés peut en partie expliquer ces différences. De plus, les quantités d'azote apportées avec les stratégies sans irrigation (165 kg N/ha en moyenne (AGRESTE, 2008b)) sont inférieures de 20 kg N/ha par rapport aux pratiques de fertilisation des agriculteurs et peuvent expliquer une autre partie des écarts de teneur en protéines observés.

Les agriculteurs de Midi-Pyrénées déclaraient au cours de l'enquête, n'avoir pas recours à l'irrigation pour chaque campagne. Parmi les onze campagnes simulées avec la stratégie sans irrigation, quatre ont subi un déficit hydrique affectant les niveaux de rendement et pouvant justifier le recours à une irrigation. Une irrigation d'appoint de 40 mm lorsque la réserve en eau du sol atteint 30% de la réserve utile permettrait d'augmenter en moyenne les rendements de 15 % par rapport à la conduite sans irrigation. Seulement deux campagnes ont nécessité une deuxième irrigation pour réduire l'intensité du stress hydrique. Cette seconde irrigation de 40 mm au cours de ces campagnes augmenterait le rendement de 5% supplémentaire. La première irrigation de 40mm serait donc plus efficace sur l'augmentation de rendement que la

seconde. L'effet de la stratégie d'irrigation d'appoint qui avait été identifiée majoritairement chez les agriculteurs de Midi-Pyrénées qui consistait à irriguer une seule fois pendant la campagne afin d'éviter les pertes de rendement liées à un déficit hydrique est ainsi reproduite par le modèle. Ceci constitue un élément de validation de la stratégie appliquée par les agriculteurs de Midi-Pyrénées.

Le modèle biophysique est en mesure de rendre compte de l'effet du déficit hydrique sur les variations de rendement et de teneur en protéines. L'occurrence d'un stress hydrique pendant la culture a souvent pour conséquence une réduction du rendement associée à une augmentation de la teneur en protéines (Haberle *et al.*, 2008; Flagella *et al.*, 2010). Les résultats obtenus par simulations indiquent que, à dose d'azote égale, la teneur en protéines simulée est plus élevée lorsque la campagne a subi un stress hydrique. Inversement, le rendement est plus faible.

Le fait que le rendement augmente au détriment de la teneur en protéines à chaque fois qu'une irrigation est appliquée met en exergue le conflit qui existe entre objectif de rendement et objectif de teneur en protéines. L'identification d'une stratégie d'irrigation pertinente devra donc impérativement prendre en compte simultanément ces deux variables d'intérêt pour l'agriculteur.

Le modèle biophysique simule l'effet d'une augmentation de la dose d'azote sur la dynamique d'absorption d'eau du sol et sur les conséquences en terme de gestion de l'irrigation. Avec les doses d'azote appliquées dans la stratégie sans irrigation, deux campagnes auraient nécessité deux irrigations pour conserver le niveau de la réserve en eau du sol au-dessus du seuil considéré. En augmentant la dose d'azote à 210 kg N/ha dans la stratégie '**intensive**' et en conservant le même seuil d'interventions que pour la stratégie '**non irriguée**', quatre campagnes auraient bénéficié de deux irrigations de '**40 mm**'. De plus ces irrigations seraient anticipées de plusieurs jours par rapport aux jours de déclenchement obtenus avec la stratégie '**80 mm**'. La modulation de la dose d'azote a donc des conséquences sur les quantités d'eau d'irrigation simulées.

Le développement informatique du modèle de décision et le couplage avec le modèle biophysique offrent de nouvelles perspectives pour construire et évaluer des stratégies de gestion conjointe de fertilisation et d'irrigation. Le couplage permettra un échange d'informations journalier entre les deux modèles. Les décisions d'intervention pourront être réalisées au cours de la simulation et non plus de manière itérative comme réalisée dans ce cas d'étude. L'intérêt du couplage résidera ainsi dans une automatisation de la génération de stratégies qui permettra de concevoir et d'évaluer un nombre supérieur de stratégies dans un temps limité ou d'évaluer des stratégies sur des séries climatiques plus longues.

L'introduction des indicateurs et des seuils de déclenchement dans la structure informatique permettra d'évaluer des stratégies basées sur des seuils d'intervention différents. De plus, il sera envisageable de construire des stratégies optimales de gestion en optimisant les seuils d'intervention pour la fertilisation et/l'irrigation en se basant sur des objectifs de production ou des objectifs économiques.

Les stratégies décrites dans ce chapitre n'ont pas fait l'objet d'une évaluation micro-économique nécessaire avant toute préconisation de stratégies. Plusieurs raisons m'ont poussée à ne pas intégrer la dimension économique dans l'analyse des performances. Tout d'abord, les différentes stratégies mises en œuvre induiront très probablement une pression d'adventices et de maladies différenciée. La stratégie « intensive », en favorisant le développement d'un couvert abondant et une humidité importante au sein de ce couvert, augmente le risque de développement de maladies. J'ai fait l'hypothèse dans ce travail, comme ce qui avait été mentionné pendant l'enquête des pratiques de 2009, que les agriculteurs adaptaient la protection phytosanitaire à l'état de leur culture. Toutefois, la protection phytosanitaire peut représenter jusqu'à 40% des charges spécifiques (Desbois et Legris, 2007). Pour fournir un indicateur pertinent il serait nécessaire d'évaluer et d'assigner un niveau de pression de maladie à chacune des stratégies et d'y associer un coût économique. Etant donné que les conditions climatiques influencent elles aussi, indépendamment de la stratégie de mise en œuvre, la pression de maladie, il est nécessaire de plus de moduler l'effet des stratégies sur la pression de maladie en fonction des campagnes. De plus, le prix des intrants azotés et le prix du blé ayant fortement varié d'une année à l'autre ces dernières années, l'analyse économique, pour être pertinente, ne peut se faire qu'au travers de différentes hypothèses de prix. Le calcul d'un simple indicateur mettant en jeu uniquement le prix de vente du blé et les charges associées à l'irrigation et à la fertilisation n'aurait pas conduit à une analyse pertinente des stratégies.

Le travail présenté dans cette section s'est focalisé sur un seul site en considérant une série climatique passée. L'étude devra être complétée sur d'autres types de sol afin d'évaluer la sensibilité des stratégies aux différents niveaux de réserves en eau. La mobilisation d'un générateur de climat pourra permettre d'évaluer les potentialités des stratégies sur des séries climatiques futures et d'y associer des probabilités d'obtention d'un certain niveau de performances. De plus, un seul type de précédent cultural a été simulé. La variation du type de précédent permettrait d'évaluer les stratégies à l'échelle du système de culture et non plus uniquement à l'échelle de la parcelle comme ce qui vient d'être présenté. La structure générique d'un modèle comme STICS permet alors de prendre en compte les effets eau et azote du précédent et ainsi de comparer différentes stratégies.

CONCLUSIONS, DISCUSSION ET PERSPECTIVES

L'évolution du contexte de production du blé dur français pose de nouveaux enjeux pour la recherche agronomique. Il s'agit de proposer, dans un contexte climatique, économique et réglementaire en mutation, de nouvelles pratiques culturales permettant d'assurer un revenu à l'agriculteur au travers d'une production suffisante et de qualité, en limitant les externalités négatives liées à l'activité agricole. **L'enjeu de la thèse était de proposer un outil de simulation permettant d'évaluer et de proposer des pratiques culturales de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée pour différents cultivars de blé dur.**

Acquis du travail de thèse

Le premier objectif du travail de thèse était d'adapter un modèle de culture à différentes variétés de blé dur cultivées en France. J'ai entrepris dans un premier temps un travail d'estimation des paramètres, sans remettre en cause la structure du modèle candidat.

Bien que les choix opérés pour réaliser l'estimation des paramètres d'un modèle de culture aient un impact significatif sur la valeur des paramètres obtenus et les performances du modèle (Botterweg, 1995), le choix d'une démarche d'estimation n'est que très rarement justifié et peu de travaux ont analysé l'effet de la démarche de paramétrage mise en oeuvre sur les performances finales du modèle. Le travail entrepris démontre l'importance de cette réflexion préalable, comme illustré dans le deuxième chapitre de cette thèse où nous répondons aux deux questions suivantes : 1) Est-il nécessaire d'estimer les paramètres par étapes successives ? 2) Doit-on intégrer toutes les variables dont on souhaite améliorer la simulation au cours du processus d'estimation ?

L'analyse comparative de trois démarches d'estimation a permis de mettre en évidence que la démarche par étapes successives, la plus couramment mise en oeuvre dans le cas des modèles de culture, n'était pas la plus performante pour réduire les erreurs de simulation des variables finales, comparée à la démarche globale au cours de laquelle l'ensemble des paramètres influençant la simulation des variables dynamiques

sont estimés simultanément. L'analyse comparative a en outre démontré que pour avoir l'assurance de réduire le niveau des résidus d'une variable et améliorer la performance du modèle pour la simulation de cette variable, celle-ci doit être intégrée dans la démarche d'estimation. **La définition d'une démarche de calibration est dès lors dépendante des objectifs d'utilisation du modèle.** Un modèle paramétré pour fournir des simulations précises de rendement et/ou de teneur en protéines n'offre pas de garantie sur la simulation du nombre de grains si cette variable n'a pas été intégrée à la démarche d'estimation.

Dans la plupart des travaux conduits sur l'adaptation des modèles de culture, les modèles sont calibrés sur la base de traitements expérimentaux conduits sur quelques années climatiques et quelques sites (Pala *et al.*, 1996 ; Pecetti et Hollington, 1997 ; Bechini *et al.*, 2006). J'ai conduit le travail de calibration en mobilisant une base de données incluant 235 traitements expérimentaux repartis sur quatre sites et couvrant les périodes 1996-2002 et 2004-2008. La mobilisation d'une importante base de données a permis de couvrir une large gamme de situations pédo-climatiques et d'obtenir un modèle susceptible de couvrir cette gamme de situations, en attestent les faibles valeurs de SDSO obtenues. **A l'issue du travail d'estimation, les niveaux de performances obtenues avec STICS sont comparables aux performances obtenus avec les autres modèles de culture** utilisés par la communauté scientifique internationale tel que APSIM (Meinke *et al.*, 1998 ; Asseng *et al.*, 2002), CERES (Xiong *et al.*, 2008), SIRIUS (Martre *et al.*, 2006), ou AZODYN (David et Jeuffroy, 2009).

Si les niveaux de précision et de robustesse ont été améliorés au travers de l'estimation des valeurs de paramètres, la sensibilité du modèle à simuler l'effet du fractionnement de la dose d'azote sur la teneur en azote des grains n'a quant à elle pas été améliorée. J'ai fait l'hypothèse que le manque de sensibilité provenait de la structure du modèle et plus particulièrement du formalisme empirique utilisé pour représenter l'accumulation de l'azote dans les grains. Pour vérifier cette hypothèse, j'ai testé un formalisme alternatif inspiré du modèle AZODYN qui différencie l'azote provenant de la remobilisation de l'azote stocké dans les parties végétatives de l'azote absorbée après la floraison. **L'introduction de ce formalisme n'a pas amélioré la sensibilité du modèle au fractionnement, invalidant ainsi l'hypothèse précédemment posée. L'introduction du formalisme a toutefois permis de mettre en lumière que l'origine de la non réponse observée provenait d'un problème au niveau de l'absorption d'azote pendant la phase post-floraison.** Du fait du manque de données expérimentales pendant cette phase du cycle de développement, la source des erreurs n'a pu être identifiée précisément.

Le deuxième objectif de la thèse était d'élaborer un modèle de décision de l'agriculteur vis-à-vis des pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation.

Au travers d'enquêtes en exploitation agricole et en mobilisant le concept du modèle d'action proposé par Sebillotte et Soler (1988), j'ai pu révéler les différentes stratégies mises en œuvre pour l'irrigation et la fertilisation azotée du blé dur ainsi que les différentes règles de décision intervenant dans la gestion stratégique et tactique, telles que définies par Trouvat (1997), de ces deux opérations.

Il ressort de ce travail que **les stratégies de fertilisation azotée adoptées par les agriculteurs sont liées aux débouchés de la production**. Pour les producteurs de semences, la fertilisation a pour objectif de favoriser un nombre de grains important et se traduit par l'absence d'un apport tardif en fin de montaison. Pour les producteurs dont le débouché est l'alimentation humaine, la fertilisation azotée est conduite de manière à assurer l'atteinte des rendements et de teneur en protéines fixés en début de campagne.

Les stratégies d'irrigation sont liées à la localisation des exploitations et au volume d'eau disponible sur l'exploitation. La localisation influence directement la demande en eau pour le blé dur au travers d'une demande climatique différenciée. Elle influence indirectement les choix d'assolement réalisés sur la sole irrigable, desquels découlent l'importance donnée à la culture de blé dur à l'échelle de l'exploitation agricole et les volumes d'eau d'irrigation attribués pour cette culture.

Les décisions qui interviennent dans la gestion des opérations de fertilisation azotée et d'irrigation relèvent plus du niveau stratégique que du niveau tactique. Un nombre important de décisions stratégiques est pris en début de campagne (détermination de la quantité apportée, du nombre de fractionnement, de la période des apports d'azote, du volume d'irrigation attribué au blé dur, du nombre de tours d'eau réalisables). Les décisions tactiques relèvent de la détermination du moment des apports d'eau et d'azote et de la quantité d'eau attribuée à chaque tour d'eau.

Il ressort de ce travail que la recherche de stratégies de gestion conjointe pour l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur devra intégrer les différentes contraintes rencontrées par les agriculteurs et notamment les contraintes liées au volume d'eau disponible pour le blé dur. La recherche de stratégies adaptées ne sera pas la même pour les agriculteurs du Sud-Est de la France pour lesquels la ressource en eau s'avère pour le moment non limitante, et l'irrigation du blé dur une pratique indispensable à la pérennité de la culture au sein de l'exploitation, que pour les agriculteurs de la région Poitou-Charentes pour qui l'irrigation du blé dur est vue comme un moyen de réduire la demande en eau de l'exploitation agricole, dans un contexte de pénuries croissantes en période estivale.

L'enjeu de la thèse étant d'évaluer et de proposer des stratégies de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation du blé dur au travers de l'utilisation d'un modèle biodécisionnel, j'ai illustré l'utilisation potentielle qui pourrait être faite après le développement informatique du modèle de décision et son couplage avec le modèle biophysique. Au travers d'un cas d'étude localisé dans la région Midi-Pyrénées, j'ai évalué les opportunités d'opérer une irrigation d'appoint en cas de sécheresse et son intérêt par rapport à une stratégie sans irrigation. J'ai évalué l'intérêt que pouvait avoir l'augmentation de la dose d'azote, associée à des irrigations si nécessaire sur les gains de rendement et de teneur en protéines. Il ressort de ce travail que des gains de rendements de 15 % pourraient être observés au travers d'une irrigation de 40 mm les années où 70% de la réserve utile a été consommée. Cette augmentation de rendement aurait cependant pour corollaire une baisse de la teneur en protéines obtenues. **Ces résultats remettent en perspectives l'enjeu de proposer des stratégies de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée permettant d'assurer des niveaux de rendement acceptables pour l'agriculteur, associés à des teneurs en protéines satisfaisant les critères de commercialisation.**

Les limites du travail de thèse

L'objectif initial de la thèse était de proposer un outil mobilisable dans l'ensemble des régions de production françaises. **Si les pratiques ont été étudiées à l'échelle nationale, le modèle biophysique a été paramétré puis évalué uniquement pour les conditions du sud de la France (Midi-Pyrénées et PACA).** La capacité de STICS à simuler la croissance des cultivars paramétrés n'a pas pu être déterminée en région Centre ou Poitou-Charentes du fait de l'absence de références expérimentales. On peut toutefois supposer que les caractéristiques climatiques de ces régions septentrionales se situent dans la gamme des variations rencontrées au cours des onze campagnes climatiques utilisées pour la calibration du modèle biophysique et que le modèle est *a priori* adapté pour ces régions. Cependant une évaluation du modèle dans ces régions serait nécessaire avant de conclure définitivement.

Les cultivars paramétrés au cours de cette thèse correspondent à des cultivars expérimentés au sein des réseaux INRA et Arvalis Institut du Végétal pendant la période 1997-2009. **Si les variétés Biensur et Nefer représentaient respectivement les deuxième et quatrième variétés les plus cultivées sur le territoire nationale en terme de surface en 2006 (AGRESTE, 2008b), certaines variétés ne sont plus, pas ou peu cultivées.** Parmi les sept variétés étudiées, Amarillo n'a pas jamais été inscrite au catalogue officiel des variétés et Montsegur a été radiée en 2007. L'année moyenne d'inscription des cinq cultivars restant est

1993, alors que 60 variétés sur les 74 présentes en 2011 ont été inscrites à partir de 1997 qui représente la première campagne utilisée pour le paramétrage (GEVES, 2011). Etant donné le nombre élevé de nouvelles variétés inscrites chaque année, il se pourrait que certaines des variétés paramétrées viennent à disparaître du catalogue dans les années à venir et ne soient donc plus cultivées. Ceci pose la question de la pérennité du paramétrage proposé et de la nécessité de réaliser un travail de maintenance. La méthode de paramétrage mise au point au cours de cette thèse et l'outil OptimisTICS doivent permettre de réaliser ce travail sous réserve que des données expérimentales soient disponibles pour les nouvelles variétés.

Au démarrage de la thèse, la valorisation des travaux expérimentaux existants avait été privilégiée au détriment de la réalisation d'expérimentations spécifiques. Ce choix se justifiait par l'existence de nombreuses références expérimentales, obtenues au cours de plusieurs campagnes, sur différents sites permettant d'appréhender la variabilité pédo-climatique et avec différents cultivars. Après un recensement des expérimentations réalisées sur les réseaux INRA et Arvalis-Institut du végétal faisant intervenir le blé dur, un total de 572 traitements expérimentaux (site*année*ITK) représentant une combinaison de 76 sites années avait été référencé. Sur ces 572 traitements, 373 ont été utilisés pour la calibration et l'évaluation du modèle de culture soit les deux tiers de l'échantillon initial. **L'absence de métadonnées caractérisant certains éléments de l'itinéraire technique (type de précédent, date des apports d'azote...), ou l'état sanitaire de la culture ainsi que l'absence de données permettant de caractériser le milieu physique (caractéristiques permanentes du sol, données climatiques...) ou les conditions hydriques et azotées du sol au moment du semis a conduit à la suppression d'un tiers des données initialement recensées.**

Le choix de cette stratégie de valorisation des travaux existants s'est certes, traduit par un nombre de références expérimentales important, mais aussi par un nombre limité de situations comparables les unes aux autres (entre années ou entre itinéraires techniques) ainsi que par une hétérogénéité au niveau du nombre de variables disponibles dans chaque essai. **Ceci a eu pour conséquences de limiter la capacité à identifier certains processus, comme l'effet de la température sur la dynamique d'accumulation d'azote et de carbone dans les grains, ou à valider certaines hypothèses concernant les sources d'erreur du modèle. L'absence de données caractérisant le statut de la culture en phase reproductrice (biomasse, quantité d'azote absorbée, LAI mesurés en post-floraison) et du sol (humidité, quantité d'azote) a par exemple rendu délicate l'identification des raisons de la sous-estimation de la quantité d'azote absorbée en cas d'apport tardif.**

La question des impacts du changement climatique sur la production est de plus en plus prégnante dans la communauté scientifique. Dans leurs travaux conduits sur l'origine du

plafonnement du rendement du blé tendre observé ces dernières années, Gate *et al.* (2010) ainsi que Brisson *et al.* (2010) estiment que chaque jour dépassant la température moyenne de 25°C équivaut à une perte de rendement de 1.4 q/ha pour le blé tendre. Les scénarii pour le climat futur prévoient une augmentation des températures moyennes qui aurait pour impact d'augmenter ce risque d'échaudage thermique. Dans la version actuelle de STICS, l'effet des températures élevées est pris en compte indirectement au travers d'un raccourcissement du nombre de jours de remplissage des grains. Les températures extrêmes journalières inférieures à 0°C et supérieures à 38°C annulent le transfert journalier du carbone et de l'azote vers les grains. L'échaudage thermique n'est donc que rarement simulé puisqu'il est peu fréquent que de telles températures se produisent. Garcia de Cortazar-Atauri *et al.* (2009) ont évalué deux formalismes introduisant l'effet des températures (maximum et minimum ou moyenne) sur l'efficacité de remplissage des grains de blé tendre. J'ai envisagé de tester ces formalismes pour le blé dur et en parallèle d'estimer la température à partir de laquelle le remplissage des grains était altéré. Cependant je n'ai pas rencontré dans ma base de données d'années pour lesquelles une baisse du rendement avait été associée à de fortes températures pendant le remplissage. **N'étant pas en mesure de pouvoir mesurer les bénéfices d'un tel formalisme sur une meilleure prise en compte de l'effet des fortes températures sur le remplissage, je n'ai pas choisi de tester ce type de formalisme.**

L'objectif initial de la thèse était d'aboutir à l'obtention d'un modèle biodécisionnel pour évaluer et proposer de nouvelles stratégies de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur. **Si les bases conceptuelles de représentation des décisions ont été posées à l'issue de l'enquête, le travail d'implémentation informatique des décisions et de couplage avec la partie biophysique reste à poursuivre.**

L'évaluation des stratégies proposée dans le cinquième chapitre reste encore relativement frustrée dans la mesure où **elle n'intègre pas la dimension économique** dans les critères d'évaluation et dans la mesure où **ces indicateurs ont été sélectionnés sans concertation avec les acteurs susceptibles d'utiliser les résultats de ces travaux. Les aspects liés à l'efficacité de l'utilisation des ressources en eau et en azote n'ont pas été évalués.**

Retour sur la démarche de thèse et perspectives

Les résultats obtenus à l'issue de ce travail de thèse et les limites associées mettent en avant l'intérêt de pouvoir coupler les travaux d'expérimentation à ceux de la modélisation. Le développement des modèles de culture n'est pas récent dans le monde agronomique. Si des progrès ont été opérés ces dernières années sur la représentation de certains processus affectant la croissance de la culture (rôle limitant de l'azote et de l'eau dans le fonctionnement de la plante et du sol), certains processus restent encore mal connus ou tout du moins peu quantifiés (influence des températures extrêmes sur l'échaudage physiologique, influence des conditions de nutrition azotée et hydrique sur l'élaboration de la teneur en protéines). **L'intégration de modules représentant plus finement les mécanismes ne peut être déconnectée de l'acquisition de données expérimentales pertinentes.** Toute expérimentation n'a pas pour vocation initiale d'être utilisées dans un cadre de modélisation. Néanmoins, étant donné le recours de plus en plus fréquent à la modélisation pour concevoir et évaluer des systèmes de production, la réflexion autour de la conception d'expérimentations au champ se doit désormais d'inclure les aspects relatifs à l'exploitation des résultats obtenus dans le cadre de projets de modélisation. **Ces éléments m'amènent à formuler des recommandations concernant l'acquisition de données expérimentales en vue de leur valorisation ultérieure pour la modélisation. Ces données relèvent de la caractérisation de l'état du sol et de la plante.** Elles sont illustrées par la Figure 41.

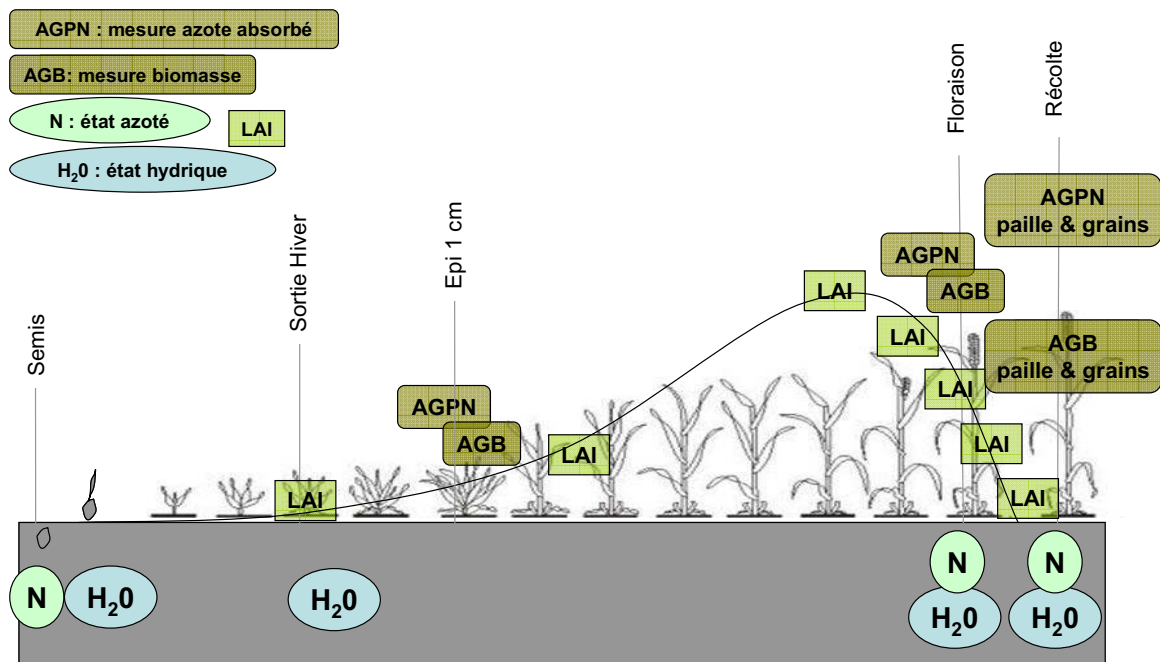


Figure 41 : Recommandations pour l'acquisition de données en vue de l'utilisation pour la modélisation.

Au niveau de la caractérisation de l'état du sol, l'estimation de l'état hydrique et azoté du sol à différents périodes clés du développement de la culture est une information indispensable pour juger de la qualité d'un modèle de culture à représenter la dynamique en eau et en azote au sein du compartiment sol. De cette dynamique dépend la simulation des stress hydriques et azotés qui vont ensuite impacter l'ensemble des processus simulés. Les périodes clés préconisées sont le semis, la fin de l'hiver, la période de floraison et la récolte. La connaissance de l'état hydrique et azotée au début de la période de simulation, le plus souvent au semis, permet d'initialiser le modèle de culture. La connaissance de l'état hydrique à la sortie de la période hivernale permet d'appréhender l'humidité à la capacité au champ, à condition que les pluies hivernales aient été suffisantes pour réalimenter la réserve en eau du sol. La connaissance de l'état azoté à cette même période permet d'estimer la minéralisation hivernale de l'azote organique provenant des résidus et de l'humus et d'identifier dans quelle mesure le modèle reproduit correctement ce processus. La connaissance de l'état hydrique au moment de la floraison permet d'estimer le niveau des réserves à la fin de la période de montaison et avant le début de la phase de remplissage. Dans un modèle comme STICS, il est possible de débiter les simulations à partir du stade floraison. Sous réserve de données caractérisant le statut de la plante (biomasse, LAI et quantité d'azote absorbée) à ce stade, la connaissance du statut du sol permettrait de différencier la simulation de la phase végétative de la phase reproductive et de focaliser l'analyse sur la période d'intérêt. La connaissance de l'état hydrique et azoté au moment de la récolte permet d'identifier le niveau des reliquats azotés post-récolte ainsi que le niveau des réserves hydriques disponibles en été. Outre la connaissance du statut hydrique du sol à différentes périodes du cycle de culture, l'acquisition d'informations à pas de temps rapprochés permet de caractériser l'évolution du profil hydrique et d'estimer la profondeur de sol explorée par les racines. Par comparaison avec le profil simulé, il est possible d'évaluer la capacité d'un modèle à simuler la croissance du front racinaire.

Au niveau de la caractérisation de l'état de la plante, la connaissance des niveaux de biomasse et d'azote absorbé à la sortie de l'hiver, à la floraison et à la récolte est nécessaire pour évaluer l'adéquation entre les dynamiques d'accumulation en carbone et en azote observées et simulées par le modèle. Elle n'est pourtant pas suffisante pour identifier l'origine des écarts entre les observations et les simulations. Pour les modèles basant l'accumulation de biomasse sur l'interception du rayonnement lumineux, la connaissance de la dynamique réelle de croissance foliaire permet i) d'estimer dans quelle mesure le modèle simule précisément cette variable, ii) dans quelle mesure l'existence de stress impacte correctement l'évolution

de la surface photoréceptrice et iii) dans quelle mesure la relation simulée entre surface photoréceptrice et élaboration de la biomasse aérienne est cohérent. La caractérisation de la dynamique de croissance foliaire observée est d'autant plus pertinente que dans le cas de STICS, il est possible d'utiliser le LAI comme une variable d'entrée du modèle. Cette option permet de circonscrire les processus simulés. Les mesures de LAI dont je disposais au sein de ma base de données étaient la plupart du temps ponctuelles et se concentraient sur le début du cycle, en phase de croissance. La dynamique de sénescence était rarement disponible. Etant donné que 70 à 80% de l'accumulation de carbone dans les grains provient de la photosynthèse en phase de post-floraison, l'évolution de la surface photoréceptrice pendant cette période est un élément important pour le diagnostic du modèle. De plus, en contribuant à la remobilisation de l'azote vers les grains, la connaissance de cette dynamique dans des essais de fractionnement de l'azote permettrait de quantifier l'effet des apports tardifs sur la dynamique de sénescence des feuilles. Considérant ces éléments, il me semble que les efforts doivent se concentrer plus particulièrement sur la période post-floraison.

L'acquisition de ces données par des mesures directes nécessite un investissement humain et financier conséquent qui limite fortement la faisabilité de ces mesures en routine, et justifiant par ailleurs la recours aux modèles de culture. **Les travaux conduits sur l'estimation des variables caractérisant le couvert par des mesures indirectes permettent d'envisager l'acquisition de ces données de façon plus automatique (Denison et Russotti, 1997 ; Aparicio *et al.*, 2002 ; Guérif *et al.*, 2007). De plus, le développement de plateforme de phénotypage haut débit en plein champ associant expérimentation et mesures de télédétection offre une perspective intéressante pour l'acquisition de ce type de données à pas de temps rapproché. Les plateformes de phénotypage ont par ailleurs un objectif de conception d'idéotypes variétaux adaptés à des conditions de milieux ou à des itinéraires techniques actuels ou à venir et résistants aux diverses pressions biotiques (maladies et ravageurs). Les résultats issus de ces plateformes pourraient servir à alimenter le paramétrage d'un modèle de culture comme STICS.**

Dans le cadre du développement du modèle de culture pour une meilleure simulation de la teneur en azote des grains, **l'acquisition de données sur la dynamique d'absorption d'azote post-floraison et la contribution relative des différents organes permettrait de mieux identifier les facteurs intervenant dans l'élaboration de cette variable.** Les travaux entrepris par l'équipe 'Rendement et Adaptation du blé aux Contraintes Abiotiques' de l'INRA de Clermont-Ferrand s'inscrivent dans cette perspective, mais se concentre sur le blé tendre.

L'acquisition de données expérimentales nécessite le stockage de ces informations sous une forme structurée et réutilisable par un tiers. **La construction d'une base de données blé dur permettrait de mutualiser les connaissances acquises et leur réappropriation pour différentes applications.** La notion de bases de données est cependant le plus souvent associée aux données expérimentales uniquement. Toutefois, les résultats obtenus par simulation sont eux aussi porteurs d'informations importantes qui peuvent être remobilisées ultérieurement. Etant donné le temps conséquent nécessaire pour la création des situations simulées et pour l'apprentissage que nécessite l'utilisation de modèles de cultures, **la création de base de données de simulation associant les données d'entrées du modèle, les valeurs de paramètres et les résultats obtenus permettrait une mutualisation des travaux conduits en modélisation.**

Au démarrage de la thèse, il avait été décidé de ne pas développer de modèle spécifique pour le blé dur. Le développement d'un nouveau modèle ne se justifiait pas étant donné les avancées de modélisation déjà obtenues par la communauté scientifique. De plus, cette stratégie aurait impliqué de disposer de nombreuses références expérimentales permettant de construire et de vérifier la simulation des processus modélisés. Il avait donc été choisi, sur la base de différents critères présentés en introduction, de retenir un modèle candidat et de l'adapter en fonction de nos objectifs.

En optant pour le choix d'un modèle existant, **le modélisateur accepte les niveaux de complexité et/ou de simplicité avec lesquels sont (ou ne sont pas) représentés les mécanismes. En fonction des objectifs poursuivis, tous les niveaux de détails ne sont pourtant pas nécessaires (Adam *et al.*, 2011).** Si la simplicité est attrayante par le fait qu'elle permet une plus grande transparence des formalismes et donc une communication plus aisée auprès des destinataires voire une appropriation plus rapide par les utilisateurs, elle peut induire un manque de sensibilité vis-à-vis des facteurs importants et une faible prise en compte des interactions entre les éléments du système. A l'inverse, un modèle complexe permet, certes, de prendre en compte un ensemble de processus et de fournir différents types d'informations mais il nécessite un temps d'apprentissage et un paramétrage conséquent. De plus la capacité d'utilisation par d'autres utilisateurs est fortement réduite. **La sélection d'un modèle candidat pour répondre aux questions posées dépend ainsi d'un subtil dosage entre complexité et simplicité (Colbach, 2010).** Cet aspect relève l'enjeu des plateformes de modélisation, telles que RECORD (Raynal et Quesnel, 2011), qui, en permettant de sélectionner différents modules mécanistes, permettront de choisir le degré de complexité nécessaire et suffisant pour atteindre les objectifs visés par le modélisateur.

Une fois le couplage informatique réalisé entre le modèle de décision et le modèle de culture, le modèle biodécisionnel pourra servir à évaluer différentes stratégies dans une démarche de conception assistée par simulation de nouvelles stratégies. La démarche de conception n'a pas été abordée au cours de cette thèse, si ce n'est légèrement dans le cinquième chapitre. **Elle nécessite une phase préalable de génération des stratégies à tester. Deux approches peuvent permettre d'accomplir cette étape : la génération d'une gamme de stratégies modulées par des seuils d'intervention différents ou par la activation/désactivation de certaines règles de décision, et la génération par optimisation de seuils d'intervention maximisant une certaine fonction d'objectifs (Bergez *et al.*, 2009).**

L'intervention des acteurs concernés par la proposition de nouvelles stratégies (ingénieurs et techniciens du développement agricole, chercheurs, groupe d'agriculteurs) dans la démarche de conception de stratégies est alors essentielle. **La mobilisation d'un panel d'experts permettrait de générer des stratégies à tester basées sur des seuils d'interventions modulés et répondant à des objectifs de production et des niveaux de contraintes différents. Elle permettrait d'identifier les indicateurs pertinents pour l'évaluation nécessaire de ces stratégies.** L'outil développé dans cette thèse fournit des indicateurs agronomiques et environnementaux pour les performances des stratégies testées. Il ne fournit pas d'indicateurs économiques ni d'indicateurs sur les pressions biotiques. **Une réflexion devra être menée conjointement avec les différents acteurs pour relier ces indicateurs de performances agronomiques à des indicateurs de pression de maladies et de performances économiques.**

Enfin, dans la perspective de proposer des stratégies de gestion durables du point de vue agronomique, environnemental et économique, l'évaluation multicritère pourra être mobilisée pour évaluer les différentes stratégies (Sadok *et al.*, 2008). **Une réflexion autour de la définition et de la pondération des critères d'évaluation sera nécessaire i) pour générer des stratégies par optimisation, ii) pour évaluer les performances des systèmes étudiés et iii) pour proposer des stratégies de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée pour le blé dur adaptées au contexte des exploitations agricoles.**

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbate, P.E., Andrade, F.H., Culot, J.P., 1995. The effects of radiation and nitrogen on number of grains in wheat. *Journal of agricultural Science* 124, 351-360.
- Abeledo, L.G., Savin, R., Slafer, G.A., 2008. Wheat productivity in the Mediterranean Ebro Valley: Analyzing the gap between attainable and potential yield with a simulation model. *European Journal of Agronomy* 28, 541-550.
- Adam, M., Van Bussel, L.G.J., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Ewert, F., 2011. Effects of modelling detail on simulated potential crop yields under a wide range of climatic conditions. *Ecological Modelling* 222, 131-143.
- AGRESTE, 2004. Enquête sur les pratiques culturales en 2001. *Agreste Chiffres et données Agriculture* 159, 286 pages.
- AGRESTE, 2008a. Livraison d'engrais : reprise sur la campagne culturale 2007-2008, *Agreste Conjoncture Moyen de production*. 4 pages.
- AGRESTE, 2008b. Enquête sur les pratiques culturales en 2006. *Agreste Chiffres et données Agriculture* 200.
- AGRESTE, 2010. Résultats économiques des exploitations agricoles en 2008. *Agreste Les dossiers* 9, 23-29.
- Amigues J.P., P. Debaeke, B. Itier, G. Lemaire, B. Seguin, F. Tardieu, A. Thomas (Eds), 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. *Expertise scientifique collective, Rapport, INRA, France*, 380 pages + annexes.
- Amir, J., Sinclair, T.R., 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. *Field Crops Research* 28, 59-69.
- Anothai, J., Patanothai, A., Jogloy, S., Pannangpetch, K., Boote, K.J., Hoogenboom, G., 2008. A sequential approach for determining the cultivar coefficients of peanut lines using end-of-season data of crop performance trials. *Field Crops Research* 108, 169-178.
- Aparicio, N., Villegas, D., Araus, J.L., Casadesus, J., Royo, C., 2002. Relationship between growth traits and spectral vegetation indices in durum wheat. *Crop Science*. 42, 1547-1555.
- Araus, J.L., Villegas, D., Aparicio, N., del Moral, L.F.G., El Hani, S., Rharrabti, Y., Ferrio, J.P., Royo, C., 2003. Environmental factors determining carbon isotope discrimination and yield in durum wheat under Mediterranean conditions. *Crop Science* 43, 170-180.
- Arduini, I., Masoni, A., Ercoli, L., Mariotti, M., 2006. Grain yield, and dry matter and nitrogen accumulation and remobilization in durum wheat as affected by variety and seeding rate. *European Journal of Agronomy* 25, 309-318.
- Asseng, S., Turner, N.C., Keating, B.A., 2001. Analysis of water- and nitrogen-use efficiency of wheat in a Mediterranean climate. *Plant and Soil* 233, 127-143.
- Asseng, S., Bar-Tal, A., Bowden, J.W., Keating, B.A., Van Herwaarden, A., Palta, J.A., Huth, N.I., Probert, M.E., 2002. Simulation of grain protein content with APSIM-Nwheat. *European Journal of Agronomy* 16, 25-42.
- Aubry, C., Loyce, C., Meynard, J., Chatelin, M.H., Rellier, J.-P., Verjux, N., 1996. Outils et méthodes pour la conception et l'évaluation d'itinéraires techniques. In *Aide à la décision et choix de stratégies dans les entreprises agricoles, Actes du colloque, INRA, Paris*, pp 111-126.
- Aubry, C., Papy, F., Capillon, A., 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56, 45-65.
- Aubry, C., 2000. Une modélisation de la gestion de production dans l'exploitation agricole. *Revue Française de Gestion* 129, 32-45.
- Bahlouli, F., Bouzerzour, H., Benmahammed, A., 2008. Effects of speed and the duration of grain filling and the accumulation of assimilates of the stem in developing the durum wheat yield (*Triticum durum* Desf.) in

- the culture conditions of the high plains of eastern Algeria. *Biotechnologie Agronomie Société et Environnement* 12, 31-39.
- Barbottin, A., 2004. Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des géotypes : pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre. Thèse de doctorat Institut National agronomique Paris-Grignon. 164 pages.
- Barbottin, A., Lecomte, C., Bouchard, C., Jeuffroy, M.H., 2005. Nitrogen remobilization during grain filling in wheat: Genotypic and environmental effects. *Crop Science* 45, 1141-1150.
- Barbottin, A., Le Bail, M., Jeuffroy, M.H., 2006. The Azodyn crop model as a decision support tool for choosing cultivars. *Agronomy for Sustainable Development* 26, 107-115.
- Bassu, S., Asseng, S., Motzo, R., Giunta, F., 2009. Optimising sowing date of durum wheat in a variable Mediterranean environment. *Field Crops Research* 111, 109-118.
- Bechini, L., Bocchi, S., Maggiore, T., Confalonieri, R., 2006. Parameterization of a crop growth and development simulation model at sub-model components level. An example for winter wheat (*Triticum aestivum* L.). *Environmental Modelling & Software* 21, 1042-1054.
- Begg, J.E., Turner, N.C., 1976. Crop water deficit. *Advances in agronomy* 28, 161-217.
- Behera, S.K., Panda, R.K., 2009. Effect of fertilization and irrigation schedule on water and fertilizer solute transport for wheat crop in a sub-humid sub-tropical region. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 130, 141-155.
- Bergez, J.E., Debaeke, P., Deumier, J.M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., Wallach, D., 2001. MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecological Modelling* 137, 43-60.
- Bergez, J.E., Deumier, J.M., Lacroix, B., Leroy, P., Wallach, D., 2002. Improving irrigation schedules by using a biophysical and a decisional model. *European Journal of Agronomy* 16, 123-135.
- Bergez, J.-E., Garcia, F., Leenhardt, D., Maton, L., 2007. Optimizing irrigation management at the plot scale to participate at the regional scale water management resource. In: Casteletti, A. and Soncini-Cessa, R. (Eds.), *Topics on system analysis and integrated water resource management*. Elsevier, Amsterdam, pp 141-160.
- 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.
- Boote, K.J., Jones, J.W., Pickering, N.B., 1996. Potential uses and limitations of crop models. *Agronomy Journal* 88, 704-716.
- Botterweg, P., 1995. The user's influence on model calibration results: an example of the model SOIL, independently calibrated by two users. *Ecological Modelling* 81, 71-81.
- Brisson, N., Mary, B., Ripoche, D., Jeuffroy, M.H., Ruget, F., Nicoullaud, B., Gate, P., Devienne-Barret, F., Antonioletti, R., Durr, C., Richard, G., Beaudoin, N., Recous, S., Tayot, X., Plenet, D., Cellier, P., Machet, J.M., Meynard, J.M., Delecolle, 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., Ruget, F., Gate, P., Lorgeau, J., Nicoullaud, B., Tayot, X., Plenet, D., Jeuffroy, M.H., Bouthier, A., Ripoche, D., Mary, B., Justes, E., 2002. STICS: a generic model for simulating crops and their water and nitrogen balances. II. Model validation for wheat and maize. *Agronomie* 22, 69-92.
- Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussiere, F., Cabidoche, Y.M., Cellier, P., Debaeke, P., Gaudillere, J.P., Henault, C., Maraux, F., Seguin, B., Sinoquet, H., 2003. An overview of the crop model. *European Journal of Agronomy* 18, 309-332.
- Brisson, N., Juin, S., Desfonds V, García de Cortázar Atauri I., Lebonvallet S., Ripoche D., Sappe G., Bes B., Bruchou C., Guerif M., Durr C., Launay M., 2005. Quelles composantes environnementale et génétique pour l'élaboration de la qualité du blé dur en région PACA? Approche couplée expérimentation – modélisation. *Bilan d'un programme de recherche 2001-2005* 1, 57 pages.
- Brisson, N., Wery, J., Boote, K., 2006. Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In: Wallach, D., Makowski, D., and Jones, J.W. (Eds.), *Working with dynamic crop models*. Elsevier, Amsterdam, pp 257-280.

- Brisson, N., Launay, M., Mary, B., Beaudoin, N., 2008. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model, first ed. Quae, Versailles. 297 pages.
- 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.
- Buerstmayr, H., Steiner, B., Lemmens, M., Ruckebauer, P., 2000. Resistance to fusarium head blight in winter wheat: Heritability and trait associations. *Crop Science* 40, 1012-1018.
- Chatelin, M.H., Aubry, C., Poussin, J.C., Meynard, J.M., Massé, J., Verjux, N., Gate, P., Le Bris, X., 2005a. Déciblé, a software package for wheat crop management simulation. *Agricultural Systems* 83, 77-99.
- Colbach, N., 2010. Modelling cropping system effects on crop pest dynamics: How to compromise between process analysis and decision aid. *Plant Science* 179, 1-13.
- Confalonieri, R., Bregaglio, S., Acutis, M., 2010. A proposal of an indicator for quantifying model robustness based on the relationship between variability of errors and of explored conditions. *Ecological Modelling* 221, 960-964.
- Cowger, C., Patton-Ozkurt, J., Brown-Guedira, G., Perugini, L., 2009. Post-anthesis moisture increased Fusarium head blight and deoxynivalenol levels in North Carolina winter wheat. *Phytopathology* 99, 320-327.
- Cox, M.C., Qualset, C.O., Rains, D.W., 1986. Genetic-variation for nitrogen assimilation and translocation in wheat .3. Nitrogen translocation in relation to grain-yield and protein. *Crop Science* 26, 737-740.
- CRA Midi-Pyrénées, 2007, Références technico-économiques en systèmes de grandes cultures 2007. 14 pages
- Cros, M.J., Duru, M., Garcia, F., Martin-Clouaire, R., 2001. Simulating rotational grazing management. *Environment International* 27, 139-145.
- David, C., Jeuffroy, M.H., Laurent, F., Mangin, M., Meynard, J.M., 2005. The assessment of Azodyn-Org model for managing nitrogen fertilization of organic winter wheat. *European Journal of Agronomy* 23, 225-242.
- David, C., Jeuffroy, M.H., 2009. A sequential approach for improving AZODYN crop model under conventional and low-input conditions. *European Journal of Agronomy* 31, 177-182.
- Debaeke, P., Hilaire, A., 1995. Wheat response to supplementary irrigation in south-western France. I. Experimental response to pre-anthesis applications. *Agricoltura Mediterranea* 125, 51-63.
- Debaeke, P., Petit, M.S., Bertuzzi, P., Mischler, P., Munier-Jolain, N., Nolot, J.M., Reau, R., Verjux, N., 2008. Evaluation des systèmes de culture en stations et en exploitations agricoles : où en sont les méthodes. In: Reau, R. and Doré, T. (Eds.), *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer?* Educagri, Dijon, pp 150-168.
- 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.
- Denison, R.F., Russotti, R., 1997. Field estimates of green leaf area index using laser-induced chlorophyll fluorescence. *Field Crops Research* 52, 143-149.
- Desbois, D., Legris, B., 2007. Prix et coûts de production de six grandes cultures : blé, maïs, colza, tournesol, betterave et pomme de terre. In *L'agriculture, nouveaux défis*. pp 65-78.
- Desclaux, D., Samson, M.-F., Caron, D., Roumet, P., Braun, P., Gaspard, M., Poirier, S., Compan, F., 2005. Qualité du blé dur en Zone Traditionnelle: Diagnostic en Partenariat et Avancées Multidisciplinaires. In *Symposium international INRA-PSDR "Territoires et enjeux du développement régional"*, 9-11 mars, Lyon.
- Deumier, J.-M., Jacquin, C., Berrodier, M., Lacroix, B., Bouthier, A., 2008. La mise en oeuvre de pratiques innovantes en vue de mieux valoriser la ressource en eau des agriculteurs. *Innovations Agronomiques* 2, 83-92.
- Dias, A.S., Lidon, F.C., 2009. Evaluation of grain filling rate and duration in bread and durum wheat, under heat stress after anthesis. *Journal of Agronomy and Crop Science* 195, 137-147.
- Di Fonzo N., De Vita, P., Gallo, A., Fares, C., Padalino, O., Troccoli, A., 2000. Crop management efficiency as a tool to improve durum wheat quality in mediterranean areas. In: Abecassis, J., Autran, J.C., Feillet, P. (Eds) *Durum Wheat, semolina and pasta quality. Recent achievements and new trends*. Montpellier, 27 novembre 2000. 67-82.

- Donatelli, M., Acutis, M., Bellocchi, G., Fila, G., 2004. New indices to quantify patterns of residuals produced by model estimates. *Agronomy Journal* 96, 631-645.
- Dounias, I., Aubry, C., Capillon, A., 2002. Decision-making processes for crop management on African farms. Modelling from a case study of cotton crops in northern Cameroon. *Agricultural Systems* 73, 233-260.
- Ducheyne, S., Vanclooster, M., Feyen, J., 1998. A systematic calibration and validation procedure applied to an integrated soil-crop model. In: Heineke, H.J., Eckelmann, W., Thomasson, A.J., Jones, R.J.A., Montanarella, L., and Buckley, B. (Eds.), *Land Information Systems: Developments for planning the Sustainable Use of Land Resources*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, pp 461-468.
- Eck, H.V., 1988. Winter-wheat response to nitrogen and irrigation. *Agronomy Journal* 80, 902-908.
- Ferrise, R., Triossi, A., Stratonovitch, P., Bindi, M., Martre, P., 2010. Sowing date and nitrogen fertilisation effects on dry matter and nitrogen dynamics for durum wheat: An experimental and simulation study. *Field Crops Research* 117, 245-257.
- Flagella, Z., Giuliani, M.M., Giuzio, L., Volpi, C., Masci, S., 2010. Influence of water deficit on durum wheat storage protein composition and technological quality. *European Journal of Agronomy* 33, 197-207.
- Fowler, D.B., 2003. Crop nitrogen demand and grain protein concentration of spring and winter wheat. *Agronomy Journal* 95, 260-265.
- FranceAgriMer, 2010, Marché du blé dur, Les études de France AgriMer. Données statistiques Céréales. 50 pages.
- Garrido-Lestache, E., Lopez-Bellido, R.J., Lopez-Bellido, L., 2005. Durum wheat quality under Mediterranean conditions as affected by N rate, timing and splitting, N form and S fertilization. *European Journal of Agronomy* 23, 265-278.
- Gate, P., 1995, *Ecophysiologie du blé : de la plante à la culture*, ITCF & Technique et documentation Lavoisier, Paris. 429 pages.
- Gate, P., Brisson, N., Gouache, D., 2010. Les causes du plafonnement du rendement du blé en France: d'abord une origine climatique. *Compte-rendu de l'Académie d'Agriculture de France* 96, 17-23.
- Garcia de Cortazar-Atauri, I., 2006. Adaptation du modèle STICS à la vigne (*Vitis vinifera* L.). Utilisation dans le cadre d'une étude du changement climatique à l'échelle de la France. Thèse de doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier, 349pp.
- Garcia de Cortazar-Atauri, I., 2009, Evaluation des formalismes du calcul du rendement des plantes déterminées. Cas du blé tendre et du blé dur. Document de synthèse INRA-FSOV. 31 pages.
- GEVES, 2011, Catalogue officiel des variétés, http://www.geves.fr/index.php?rub_id=190, consulté le 19 janvier 2011.
- Gonzalez-Dugo, V., Durand, J.L., Gastal, F., 2010. Water deficit and nitrogen nutrition of crops: A review. *Agronomy for Sustainable Development* 30, 529-544.
- Guérif, M., Houlès, V., Makowski, D., Lauvernet, C. 2006. Data assimilation and parameter estimation for precision agriculture using the crop model STICS. In Wallach, D., Makowski, D., Jones, J. W. (Eds.) *Working with dynamic crop models. Evaluation, analysis, parameterization, and applications*. Elsevier, Amsterdam. p. 395:401
- Guérif, M., Houles, V., Baret, F., 2007. Remote sensing and detection of nitrogen status in crops. Application to precise nitrogen fertilization. *Progress of Information Technology in Agriculture* 593-601.
- Guillaume, S., Bergez, J.-E., Justes, E., 2009. Modelling water and nitrogen interactions in durum wheat: A first step towards the conception of joint management strategies for irrigation and nitrogen fertilization. In M.K. Van Ittersum, J. Wolf and H.H. Van Laar (Eds.) *Proc. Integrated Assessment of agriculture and sustainable development; setting the agenda for science and policy*, Egmond aan Zee, The Netherlands. 10-12 March 2009, Wageningen University and Research Centre, Wageningen. pp. 212-213
- Guttieri, M.J., McLean, R., Stark, J.C., Souza, E., 2005. Managing irrigation and nitrogen fertility of hard spring wheats for optimum bread and noodle quality. *Crop Science* 45, 2049-2059.
- Haberle, J., Svoboda, P., Raimanova, I., 2008. The effect of post-anthesis water supply on grain nitrogen concentration and grain nitrogen yield of winter wheat. *Plant Soil and Environment* 54, 304-312.

- Hammer, G.L., Kropff, M.J., Sinclair, T.R., Porter, J.R., 2002. Future contributions of crop modelling - from heuristics and supporting decision making to understanding genetic regulation and aiding crop improvement. *European Journal of Agronomy* 18, 15-31.
- INSEE, 2011. Indice des prix des produits agricoles à la production-IAAPP. Série Brute blé dur. http://www.indices.insee.fr/bsweb/servlet/bsweb?action=BS_SERIE&ONGLET=1&BS_IDBANK=1570485&BS_IDARBO=1400000000000, consulté le 12 novembre 2010,
- Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Brooking, I.R., Francis, G.S., 1998. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. *European Journal of Agronomy* 8, 161-179.
- Jenner, C.F., Ugalde, T.D., Aspinall, D., 1991. The Physiology of Starch and Protein Deposition in the Endosperm of Wheat. *Australian Journal of Plant Physiology*. 18, 211-226.
- Jeuffroy, M.H., Bouchard, C., 1999. Intensity and duration of nitrogen deficiency on wheat grain number. *Crop Science* 39, 1385-1393.
- 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., Barbottin, A., Jones, J.W., Lecoœur, J., 2006. Crop models with genotype parameters In Wallach,D.; Makowski,D.; Jones,J.W. (Eds) Working with dynamic crop models. Elsevier, Amsterdam, pp 281-307.
- Jeuffroy, M.-H., Bergez, J.-E., David, C., Flénet, F., Gate, P., Loyce, C., Maupas, F., Meynard, J.M., Reau, R., Surleau-Chambenoit, C., 2008. Utilisation des modèles pour l'aide à la conception et à l'évaluation d'innovations techniques en production végétale : bilan et perspectives. In: Reau, R. and Doré, T. (Eds.), Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer? Educagri, Dijon, pp 110-128.
- Jones, J.W., Luyten, J.C., 1998. Simulation of biological processes. In: Peart, R.M. and Bruce Curry, R. (Eds.), Agricultural systems modeling and simulation. Marcel Dekker, New York, pp 19-62.
- Justes, E., Mary, B., Meynard, J.M., Machet, J.M., Thelierhuche, L., 1994. Determination of A Critical Nitrogen Dilution Curve for Winter-Wheat Crops. *Ann Bot* 74, 397-407.
- Justes, E., Jeuffroy, M.H., Mary, B., 1997. Wheat, barley and durum wheat. In Lemaire, G. (Eds.) Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer-Verlag, Berlin, pp. 73-91.
- Justes, E., Lecharpentier, P., Buis, S., Launay, M., Bourges, J., Soudais, J., Clastre, P., Bergez, J.E., Debaeke, P., Wallach, D., Guérif, M., 2009. OptimISTICS, a software for STICS crop model parameter estimation and evaluation which was build up to function with other dynamical models. In M.K. Van Ittersum, J. Wolf and H.H. Van Laar (Eds.) Proc. Integrated Assessment of agriculture and sustainable development; setting the agenda for science and policy, Egmond aan Zee, The Netherlands. 10-12 March 2009, Wageningen University and Research Centre, Wageningen pp. 326-327.
- Keating, B.A., Carberry, P.S., Hammer, G.L., Probert, M.E., Robertson, M.J., Holzworth, D., Huth, N.I., Hargreaves, J.N.G., Meinke, H., Hochman, Z., McLean, G., Verburg, K., Snow, V., Dimes, J.P., Silburn, M., Wang, E., Brown, S., Bristow, K.L., Asseng, S., Chapman, S., McCown, R.L., Freebairn, D.M., Smith, C.J., 2003. An overview of APSIM, a model designed for farming systems simulation. *European Journal of Agronomy* 18, 267-288.
- Lagarias, J.C., Reeds, J.A., Wright, M.H., Wright, P.R., 1996. Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Algorithm in Low Dimensions. *Journal of Optimization* 9, 112-147.
- Latiri-Souki, K., Aubry, C., Doré, T., Sébillotte, M., 1992. Elaboration du rendement du blé dur en conditions semi-arides en Tunisie: relation entre composantes du rendement sous différents régions de nutrition azotée et hydrique. *Agronomie* 12, 31-43.
- LCM International, 2009. Evaluation of measures relating durum wheat sector within the context of the common agricultural policy : Final Report. 175 pages. http://ec.europa.eu/agriculture/eval/reports/wheat/fulltext_en.pdf consulté le 12 janvier 2011.
- Le Bail, M., 2001. Spécificité locale pour un produit banal. Le blé dur destiné à la fabrication de pâtes alimentaires. *Études et Recherches sur les Systèmes Agraires et le Développement*. 32, 37-50.
- Lemaire, G., Gastal, F., 1997. N uptake and distribution in plant canopies. In Lemaire, G. (Eds.) Diagnosis of the nitrogen status in crops. Springer-Verlag, Berlin, pp. pp 3-44.

- Lerner, S.E., Seghezzo, M.L., Molfese, E.R., Ponzio, N.R., Cogliatti, M., Rogers, W.J., 2006. N- and S-fertiliser effects on grain composition, industrial quality and end-use in durum wheat. *Journal of Cereal Science* 44, 2-11.
- Levrault, F., Brisson, N., Pieri, P., Bosc, A., 2010. Changement climatique en zone Sud-Ouest : aperçu des impacts agricoles et forestiers. In: ADEME (Eds.), *Livre vert du projet Climator*. pp 287-296.
- Levy, J.D., M.Bertin, B.Combes, J.Mazodier, A.Roux, 2005. L'irrigation durable. Ministère de l'agriculture, de la pêche, de l'alimentation et de la ruralité-Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et Forêts, 117 pages.
- Loyce, C., Wery, J., 2006. Les outils des agronomes pour l'évaluation et la conception de systèmes de culture. In: Doré, T., Le Bail, M., Martin, P., Ney, B., and Roger-Estrade, J. (Eds.), *L'agronomie aujourd'hui*. Quae, Versailles, pp 77-95.
- Loyce, C., Félix, I., Bouchard, C., Mischler, P., Omon, B., Rolland, B., Valantin-Morison, M., 2008. Méthodes d'évaluation en réseau d'itinéraires techniques potentiellement innovants : nouveaux acquis opérationnels. In:(Eds.), *Systèmes de culture innovants et durables : Quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer?* Educagri, Dijon, pp 130-147.
- Martre, P., Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Zyskowski, R.F., Porter, J.R., Triboi, E., 2006. Modelling protein content and composition in relation to crop nitrogen dynamics for wheat. *European Journal of Agronomy* 25, 138-154.
- Martre, P., Porter, J.R., Jamieson, P.D., Triboi, E., 2003. Modeling Grain Nitrogen Accumulation and Protein Composition to Understand the Sink/Source Regulations of Nitrogen Remobilization for Wheat. *Plant Physiology* 133, 1959-1967.
- Makowski, D., Hillier, D., Wallach, D., Andrieu, B., and Jeuffroy, M.-H., 2006. Parameter estimation for crop models In Wallach,D.; Makowski,D.; Jones,J.W. (Eds) *Working with dynamic crop models*. Elsevier, Amsterdam, pp 101-149.
- Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Irmak, A., Shinde, D., Hoogenboom, G., 2001. Developing genetic coefficients for crop simulation models with data from crop performance trials. *Crop Science* 41, 40-51.
- Mavromatis, T., Boote, K.J., Jones, J.W., Wilkerson, G.G., Hoogenboom, G., 2002. Repeatability of model genetic coefficients derived from soybean performance trials across different states. *Crop Science* 42, 76-89.
- McCown, R.L., 2002. Changing systems for supporting farmers' decisions: problems, paradigms, and prospects. *Agricultural Systems* 74, 179-220.
- Meinke, H., Hammer, G.L., van Keulen, H., Rabbinge, R., 1998. Improving wheat simulation capabilities in Australia from a cropping systems perspective III. The integrated wheat model (I_WHEAT). *European Journal of Agronomy* 8, 101-116.
- Merot, A., Bergez, J.E., 2010. IRRIGATE: A dynamic integrated model combining a knowledge-based model and mechanistic biophysical models for border irrigation management. *Environmental Modelling & Software* 25, 421-432.
- Meynard, J.M. and Sébillotte, M., 1994. L'élaboration du rendement du blé, base pour l'étude des autres céréales à talles. In: Combe, L. and Picard, D. (Eds.), *Elaboration du rendement des principales cultures annuelles*. INRA, Paris, pp 31-51.
- Meynard, J., 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, 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.
- Meynard, J., Savini, I., 2003. La désintensification : point de vue de l'agronome. In: Barrès, D. (Eds.), *Désintensification de l'agriculture. Questions et débats*. Paris, pp 23-33.
- Milleville, P., 1987. Recherches sur les pratiques des agriculteurs. *Les cahiers de la Recherche Développement* 16, 3-7.
- Morardet, S., Mailhol, J.C., Vidal, A., Garin, P., Gleyzes, G., 1998. Sécheresse et demande en eau d'irrigation : éléments de réflexion. *Ingénieries* 13, 15-28.
- Olesen, J.E., Jorgensen, L.N., Mortensen, J.V., 2000a. Irrigation strategy, nitrogen application and fungicide control in winter wheat on a sandy soil. II. Radiation interception and conversion. *Journal of agricultural Science, London* 134, 13-23.

- Olesen, J.E., Mortensen, J.V., Jorgensen, L.N., Andersen, M.N., 2000b. Irrigation strategy, nitrogen application and fungicide control in winter wheat on a sandy soil. I. Yield, yield components and nitrogen uptake. *Journal of agricultural Science, London* 134, 1-11.
- Ottman, M.J., Doerge, T.A., Martin, E.C., 2000. Durum grain quality as affected by nitrogen fertilization near anthesis and irrigation during grain fill. *Agronomy Journal* 92, 1035-1041.
- Pala, M., Stockle, C.O., Harris, H.C., 1996. Simulation of durum wheat (*Triticum turgidum* ssp *Durum*) growth under different water and nitrogen regimes in a Mediterranean environment using CropSyst. *Agricultural Systems* 51, 147-163.
- Pan, J., Zhu, Y., Cao, W., Dai, T., Jiang, D., 1996. Predicting the protein content of grain in winter wheat with meteorological and genotypic factors. *Plant Production Sciences* 9, 323-333.
- Papy, F., 1998. Savoir pratique sur les systèmes techniques et aide à la décision In Biarnès, A. (Eds) *La conduite du champ cultivé : points de vue d'agronomes. Colloques et Séminaires ORSTOM, Paris*, pp. 245-259.
- Passioura, J.B., 1996. Simulation models: Science; snake oil, education, or engineering? *Agronomy Journal* 88, 690-694.
- Pecetti, L., Hollington, P.A., 1997. Application of the CERES-Wheat simulation model to durum wheat in two diverse mediterranean environments. *European Journal of Agronomy* 6, 125-139.
- Porter, J.R., Jamieson, P.D., Wilson, D.R., 1993. Comparison of the wheat simulation models, -wheat and for non-limiting conditions of crop growth. *Field Crops Research* 33, 131-157.
- Rao, A.C.S., Smith, J.L., Jandhyala, V.K., Papendick, R.I., Parr, J.F., 1993. Cultivar and climatic effects on the protein-content of soft white winter-wheat. *Agronomy Journal* 85, 1023-1028.
- Raynal, H., Quesnel, G., 2011. Les principes de construction et de fonctionnement de la plateforme RECORD. *Journée RECORD pour la modélisation systémique* 28 janvier 2011.
- Rharrabti, Y., Villegas, D., Royo, C., Martos-Nunez, V., del Moral, L.F.G., 2003. Durum wheat quality in Mediterranean environments II. Influence of climatic variables and relationships between quality parameters. *Field Crops Research* 80, 133-140.
- Richter, G.M., Acutis, M., Trevisiol, P., Latiri, K., Confalonieri, R., 2010. Sensitivity analysis for a complex crop model applied to durum wheat in the Mediterranean. *European Journal of Agronomy* 32, 127-136.
- Ritchie, J., Singh, U., Godwin, D., Bowen, W., 1998. Cereal growth, development and yield. In Tsuji, G.Y., Hoogenboom, G., Thornton, P.K. (Eds), *Understanding options for agricultural production*. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, 79-98.
- Robinson, F.E., Cudney, D.W., Lehman, W.F., 1979. Nitrate Fertilizer Timing, Irrigation, Protein, and Yellow Berry in Durum-Wheat. *Agronomy Journal* 71, 304-308.
- Rossing, W.A.H., Meynard, J.M., van Ittersum, M.K., 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.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: implications for using multi-criteria decision-aid methods. A review. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 163-174.
- Saint Pierre, C., Peterson, C.J., Ross, A.S., Ohm, J.B., Verhoeven, M.C., Larson, M., Hofer, B., 2008. Winter wheat genotypes under different levels of nitrogen and water stress: Changes in grain protein composition. *Journal of Cereal Science* 47, 407-416.
- Samson, M.-F. and Desclaux, D., 2006. Amélioration de la valeur technologique et commerciale du blé dur : vers une réduction des taux de moucheture et de mitadin. *Colloque régional* 21 juin 2006, Montpellier, 4 pages.
- Seber, G.A.F., Wild, C.J., 1989, *nonlinear regression*, John Wiley and Sons, New-York. 768 pages.
- Sébillotte, M., 1978. Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique. *Comptes Rendus de l'Académie d'Agriculture de France* 11, 906-913.
- Sébillotte, M., Soler, L.-G., 1988. Le concept de modèle général et la compréhension du comportement de l'agriculteur. *Compte-rendu de l'Académie d'Agriculture de France* 74, 59-70.
- Sébillotte, M., 1990. Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In: Combe, L. and Picard, D. (Eds.), *Les systèmes de culture*. Paris, France, pp 165-196.

- Semenov, M.A., Jamieson, P.D., Martre, P., 2007. Deconvoluting nitrogen use efficiency in wheat: A simulation study. *European Journal of Agronomy* 26, 283-294.
- Semenov, M.A., Martre, P., Jamieson, P.D., 2009. Quantifying effects of simple wheat traits on yield in water-limited environments using a modelling approach. *Agricultural and Forest Meteorology* 149, 1095-1104.
- Shibu, M.E., Leffelaar, P.A., van Keulen, H., Aggarwal, P.K., 2010. LINTUL3, a simulation model for nitrogen-limited situations: Application to rice. *European Journal of Agronomy* 32, 255-271.
- Sokal, R., Rohlf, J. 1981, *Biometry : the principles and practices of statistics in biological research* . Freeman W.H. ,San Francisco, 859 pages.
- Sombrero, A., Monneveux, P., 1989. Yellowberry in durum wheat (*Triticum durum* Desf): the effect of nitrogen and water supply and cultivar. *Agricultura Mediterranea* 119, 349-360.
- Stöckle, C.O., Donatelli, M., Nelson, R., 2003. CropSyst, a cropping systems simulation model. *European Journal of Agronomy* 18, 289-307.
- Troccoli, A., Borrelli, G.M., De Vita, P., Fares, C., Di Fonzo, N., 2000. Mini Review: Durum Wheat Quality: A Multidisciplinary Concept. *Journal of Cereal Science* 32, 99-113.
- Varella, H., Guérif, M., Buis, S., Beaudoin, N. 2010. Soil properties estimation by inversion of a crop model and observations on crop improves the prediction of agro-environmental variables. *European Journal of Agronomy* 33, 139-147.
- van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckeley, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., Bezlepkina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A.E., van der Wal, T., Wien, J.E., Wolf, J., 2008. Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agricultural Systems* 96, 150-165.
- van Oijen, M., Rougier, J., Smith, R., 2005. Bayesian calibration of process-based forest models: bridging the gap between models and data. *Tree Physiology* 25, 915-927.
- Vayssieres, J., Lecomte, P., Guerrin, F., Nidumolu, U.B., 2007. Modelling farmers' action: decision rules capture methodology and formalisation structure: a case of biomass flow operations in dairy farms of a tropical island. *Animal* 1, 716-733.
- Wallach, D., Goffinet, B., Bergez, J.E., Debaeke, P., Leenhardt, D., Aubertot, J.N., 2001. Parameter estimation for crop models: a new approach and application to a corn model. *Agronomy Journal* 93,757-766.
- Wallach, D., 2006a. The two forms of crop models. In: Wallach, D., Makowski, D., and Jones, J.W. (Eds.), *Working with dynamic crop models*. Elsevier, Amsterdam, pp 3-10.
- Wallach, D., 2006b. Evaluating crop models. In: Wallach, D., Makowski, D., and Jones, J.W. (Eds.), *Working with dynamic crop models*. Elsevier, Amsterdam, pp 11-53.
- Wallach, D., Buis, S., Lecharpentier, P., Bourges, J., Clastre, P., Launay, M., Bergez, J.E., Guérif, M., Soudais, J., Justes, E., 2011, A package of parameter estimation methods and implementation for the STICS crop-soil model. *Environmental Modelling & Software* 26, 386-394.
- Wang, E., Engel, T., 2002. Simulation of growth, water and nitrogen uptake of a wheat crop using the SPASS model. *Environmental Modelling & Software* 17, 387-402.
- Wang, E., Robertson, M.J., Hammer, G.L., Carberry, P.S., Holzworth, D., Meinke, H., Chapman, S.C., Hargreaves, J.N.G., Huth, N.I., McLean, G., 2002. Development of a generic crop model template in the cropping system model APSIM. *European Journal of Agronomy* 18, 121-140.
- Weir, A.H., Bragg, P.L., Porter, J.R., Rayner, J.H., 1984. A winter-wheat crop simulation-model without water or nutrient limitations. *Journal of agricultural Science* 102, 371-382.
- Weiss, A., Moreno-Sotomayer, A., 2006. Simulating grain mass and nitrogen concentration in wheat. *European Journal of Agronomy* 25, 129-137.
- Welch, S.M., Wilkerson, G., Whiting, K., Sun, N., Vagts, T., Buol, G., Mavromatis, T., 2002. Estimating soybean model genetic coefficients from private-sector variety performance trial data. *Transactions of the ASAE* 45, 1163-1175.
- White, H., 1981. Consequences and Detection of Misspecified Non-Linear Regression-Models. *Journal of the American Statistical Association* 76, 419-433.
- White, J.W., Boote, K.J., Hoogenboom, G., Jones, P.G., 2007. Regression-Based Evaluation of Ecophysiological Models. *Agronomy Journal* 99, 419-427.

- Willmott, C.J., 1981. On the validation of models. *Physical Geography* 2, 184-194.
- Willmott, C.J., Ackleson, S.G., Davis, R.E., Feddema, J.J., Klink, K.M., Legates, D.R., O'Donnell, J.O., Rowe, C.M., 1985. Statistics for the evaluation and comparison of models. *Journal of Geophysical Research-Oceans* 90, 8995-9005.
- Wuest, S.B., Cassman, K.G., 1992. Fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated wheat .1. Uptake efficiency of preplant versus late-season application. *Agronomy Journal* 84, 682-688.
- Xiong, W., Conway, D., Holman, I., Lin, E., 2008. Evaluation of CERES-Wheat simulation of wheat production in China. *Agronomy Journal* 100, 1720-1728.

LISTE DES ABREVIATIONS

Aca : Variété Acalou
Ama : Variété Amarillo
Ammo : Ammonitre
AGB : Above-ground biomass
AGBflo : Above-ground biomass at flowering
AGBpostflo : Above-ground biomass accumulated during post-flowering phase
AGPN : Above-ground plant nitrogen uptake
AGPNflo : Above-ground plant nitrogen uptake at flowering
AGPNpostflo : Above-ground plant nitrogen uptake during post-flowering phase
CGGREF : Conseil Général du Génie Rural des Eaux et Forêts
CP : Central pivot
CRA : Chambre Régionale de l'Agriculture
GN : Grain Number
GNC : Grain N Content
GY : Grain Yield
GNC% : Grain N Concentration
ITK : Itinéraire Technique
LAI : Leaf Area Index
LM : Lateral Move
Loy : Variété Lloyd
Mon : Variété Montsegur
N: Nitrogen
Nliq : Solution azotée
NPK : Engrais ternaire Azote/Phosphore/Potassium
Nef : Variété Nefer
Neo : Variété Neodur
Se : Spreader fertilizer
Sy : Sprayer fertilizer
SYMU : Site Year Management Unit (cf USM)
TG : Travelling gun
USM : Unité de simulation STICS : 1 sol*1 climat*1 fichier plante*1 ITK

LISTE DES FIGURES

Introduction et problématique

Figure 1 : Répartitions régionales des productions de blé dur et surfaces cultivées en France (<i>source : FranceAgriMer, 2010</i>).....	6
Figure 2 : Illustration des différentes étapes de la stratégie de recherche.....	23

Chapitre 1

Figure 3 : Représentation simplifiée des éléments constituant le chapitre 1	33
Figure 4 : Design and use of the software. Rectangles represent the different subpackages and ellipses the different files. Output files of the software are not detailed here for the sake of simplicity. Plain arrows represent dependences between subpackages and dashed arrows read or write operations on files	40
Figure 5 : Parameter estimation process implemented in the software.....	44
Figure 6 : Examples of plots for the simplex minimization. Left: parameter value versus iteration number. Right: final parameter value versus starting value. The name of the parameter (efcroiveg in this example) is given in the axes labels. Symbols in the right plot correspond to the index of the repetition of the minimization for different starting values.	45

Chapitre 2

Figure 7 : Représentation simplifiée des éléments constituant le chapitre 2	50
Figure 8 : Frequency distribution for measurements of grain yield (top) and grain N concentration (bottom) on 'OptimDB' (left) and 'EvalDB' (right). n represents the number of measurements. μ represents the mean, M represents the median and s represents the sample standard deviation.....	54
Figure 9: Simulated versus measured grain yield for 'OptimDB' (left) and 'EvalDB' (right) with the different procedures and initial parameters. From top to bottom: initial parameters (a, e), I12 (b, f), I3 (c, g), F2 (d, h) procedures.....	61
Figure 10: Decomposed MSE of grain yield as a function of procedures (x-abciss) for (a) 'OptimDB' and (b) 'EvalDB'. Black bars represent Bias ² , dotted bars represent SDSD and grey bars represent LCS.....	61
Figure 11: Simulated versus measured grain N concentration for 'OptimDB' (left) and 'EvalDB' (right) with the different procedures and initial parameters. From top to bottom: initial parameters (a, e), I12s (b, f), I3s (c, g) and F2s (d, h) procedures.....	62
Figure 12: Decomposed MSE of grain N concentration as a function of procedure (x-abciss) for (a) 'OptimDB' and (b) 'EvalDB'. Black bars represent Bias ² , dotted bars represent SDSD and grey bars represent LCS.	63
Figure 13: MSE evolution of NBGRAIN (left) and AGB (right) during 12 steps of I12. Numbers refers to optimisation step defined in Table 6. Points indicates that the response variable was the target variable for this step.	65
Figure 14: Measured and simulated grain yield (left) and grain N concentration (right) as a function of N applied in kg/ha (x-abciss) for the Lloyd cultivar. Symbols are \blacksquare for measured values, \blacklozenge for Initial values, \square for I12, \blacktriangle for I3 and \bullet for F2 procedures. Vertical bars represent sample standard deviation of measurements. Letters indicate significant difference at $p < 0.05$ using ANOVA followed by Tukey's test.	68
Figure 15: Measured and simulated grain yields (left) and grain N concentration (right) as function of N applications in four split doses for the Lloyd cultivar. Numbers of the x-abciss labels separated by slash bar represent N applied (kgN/ha) at tillering/ 1cm ear stage/flag leaf emergence/flowering. Total N applied was 220 kgN/ha. Symbols are \square for measured value, \blacksquare for initial value, \blacksquare for I12 values, \blacksquare for I3 values and \blacklozenge for F2 values. Vertical bars represent sample standard deviation of measurement. Letters indicate significant difference at $p < 0.05$ using ANOVA followed by Tukey's test.	69

Chapitre 3

Figure 16 : Représentation simplifiée des éléments constituant le chapitre 3	75
Figure 17 : Modifications, inspired from AZODYN, introduced into the original STICS version. Rectangular box stands for state variable and round box stands for parameter	80
Figure 18 : Simulated GY (t/ha) with STICS on 'OptimDB'.....	85
Figure 19 : Simulated GNC (kgN/ha) with STICS (a) and STICS-azo (b) versus measured GNC (kgN/ha) on 'OptimDB'.....	85

Figure 20 : Simulated <i>GNC%</i> (%) with STICS (a) and STICS-azo (b) versus measured <i>GNC%</i> (%) on the ‘OptimDB’.	85
Figure 21 : Simulated <i>GY</i> (t/ha) with STICS on the ‘EvalDB’.	87
Figure 22 : Simulated <i>GNC</i> (kgN/ha) with STICS (a) and STICS-azo (b) versus measured <i>GNC</i> (kgN/ha) on the ‘EvalDB’.	87
Figure 23 : Simulated <i>GNC%</i> (%) with STICS (a) and STICS-azo (b) versus measured <i>GNC</i> (kgN/ha) on the ‘EvalDB’.	87
Figure 24 : Simulated vs measured <i>GY</i> (t/ha) for ‘NrateDB’ as function of N rate (kgN/ha) (a) and simulated and measured <i>GY</i> responses to change in Nrate for Lloyd (b).	88
Figure 25 : Simulated vs measured <i>GNC</i> (kgN/ha) for ‘NrateDB’ with STICS(a) and and STICS-azo (b). Simulated and measured <i>GNC</i> response to change in Nrate for Lloyd with STICS (c) and STICS-azo (d).	89
Figure 26 : Simulated vs measured <i>GNC%</i> (%) for ‘NrateDB’ with STICS(a) and and STICS-azo (b). Simulated and measured <i>GNC%</i> (%) response to change in Nrate for Lloyd with STICS (c) and STICS-azo (d).	89
Figure 27 : Measured and simulated <i>GY</i> (t/ha) for four N splits and four cultivars of the ‘NsplitDB’. Light grey bars represent measured values, dark bars represent simulated values with STICS and dark grey bars represent simulated value with STICS-azo. x label signification are founded in Table 13. The same legend is applied for Figure 26 and 27.	90
Figure 28 : Measured and simulated <i>GNC</i> (kgN/ha) for four N splits and four cultivars. The legend is the same as Figure 27.	91
Figure 29 : Measured and simulated <i>GNC%</i> (%) for four N splits and four cultivars. The legend is the same as Figure 27.	91
Figure 30 : Residuals of <i>AGPNflo</i> (a) and <i>AGPNpostflo</i> (b) as function of measured values. Black symbols refer to Lloyd cultivar, green symbols refer to Neodur cultivar. Square represents E treatment, circles represent E/DFL treatment, triangles represent E/DFL/FLO treatment.	92
Figure 31 : The different variables involved in <i>AGPNpostflo</i> simulation and the hypothesis build to find origin of model error.	93

Chapitre 4

Figure 32 : Représentation simplifiée des éléments constituant le chapitre 4.	101
Figure 33 : A simplified representation of the ‘model of action’ proposed by Sébillotte and Soler (1988).	104
Figure 34 : French durum wheat production regions and climatic characteristics. Climatic data are averaged climatic data over the period 1998-2008 from the Arvalis Institut du Végétal climatic stations.	105
Figure 35 : Decisional sequences for N fertilization and irrigation.	113
Figure 36 : Tactical decision-making process for fertilization (F4) and irrigation (I4) triggering.	118

Chapitre 5

Figure 37 : Présentation de la démarche globale de conception et d'évaluation des stratégies.	126
Figure 38 : Caractéristiques climatiques moyenne d'Auzeville pour la période 1998-2008.	128
Figure 39 : Calendrier pluriannuel des opérations techniques pour les différentes stratégies. amf= jour où l'accélération de la croissance foliaire devient maximale (~epi 1 cm), lax= jour où le LAI est maximal, flo=jour de la floraison, mat= jour de la maturité à 40% d'humidité, rec= jour de la récolte. Exemple de lecture : « Lors de la campagne 2003, La stratégie ‘non irriguée’ implique trois opérations de fertilisation le 15 janvier, 27 février et le 22 avril. La stratégie ‘40mm’ implique les trois mêmes dates d'intervention pour la fertilisation ainsi qu'une irrigation de 40 mm le 29 avril. La stratégie ‘80mm’ implique le même calendrier que le stratégie ‘40 mm’ avec une irrigation supplémentaire de 40 mm le 2 juin. La stratégie de valorisation implique une irrigation le 29 avril.	132
Figure 40 : Performances des différentes stratégies testées pour les campagnes 1998, 2002, 2003, 2005, 2006 et 2008.	133

Conclusions, discussion et perspectives

Figure 41 : Recommandations pour l'acquisition de données en vue de l'utilisation pour la modélisation. N ...	145
---	-----

LISTE DES TABLEAUX

Introduction et problématique

Tableau 1 : Synthèse de l'analyse bibliographique pour les processus concernant la phase végétative.....	26
Tableau 2 : Synthèse de l'analyse bibliographique pour les processus concernant la phase de reproduction	27
Tableau 3 : Synthèse de l'analyse bibliographique pour la prise en compte des stress hydriques et azotés.....	27

Chapitre 2

Table 4 : Description of 'OptimDB'. SYMU = Site Year Management Unit, Nsoil = measurement of soil mineral N content of a 30-cm deep soil horizon, SM = Soil Moisture of a 30-cm deep soil horizon, <i>AGPN</i> = Above-Ground Plant N, <i>LAI</i> = Leaf Area Index, <i>AGB</i> = Above Ground Biomass, GN = Grain Number, <i>GY</i> = Grain Yield, <i>GNC%</i> = Grain N Concentration, Cultivars : Aca=Acalou, Ama=Amarillo, Llo=Lloyd, Nef=Nefer, Neo=Neodur, Mon=Montsegur	55
Table 5 : Description of 'EvalDB'. SYMU = Site Year Management Unit, GN = Grain Number, <i>GY</i> = Grain Yield, <i>GNC</i> = Grain N concentration, Cultivars : Aca=Acalou, Ama=Amarillo, Llo=Lloyd, Nef=Nefer, Neo=Neodur, Mon=Montsegur.....	55
Table 6 : Description of the three optimisation procedures: Procedure names, number of steps, process studied, parameters estimated (STICS names), target variables and SYMU characteristics. Italic lines indicate that <i>LAI</i> is input variable. Bold type indicates genetic parameter.....	57
Table 7 : Initial MSE values of dynamic variables used as target variables and absolute variation after calibration. Negative values indicate a reduction in the initial value after calibration, while positive values indicate an increase. MSE component contributions and variation after calibration are presented	64
Table 8 : RRMSE and EF of variables that can be used as indicators for management	66
Table 9: Process, estimated parameters and parameter values at initial situation (Initial) and after calibration with I12, I3 and F2 procedures. Bold characters refer to genetic parameters. Numbers in bracket for genetic parameters indicate cultivar ranking starting from the lowest value.....	67
Table 10 : Calculated MSEN values and associated RMSEN and RRSEN for grain yield response and grain N concentration.....	68

Chapitre 3

Table 11 : Description of 'OptimDB'. SYMU = Site Year Management Unit, Nsoil = measurement of soil mineral N content of a 30-cm deep soil horizon, SM = Soil Moisture of a 30-cm deep soil horizon, <i>AGPN</i> = Above-Ground Plant N, <i>LAI</i> = Leaf Area Index, <i>AGB</i> = Above Ground Biomass, GN = Grain Number, <i>GY</i> = Grain Yield, <i>GNC%</i> = Grain N concentration, Cultivars : Aca=Acalou, Ama=Amarillo, Llo=Lloyd, Nef=Nefer, Neo=Neodur, Mon=Montsegur	81
Table 12 : Description of 'EvalDB'. SYMU = Site Year Management Unit, GN = Grain Number, <i>GY</i> = Grain Yield, <i>GNC%</i> = Grain N concentration, Cultivars : Aca=Acalou, Ama=Amarillo, Llo=Lloyd, Nef=Nefer, Neo=Neodur, Mon=Montsegur.....	82
Table 13 : Description of experimental treatments used as source for model response to effect of N splits : NsplitDB	83
Table 14 : Estimated parameters values and signification.....	84
Table 15 : Values of simulated states variables influencing crop N uptake during post-flowering phase	93

Chapitre 4

Table 16: Regional sampling criteria.....	106
Table 17 : Durum wheat destination and fertilization practices and equipment. (Sy =Sprayer fertilizer , Se = spreader fertilizer, NPK = ternary fertilizer with Nitrogen/Phoporus/Potassium, Nliq = liquid fertilizer) 109	109
Table 18 : Irrigation resource equipment and strategy. (C=Collective water resource, I = individual water resource and p/l/r subscripts = pumping/lack/river. TG=Travelling Gun, LM=Lateral Move, CP=Central Pivot).....	110
Table 19 : Details of the three strategic decisional sequences identified for fertilization decision-making process	115
Table 20 Details of the three strategic decisional sequences identified for irrigation decision-making process .	117
Table 21 : Details of the operating decisional sequences identified for irrigation decision-making process	120

Chapitre 5

Tableau 22 : Performances agronomiques, techniques et environnementales des différentes stratégies simulées	134
---	-----

ANNEXES

ANNEXE I : Présentation des formalismes mobilisés dans les différents modèles de culture adaptés au blé tendre

La modélisation du développement

A l'exception d'AZODYN pour lequel les dates d'apparition des stades floraison et maturité sont des variables d'entrée du modèle, tous les modèles simulent l'évolution du développement. STICS et CERES-Wheat mobilisent une échelle de temps basée sur une somme de degrés-jour qui augmente linéairement en fonction des températures comprises entre un minimum et un maximum (Figure I.1). CERES-Wheat utilise la température de l'air comme pilote du développement et STICS utilise la température au niveau du couvert. Ils prennent en compte les besoins en photopériode et en vernalisation non satisfaits au travers de facteurs qui agissent comme un frein à l'accumulation de degrés-jour. STICS mobilise deux échelles indépendantes : une échelle de stades végétatifs et une échelle de stades reproductifs. Il offre en outre la possibilité d'utiliser les stades de développement observé comme variable d'entrée. Les différences entre les trois modèles résident dans le nombre et la nature des stades qui sont modélisés et dans la détermination de la température qui est prise en compte pour calculer les unités de développement.

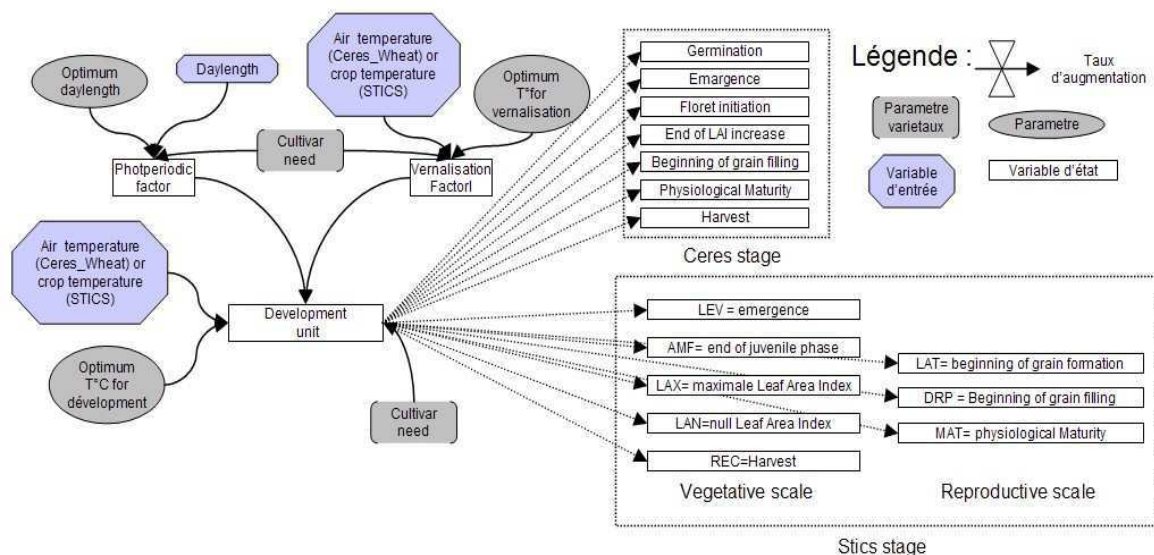


Figure I.1 : Représentation simplifiée des modules développement de CERES-Wheat et de STICS

SiriusQuality1 adopte une autre approche puisqu'il est considéré que la durée des phases de développement est dépendante du rythme d'apparition des feuilles et de la valeur du phyllotherme (somme de température séparant l'apparition de deux feuilles successives) (Figure I.2). La photopériode et les besoins en vernalisation agissent sur le nombre de feuilles émises. De plus SiriusQuality1 utilise la température au niveau de l'apex pour piloter le rythme d'apparition des feuilles.

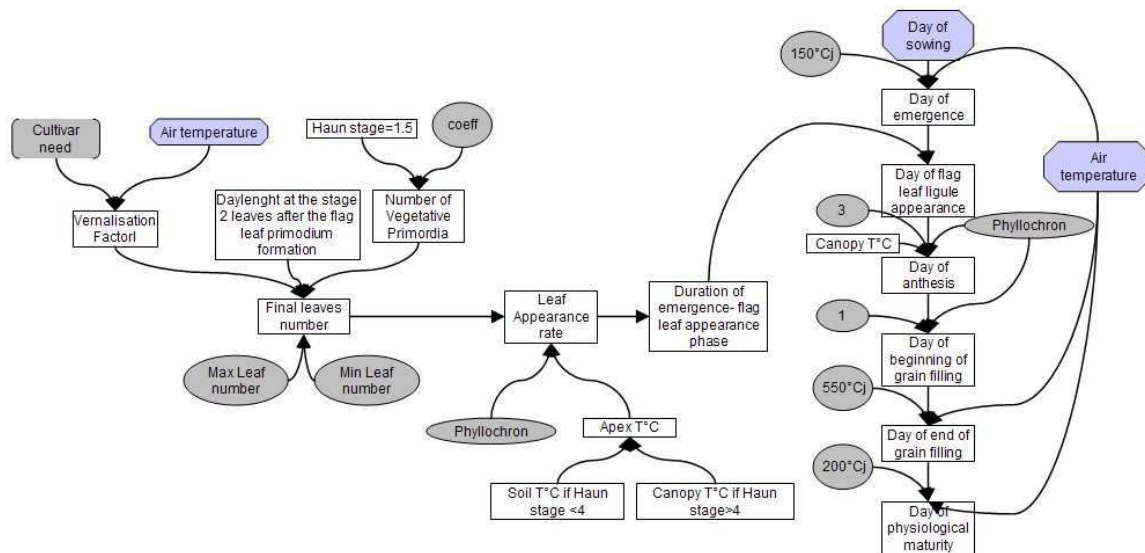


Figure I.2 : Représentation simplifiée du module développement de SiriusQuality1

La modélisation de la croissance foliaire

La surface photoréceptrice est caractérisée par la surface foliaire estimée au travers du Leaf Area Index (*LAI*). Dans SiriusQuality1, l'évolution du *LAI* est divisée en quatre phases délimitées par des valeurs seuils de *LAI* ou par la fin de la période de remplissage des grains (Figure I.). Lors des deux premières phases, le *LAI* évolue en fonction du temps thermique d'après une relation exponentielle (phase I) puis linéaire (phase II) jusqu'à une valeur maximale (début phase III) qu'il conserve jusqu'à la floraison. Le *LAI* décline progressivement de manière quadratique pendant la période de remplissage des grains.

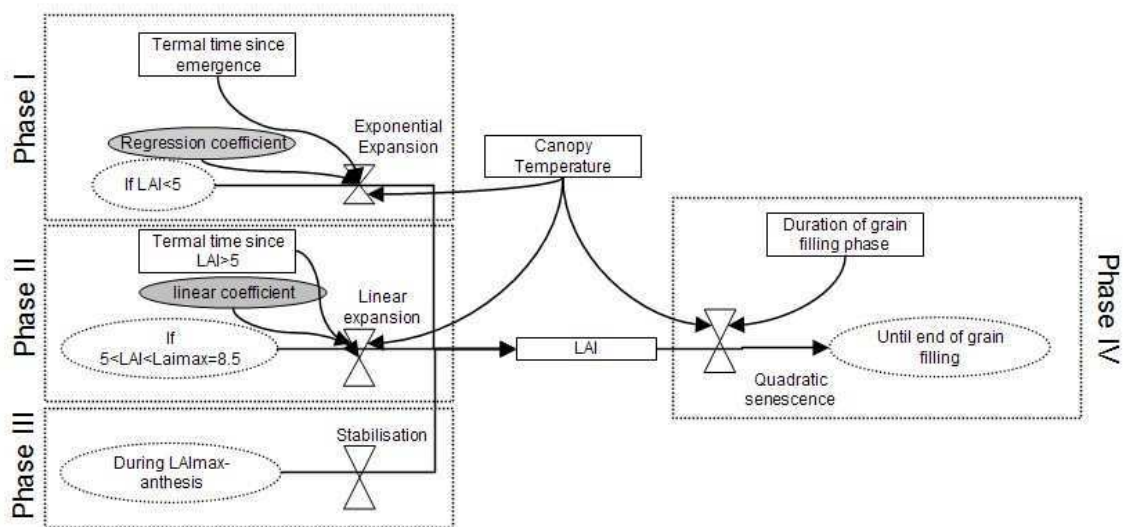


Figure I.3 : Représentation simplifiée de l'élaboration de la surface foliaire dans SiriusQuality1

Dans le modèle AZODYN, le *LAI* du jour *j* est déduit de la biomasse présente au jour *j* en considérant un rapport constant entre la surface foliaire et la biomasse aérienne pour des valeurs de *LAI* inférieures ou égales à 4 (Figure I.4). La biomasse produite le jour *j* est donc fonction du *LAI* du jour qui précède. Ensuite l'efficacité d'interception lumineuse est considérée constante jusqu'à la floraison. La sénescence journalière est ensuite estimée par le statut azoté de la culture.

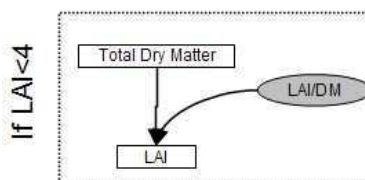


Figure I.4 : Représentation simplifiée de l'élaboration de la surface foliaire dans AZODYN

L'évolution du *LAI* dans le modèle CERES-Wheat est fonction du stade de développement. Lors d'une première phase (jusqu'à la fin de la croissance foliaire), le *LAI* est égal à la différence entre la surface de feuilles produite et la surface perdue (Figure I.5). La surface produite est fonction de la vitesse de croissance des feuilles de la tige principale et du nombre de talles. La surface perdue dépend du nombre de feuilles sur la tige principale, en faisant l'hypothèse que chaque tige ne conserve pas plus de quatre feuilles, et que la surface cumulée au moment où chaque feuille de la tige principale a atteint sa surface maximale. Pendant une seconde phase, la surface des feuilles n'augmente plus et diminue avec un taux proportionnel au temps thermique journalier.

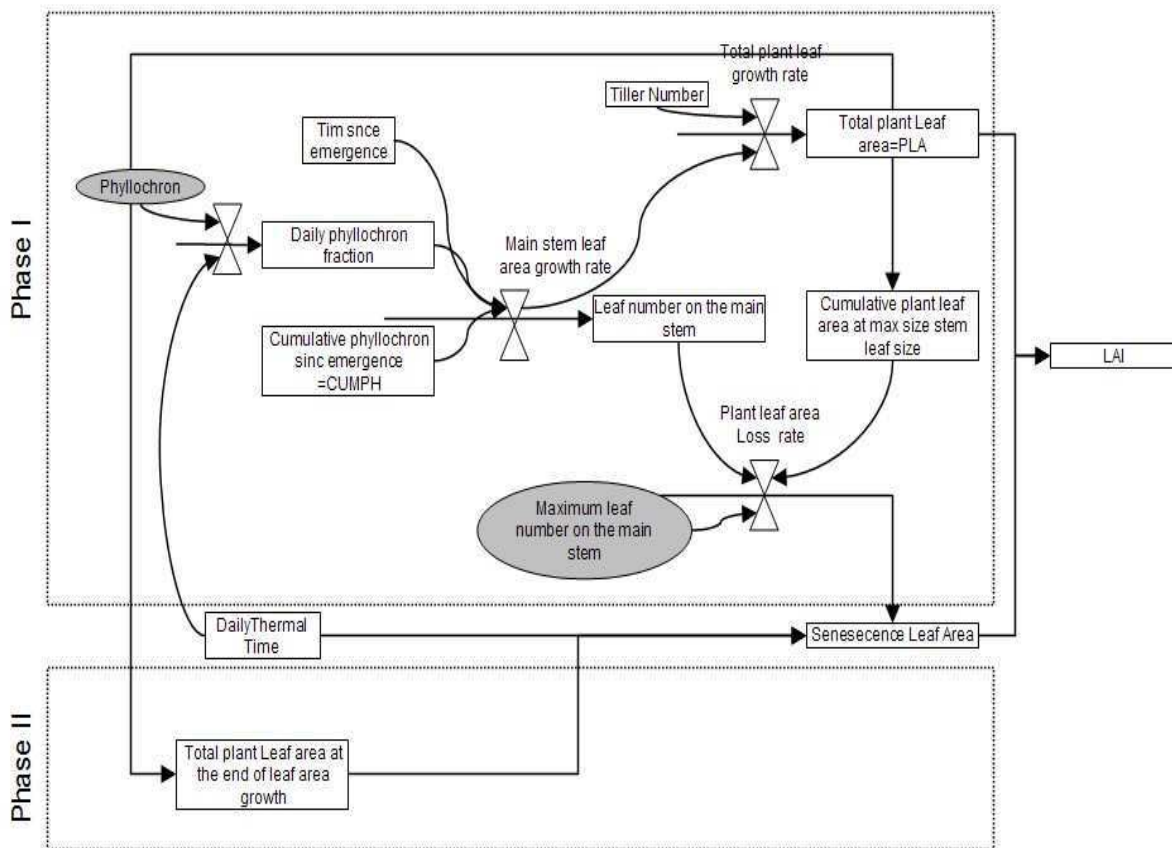


Figure I.5 : Représentation simplifiée de l'élaboration de la surface foliaire dans CERES-Wheat

Deux approches peuvent être mobilisées pour simuler l'élaboration du *LAI* dans STICS qui diffèrent par la façon dont est calculée la phase de sénescence (Figure I.6). La première option calcule la perte de *LAI* à partir d'un stade fixé par une somme de degrés-jour. Elle est fonction du stade de développement atteint par la plante. La seconde option fait intervenir la notion de durée de vie des feuilles. Elle calcule le début de la sénescence lorsque la somme de température est supérieure à la durée de vie d'une feuille. La durée de vie des feuilles est modulée par le niveau de satisfaction des besoins en eau et en azote.

Quelle que soit l'option choisie, la croissance en *LAI* fait intervenir la notion d'unité de développement du *LAI*, fonction de la température de culture et de la densité de plantes par m^2 .

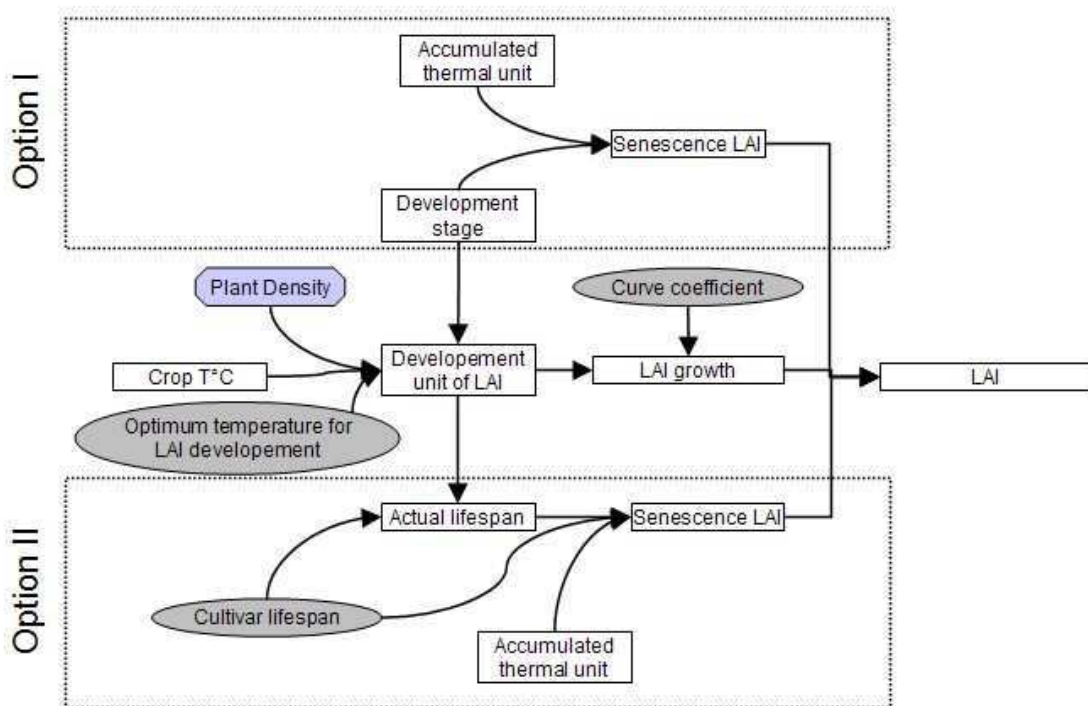


Figure I.6 : Représentation simplifiée de l'élaboration de la surface foliaire dans STICS

La modélisation de la croissance en biomasse

Dans les quatre modèles, la culture est assimilée à un capteur d'énergie lumineuse, caractérisée par sa surface réceptrice et sa capacité à transformer cette énergie lumineuse. La production de biomasse aérienne est décrite comme une fonction linéaire du rayonnement intercepté et suit la loi de Montheith définie comme le produit entre l'absorption de lumière incidente et l'efficience photosynthétique du couvert végétal (Jamieson *et al.*, 1998; Jeuffroy and Recous, 1999; Brisson *et al.*, 2003). Pendant la phase de croissance en biomasse, CERES-Wheat répartit la biomasse produite aux différents organes de la plante (tiges, feuilles, racines) en fonction de coefficients de répartition qui évoluent au cours du cycle (Figure I.7). AZODYN affecte un coefficient de 1.25 à la biomasse aérienne créé chaque jour pour tenir compte de la biomasse racinaire. STICS considère une biomasse aérienne totale. La version initiale de SiriusQuality1 (Jamieson *et al.*, 1998a) considérait une biomasse arienne totale, à l'instar de STICS. La version modifiée en 2000 (Jamieson and Semenov, 2000) répartit la biomasse aux organes tiges, feuilles et grains. Avant la floraison, la priorité est donnée à la biomasse des feuilles. Après la floraison, la biomasse des tiges cesse d'augmenter et les grains deviennent prioritaires.

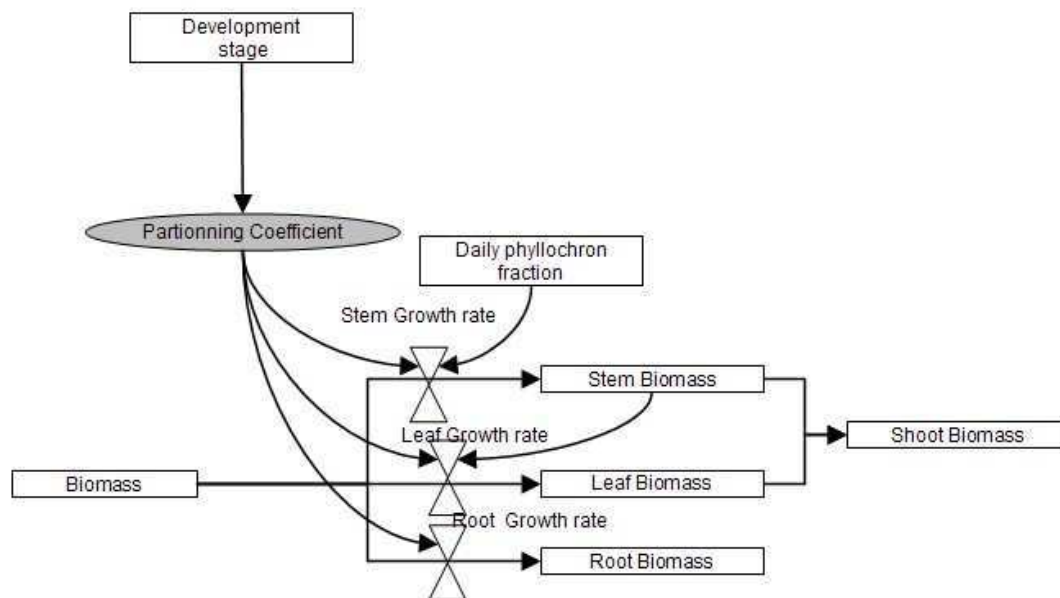


Figure I.7 : Répartition de la biomasse dans les organes de la plante d'après CERES-Wheat

L'élaboration du rendement

Deux approches sont mobilisées pour accumuler de la biomasse dans les grains. L'élaboration du rendement se construit soit à partir d'une confrontation journalière entre l'offre en carbone et la demande en carbone créés par les composantes de rendement ou bien à partir d'un indice de récolte qui transfère une fraction de la biomasse aérienne vers les grains quotidiennement. Pour l'ensemble des modèles, le rendement se construit pendant une phase de remplissage des grains délimitée par la floraison ou le stade début du remplissage des grains et par la maturité physiologique.

CERES, AZODYN et SiriusQuality1 adoptent la première approche. Pour CERES-Wheat, l'accumulation de biomasse dans les grains est le résultat de l'accumulation journalière de biomasse issue de la translocation des réserves et de la photosynthèse pendant la phase de remplissage (Figure I.8). La demande journalière des grains qui est définie par le nombre de grains et le taux de remplissage potentiel d'un grain, est allouée aux grains si cette demande n'entraîne pas une baisse de la biomasse des tiges en dessous de la biomasse minimale. Dans le cas où la demande des grains est supérieure à ce que peuvent fournir la biomasse des tiges et la photosynthèse, l'accumulation dans les grains correspond à ce qui est produit par photosynthèse moins les besoins vitaux des tiges.

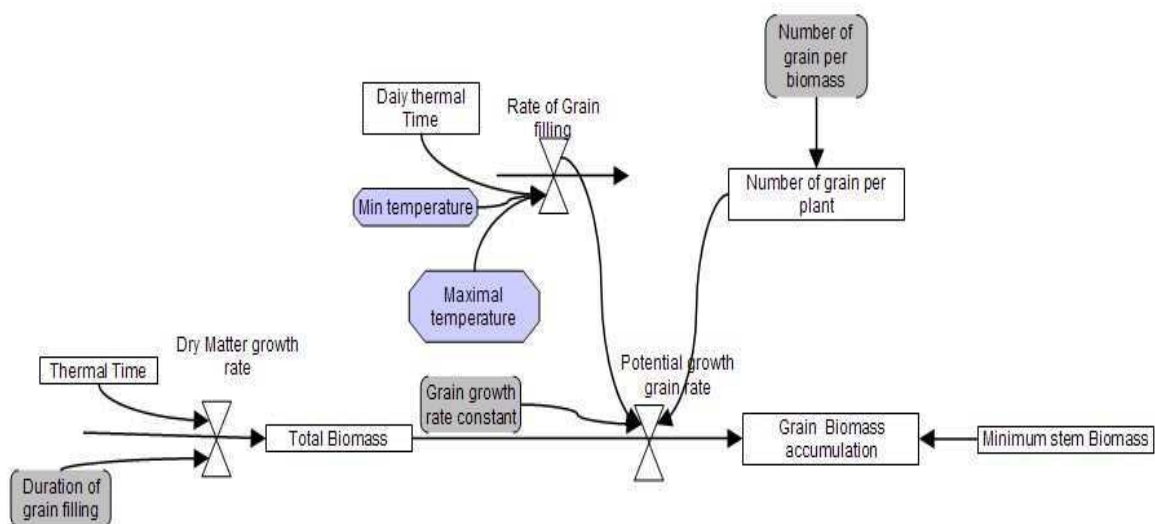


Figure I.8 : Représentation simplifiée de l'élaboration du rendement dans CERES-Wheat

AZODYN, tout comme CERES-Wheat, base l'élaboration du rendement sur le principe de la confrontation entre l'offre et la demande en matière sèche. Une des particularités d'AZODYN réside dans le fait que la biomasse des grains provient de sources différenciées : biomasse accumulée dans les grains sous forme d'acides aminés, assimilats carbonés issus de la photosynthèse après la floraison, et sucres solubles qui constituent les molécules de réserves transitoires stockées dans les tiges (Figure I.9). Le rendement est le produit du nombre de grains multiplié par la matière sèche du grain. La matière sèche potentielle du grain est fonction du poids maximal du grain, du poids du grain à la floraison et de la durée de remplissage. Le nombre de grains est calculé à la floraison en fonction d'un nombre de grains maximal et du niveau de stress azoté subi par la culture pendant la phase végétative, caractérisé par la durée du stress azoté et son intensité (David *et al.*, 2005).

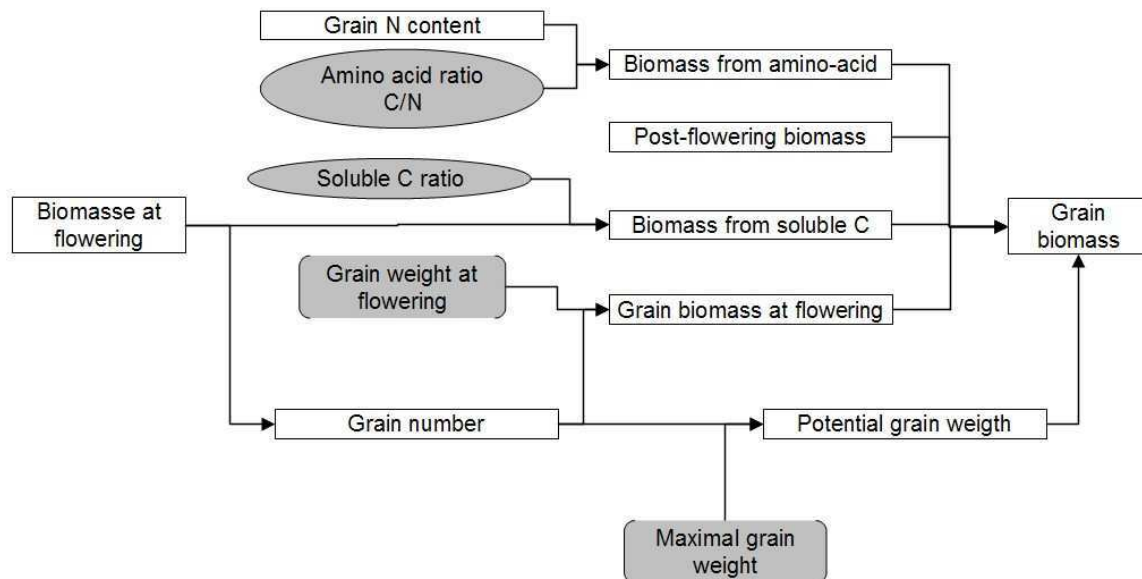


Figure I.9 : Représentation simplifiée de l'élaboration du rendement dans AZODYN

Le rendement dans STICS n'est pas la résultante entre l'offre et la demande. Il est simulé selon l'approche développée par Amir et Sinclair (1991) mobilisant le concept d'indice de récolte augmentant linéairement en fonction du nombre de jour (Figure I.10).

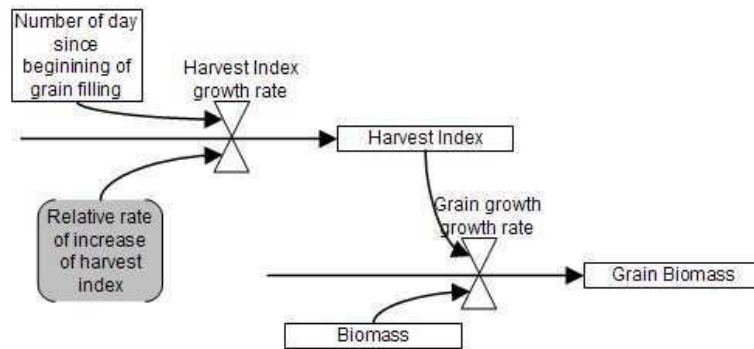


Figure I.10 : Représentation simplifiée de l'élaboration du rendement dans STICS

Dans la dernière version initiale de SIRIUS (Jamieson *et al.*, 1998), la phase de remplissage des grains est composée de deux phases : une phase de division cellulaire (phase I) et une phase de multiplication cellulaire (phase II) (Figure I.11). SiriusQuality1 différencie deux types de composants : les composants structurels et les composants de stockage. Pendant la première phase, seuls les composants structurels sont accumulés et c'est la demande qui pilote l'accumulation de matière sèche. La demande est définie à partir de la quantité de carbone accumulée dans les grains et d'un taux d'accumulation qui augmente avec le temps thermique. L'offre en carbone correspond à la production photosynthétique journalière. Dans la deuxième phase, la demande correspond à la demande moyenne de la première phase affectée par le temps thermique journalier. L'offre en carbone est augmentée par la fourniture provenant des feuilles et des tiges.

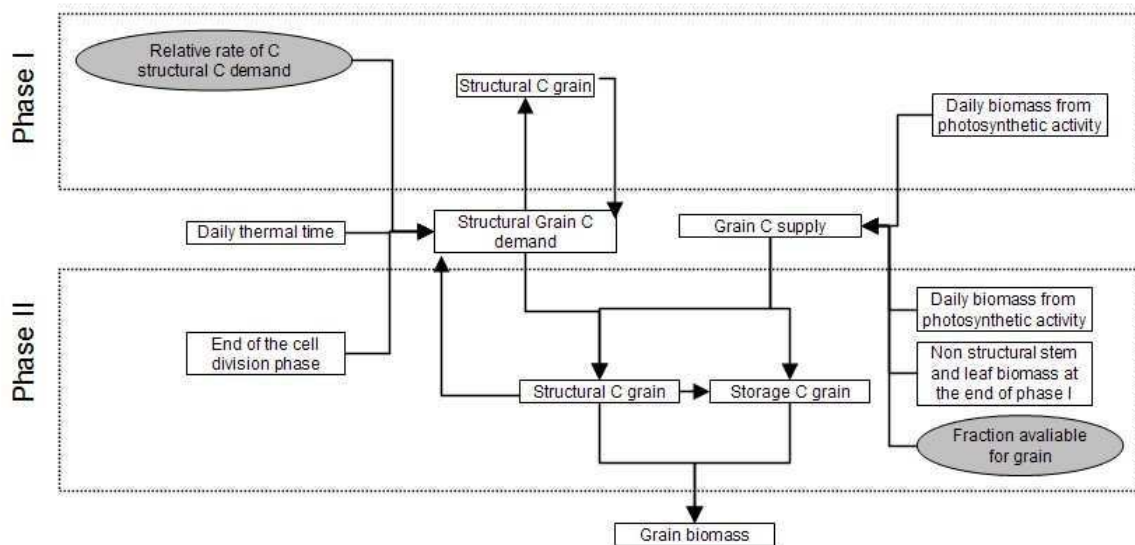


Figure I.11 : Représentation simplifiée de l'élaboration du rendement dans SiriusQuality1

Accumulation de l'azote dans la plante

Les modèles présentés basent tous l'accumulation journalière d'azote dans la plante sur le principe de la confrontation entre l'offre en azote du sol et la demande de la plante.

Les différentes variables et concepts mobilisés dans chacun des modèles sont présentées en tableau I.1

Tableau I.1 : La modélisation de l'offre et de la demande en azote dans les différents modèles étudiés

	<i>AZODYN</i>	<i>STICS</i>	<i>CERES-Wheat</i>	<i>SiriusQuality1</i>
Offre	L'offre provient des apports d'engrais et de la minéralisation de l'humus et des résidus de la culture précédente. Les pertes d'azote minéral par dénitrification et lixiviation des ions nitrate sont prises en compte.			
	Une proportion fixe de l'azote minéral n'est pas disponible pour les racines		La profondeur du front racinaire détermine la quantité d'azote disponible pour la plante	
Demande	La demande est définie de façon globale à partir de la biomasse aérienne et de la teneur en azote maximale définie par la courbe de dilution de l'azote d'après les travaux de Justes <i>et al.</i> (1994)		La demande est définie pour chaque organe à partir des concentrations minimales qui varient en fonction du stade de développement.	

Elaboration de la teneur en protéines des grains

Dans l'ensemble des modèles, la teneur en azote des grains est déduite du rapport entre la quantité d'azote accumulée dans les grains et la biomasse des grains. En multipliant cette teneur par 5.7, on obtient la teneur en protéines assimilables par l'homme.

Pour AZODYN, l'azote accumulé dans les grains provient de deux sources : une fraction provenant de l'absorption post-floraison et une fraction provenant de la remobilisation de l'azote accumulée dans la plante au moment de la floraison (Figure I.12).

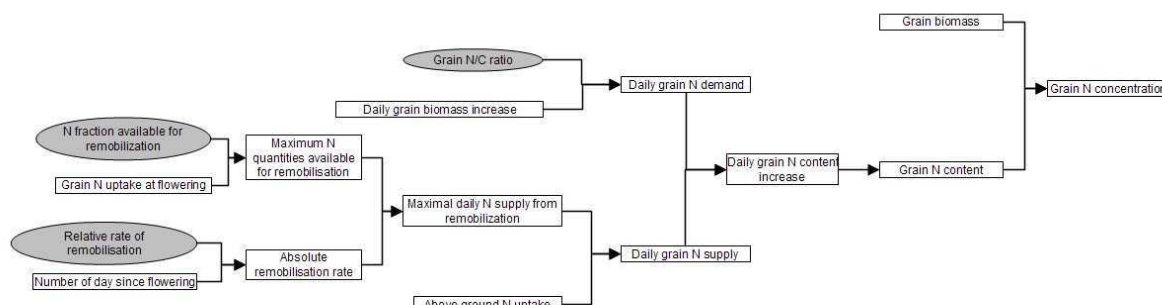


Figure I.12 : Représentation simplifiée de l'élaboration de la teneur en azote des grains dans AZODYN

CERES wheat détermine la quantité d'azote disponible pour les grains à partir d'une teneur en azote minimale des racines et des parties aériennes (Figure I.13).

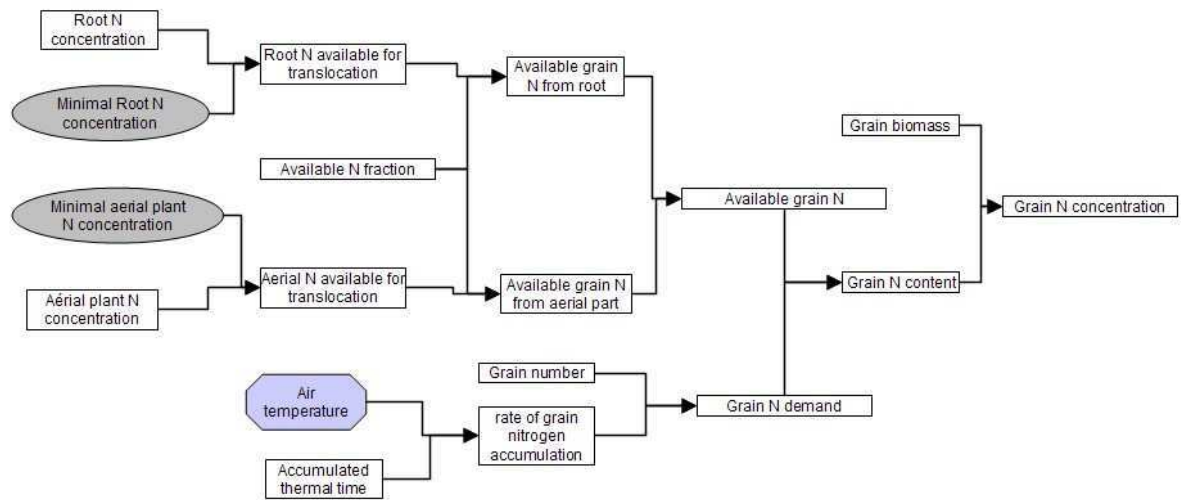


Figure I.13 : Représentation simplifiée de l'élaboration de la teneur en azote des grains dans CERES-Wheat

Tout comme le carbone des grains, l'azote des grains est différencié entre azote structural et azote de stockage dans SiriusQuality1. La demande en azote est estimée à partir de la demande en carbone des grains. Il est considéré que la demande n'est jamais limitante par rapport à l'offre. L'azote non structural présent dans les tiges et les feuilles représente la première source d'azote pour les grains. En cas de non satisfaction de la demande, l'azote absorbé au jour j alimente les grains. Si l'offre n'est toujours pas suffisante, la sénescence des feuilles est accélérée afin d'augmenter la fourniture d'azote aux grains.

La prise en compte des déficits de nutrition hydrique et azotée

La prise en compte de la contrainte hydrique est explicitement intégrée dans les modèles CERES-Wheat, SiriusQuality1 et STICS. AZODYN ne rendait pas compte de l'effet d'un stress hydrique jusqu'au développement méthodologique proposé par David et Jeuffroy (2009). 38 versions d'Azodyn, différentes par la façon d'estimer l'effet d'un stress hydrique sur les processus, ont été évaluées. Je ne détaillerai donc pas cet aspect du modèle.

Tous les modèles étudiés prennent en compte l'effet d'un déficit de nutrition azotée sur le fonctionnement de la culture au travers du calcul d'indices de stress N qui réduisant voire annulant l'intensité de certains processus.

Prises en compte de la contrainte hydrique

CERES-Wheat, SiriusQuality1 et STICS simulent tous les trois l'effet d'un déficit hydrique sur la transpiration, l'efficacité d'interception et la dynamique de *LAI*.

Pour CERES-Wheat, la quantité d'eau transpirée par la plante représente le minimum entre l'évapotranspiration de référence et la quantité d'eau extractable par les racines, qui varie en fonction de la densité racinaire et de l'humidité du sol. Le rapport entre la quantité transpirée par la plante et l'évapotranspiration de référence définit le niveau de stress hydrique de la plante. Dans SiriusQuality1 et STICS, c'est l'indice de stress hydrique, borné à la valeur de 1 et multiplié par l'évapotranspiration potentielle, qui définit la quantité d'eau réellement transpirée par la culture. Pour SiriusQuality1, un indice de stress hydrique apparaît lorsque plus de la moitié de la réserve utile a été épuisée. Pour STICS, un stress hydrique est simulé lorsque la quantité d'eau du sol est inférieure à la quantité d'eau nécessaire à une transpiration optimale. En cas de stress hydrique, l'efficacité de conversion de l'énergie lumineuse en biomasse sera réduite pour les trois modèles. Un indice de stress réduisant la croissance en *LAI* ainsi qu'un indice de stress accélérant la sénescence sont calculés à partir des indices précédents pour chacun des modèles. Les différentes formalisations reposent sur une hiérarchie des processus affectés. Un stress hydrique affecte en premier lieu la croissance en *LAI* puis le niveau de transpiration dans le cas de SiriusQuality1. Dans CERES-Wheat et STICS, l'efficacité de conversion est réduite avec la même intensité que la transpiration, alors dans SiriusQuality1, l'efficacité de conversion deux fois moins sensible que la transpiration. Un stress hydrique prononcé aura enfin comme conséquence une accélération de la sénescence pour chacun des modèles.

Prises en compte de la contrainte azotée

AZODYN et STICS mobilisent le concept d'Indice de Nutrition Azotée (INN) pour définir l'indice de stress en azote. Alors qu'AZODYN calcule un indice de stress en fonction du ratio entre la teneur en azote de la plante et la teneur en azote critique défini par la courbe de dilution de l'azote, STICS offre la possibilité de calculer un INN instantané fonction de la quantité d'azote et de biomasse accumulées quotidiennement (Cf chapitre 1). De la même manière que les indices de stress hydrique, STICS décline différents indices qui vont agir sur la réduction de l'efficacité d'interception et sur la dynamique de *LAI* (réduction de la vitesse de croissance et accélération de la sénescence).

AZODYN estime de plus un indice de stress caractérisant l'intensité et la durée du stress subies par la culture pendant la montaison qui va réduire le nombre de grains produit et

limiter le rendement final. Un stress azoté réduit également la production de biomasse et la valeur du *LAI*.

Pour CERES-Wheat les indices de stress en azote sont calculés à partir de concentrations minimales des différents organes qui varient en fonction du stade phénologiques. La croissance foliaire et l'efficacité de conversion sont affectées ainsi que le nombre de talles formés et la vitesse d'accumulation de l'azote dans les grains.

Interactions entre stress hydriques et azotés

Pour STICS, l'indice le plus faible, et donc le stress le plus fort, affecte la croissance foliaire et l'accélération de la sénescence. Les indices de stress se multiplient pour la réduction de la conversion de l'énergie en biomasse. Pour CERES-Wheat et SiriusQuality1, c'est l'indice le plus faible qui affecte chacun des processus.

ANNEXE II : Liste des paramètres obtenus avec la procédure I3

List of STICS crop parameters values used with I3 procedure

Parameter name	Signification	Cultivar in case of genetic parameter	Initial value
Abscission (-)	Senescent leaf proportion falling on the soil	Specific	0
		Biensur	0.2
		Acalou	-0.54
		Amarillo	-0.65
Adens (-)	Interplant coefficient parameter	Lloyd	-0.54
		Neodur	-0.7
		Nefer	-0.43
		Montsegur	-0.65
Adil (N%)	Parameter of the critical curve of nitrogen requirements	specific	5.35
Adilmax (N%)	Parameter of the critical curve of nitrogen requirements	specific	8.5
Ampfroid (°C)	Semi thermal temperature for vernalising effect	Specific	10
Bdens (plants m ⁻²)	Minimal density from which competition occurs	specific	7
Bdil (-)	Parameter of critical N dilution curve		0.44
Bdilmax (-)	Parameter of critical N dilution curve		0.44
Belong (degree.days ⁻¹)	Parameter of the curve of coleoptile elongation		0.006
Celong (-)	Parameter of the subsoil plantlet elongation curve		2
cgrain (g ⁻¹ m ²)	Parameter of the grain number elaboration function		0.04
cgrainv0	Parameter of the grain number elaboration function		0.0
Coeflevamf, coefamflax, coeflaxsen, coefsenlan, coeflevdrp, coefdrpmat, coefflodrp	Multiplier coefficients of the development phase to use crop temperature		1
contrdamax	Maximum root growth reduction due to soil strenghtness		0.3
Croirac (cm degree.days ⁻¹)	Growth rate of the root front		0.2
debsenrac	Lifespan of roots		1000
Deshydbase (gwater.g fresh matter ⁻¹ °C ⁻¹)	Phonological rate of evolution of fruit water content		0.008
Dlaimaxbrut (m ² leaf plant ⁻¹ degree.day ⁻¹)	Maximum rate of DELTAI		2.7 10 ⁻⁴
Draclong (cm root plant ⁻¹ degree.days ⁻¹)	Maximum rate of root length production		110
durvieF (Q10)	Maximum life span of an adult leaf	Biensur	245
		Acalou	224
		Amarillo	233
		Lloyd	237
		Neodur	249
		Nefer	178
durvieI	Life span of a young leaf expressed in proportion of durvieF	Montsegur	217
			0.8
durviesupmax	Proportion of additional lifespan due to an overfertilization		0.4
Efcroijuv (g. MJ ⁻¹)	Maximum radiation us efficiency during juvenile phase		2.2
Efcroirepro (g. MJ ⁻¹)	Maximum radiation us efficiency during grains filling phase		2.65
Efcroiveg (g. MJ ⁻¹)	Maximum radiation us efficiency during vegetative phase		4.25
Elmax (cm)	Maximum elongation of the coleoptile in darkness condition		6.5
Envfruit (-)	Proportion of the envelop weight relative to the maximum grain weight		0.3
h2ofeuiljaune (g water gFM ⁻¹)	Water content of the yellow leaves		0.15
h2ofeuilverte (g water gFM ⁻¹)	Water content of green leaves		0.9

Parameter name	Signification	Cultivar in case of genetic parameter	Initial value
h2ofrvert (g water gFM ⁻¹)	Water content of fruit before of hydrous evolution (IDEBDES)		0.4
h2oreserve (g water gFM ⁻¹)	Water content of reserve		0.7
h2otigestruc (g water gFM ⁻¹)	Structural stem part water content		0.6
Hautbase (g water gFM ⁻¹)	Base eight of crop foliage		0
Hautmax (g water gFM ⁻¹)	Maximum height of the crop		1
inngrain1(-)	Threshold of INNS defining crop demand during grain filling		1
inngrain2(-)	Threshold of INNS defining crop demand during grain filling		1.2
INNmin(-)	Minimum value of INN allowed for the crop		0.3
innsen(-)	Parameter of the nitrogen stress function active on senescence		0.35
Innturgmin	Parameter of the nitrogen stress function active on leaf expansion		0.3
Irmax(-)	Maximum carbon harvest index		0.55
		Biensur	6
		Acalou	3
		Amarillo	20
Jvc (days)	Number of vernalisation days required	Lloyd	9
		Neodur	0
		Nefer	6
		Montsegur	5
Jvemini (days)	Minimum Number of vernalisation days required		7
Kmabs1	Constant of nitrate affinity by the root uptake system 1		50
Kmabs2	Constant of nitrate affinity by the root uptake system 2		25000
Kmax (-)	Maximum crop coefficient for water requirement		1.27
Laicomp (m ² leaf. m ⁻² soil)	Lai from wich starts competition inbetween plants		0.304
laiplantule	Plantlet LAI at the plantation		0
Longsperac (cm g ⁻¹)	Root length/root mass ratio		18182
lvfront (cm root cm ⁻³ soil)	Root density at the root front		0.12
masecNmax			1.54
Nbfeuilplant (nb plant ⁻¹)	Leaf number per plant at plantation		0
Nbfgellelev (nb plant ⁻¹)	Leaf number at the end of the juvenile phase		2
		Biensur	19000
		Acalou	15000
		Amarillo	20900
Nbgrmax (grain .m ⁻²)	Maximum number of grains	Lloyd	17400
		Neodur	17700
		Nefer	17900
		Montsegur	16600
Nbgrmin (grain .m ⁻²)	Maximum number of grains		3700
Nbjgrains (days)	Period of grain number elaboration		30
nlevlim1 (days)	Number of days after germination decreasing the emerged plants if emergence has occurs		50
Nlevlim2 (days)	Number of days after germination is null		80
Parazofmorte	Parameter qualifying the N content of dead leaves		13
Pentlaimax	Parameter of the logistics curve of LAI growth		5
		Biensur	0.051
		Acalou	0.0604
		Amarillo	0.0488
Pgrainmaxi	Maximum grain weight	Lloyd	0.056
		Neodur	0.055
		Nefer	0.058
		Montsegur	0.058
Phobase (h)	Base photoperiod for development		6.3
Phosat (h)	saturating photoperiod for development		20
Plastochrone			120
Psisto (bars)	Maximum value of the stomachal closing		20
Psiturg (bars)	absolute value of the beginning of decrease of the cellular extension		4
Rapsenturg (-)	Threshod soil water content active to simulate water senescence stress as proportion of turgor stress		0.5

Parameter name	Signification	Cultivar in case of genetic parameter	Initial value
Ratiosen (-)	Fraction of senescent biomass as the ratio at the total biomass		0.8
Sea (cm ² g ⁻¹)			100
Sensiphot (-)	Photoperiod sensitivity (1= insensitive)	Biensur	0
		Acalou	0
		Amarillo	0.1
		Lloyd	0.8
		Neodur	0
Sensrsec (-)	Roots sensitivity to drought (1= insensitive)	Nefer	0.1
		Montsegur	0
Slamax (cm.g ⁻¹)	Maximum specific Leaf surface area of green leaf		0.47
Slamin (cm.g ⁻¹)	Minimum specific Leaf surface area of green leaf		300
Stamflax (degree.days)	Duration between AMF and LAX		180
		Biensur	330
		Acalou	207
		Amarillo	448
		Lloyd	400
		Neodur	305
Stdrpdes (degree.days)	Duration between IDRP and IDEBDES	Nefer	247
		Montsegur	463
			700
		Biensur	700
		Acalou	700
Stdrpmat (degree.days)	Duration between IDRP and IMAT	Amarillo	700
		Lloyd	700
		Neodur	700
		Nefer	700
		Montsegur	700
		Biensur	0
Stflodrp (degree.days)	Duration between FLO and DRP	Acalou	0
		Amarillo	0
		Lloyd	0
		Neodur	0
		Nefer	0
Stlaxsen (degree.days)	Duration between LAX and SEN	Montsegur	0
		Biensur	575
		Acalou	703
		Amarillo	575
		Lloyd	575
		Neodur	575
Stlevamf (degree.days)	Duration between LEV and AMF	Nefer	575
		Montsegur	575
		Biensur	240
		Acalou	228
		Amarillo	290
Stlevdrp (degree.days)	Duration between LEV and DRP	Lloyd	735
		Neodur	265
		Nefer	330
		Montsegur	255
		Biensur	700
Stpltgcr (degree.days)	Duration between IPLT and IGER	Acalou	695
		Amarillo	720
		Lloyd	1545
		Neodur	740
		Nefer	850
Stressdev (-)	Maximum phaisc delay allowed due to stresses	Montsegur	800
Stoprac (-)	Stage when root growth stops		Sen
Stlevamf (degree.days)			30
Stpltgcr (degree.days)			0.2
Stsenlan (degree.days)		Biensur	362
		Acalou	362
		Amarillo	362
		Lloyd	362
		Neodur	362
		Nefer	362
Tcmax (°C)	Maximum temperature of leaf expansion	Montsegur	362
Tcmin (°C)	Minimum temperature of leaf expansion		40
			0

Parameter name	Signification	Cultivar in case of genetic parameter	Initial value
Tdebgel (°C)	Temperature at the beginning of frost action		-4
Tdmax (°C)	Maximum temperature for development		28
Tdmin (°C)	Minimum temperature for development		0
Temax (°C)	Maximum temperature for net photosynthesis		40
Temin (°C)	Maximum temperature for net photosynthesis		0
Tempdeshyd (% water °C ⁻¹)	Increase in the fruit deshydration due to the increase of crop temperature (TCULT-TAIR)		0.005
Teopt (°C)	Beginning of the thermal optimal plateau for net photosynthesis		10
Teoptbis (°C)	End of the thermal optimal plateau for net photosynthesis		20
Tfroid (°C)	Optimal temperature for vernalisation		6.5
tgelflo10 (°C)	Temperature corresponding to 10% of frost damages on flowers or fruit		-4.5
tgelflo90 (°C)	Temperature corresponding to 90% of frost damages on flowers or fruit		-6.5
tgeljuv10 (°C)	Temperature corresponding to 10% of frost damages on LAI during the juvenile phase		-10
Tgeljuv90 (°C)	Temperature corresponding to 90% of frost damages on on LAI during the juvenile phase		-16
tgellev10 (°C)	Temperature corresponding to 10% of frost damages on plantlet		-4
tgellev90 (°C)	Temperature corresponding to 90% of frost damages on plantlet		-16
tgelveg10 (°C)	Temperature corresponding to 10% of frost damages on LAI during the adult phase		-4.5
tgelveg90 (°C)	Temperature corresponding to 90% of frost damages on on LAI during the adult phase		-10
Tgmin (°C)	Minimum temperature for germination and emergence		0
Tigefeuil	Stem (structural part)/leaf proportion		0.5
Tletale	Letal temperature for the lant		-16
Tmaxremp	Maximal temperature for grain filling		38
Tminremp	Maximal temperature for grain filling		0
Tustressmin			0.7
Udlaimax	ULAI from which the rate of		3
Vitirazo (g N g plant ⁻¹ day ⁻¹)	Rate of increase of the nitrogen harvest index	Acalou	0.019
		Amarillo	0.0301
		Biensur	0.0182
		Lloyd	0.0251
		Neodur	0.0231
		Nefer	0.0226
		Montsegur	0.0217
		Acalou	0.0088
		Amarillo	0.0199
		Biensur	0.0129
Vitircarb (g grain g plant ⁻¹ day ⁻¹)	Rate of increase of the carbon harvest index	Lloyd	0.0149
		Neodur	0.0121
		Nefer	0.0127
		Montsegur	0.0096
Vitrophuile (g oil g plant ⁻¹ day ⁻¹)	Rate of increase of the oil harvest index		0
Vitpropsucre (g sugar g plant ⁻¹ day ⁻¹)	Rate of increase of the sgar harvest index		0.0008
Vlaimax (-)	ULAI at the inflection point of the function DELTAI=f(ULAI)		2.2
Vmax1 (µmole cm ⁻¹ h ⁻¹)	maximal N uptake rate by the uptake system 1		.00075
Vmax2 (µmole cm ⁻¹ h ⁻¹)	maximal N uptake rate by the uptake system 2		0.02

List of simulation options of the plt files with their significations.

Simulation optio	Value	Signification	File
Codemonocot	1	Monocotyledon plant	.plt
codetemp	2	Crop temperature as pilote for development	.plt
codegdh	1	Daily time step for temperature calculation	.plt
codephot	1	Photoperiodic plant	.plt
coderetflo	1	A stress delay the flowering day	.plt
codebfroid	2	Vernalisation crop	.plt
codeperenne	1	Annual crop	.plt
codegermin	1	Germination is simulated	.plt
codehypo	1	Hypocotyle growth is simulated	.plt
codelaitr	1		.plt
codlaint	2	LAI growth is a function of leaves life span	.plt
codetransrad	1	Radiation interception is a beer law function	.plt
codtefcroi	1	Threshold temperature for biomass accumulation are identic to temperature for LAI growth	.plt
codeindetermin	1	Determinated crop	.plt
Codeir	1	Rate of increase of harvest index is expressed per day	.plt
codetrempr	1	Activation of temperature stress during grain filling period	.plt
codetemprac	2	Pilote temperature for root growth is soil temperature	.plt
coderacine	2	Simulation of root density profile	.plt
codgellev	1	Frost does not reduce emergence	.plt
codgeljuv	2	Frost effect is active	.plt
codgelveg	2	Frost effect is active	.plt
codgelflo	2	Frost effect is active	.plt
codebeso	1	Water requirement calculated from cultural coefficient	.plt
codeintercept	2	Precipitation are not intercept by foliage	.plt
codelegume	1	No symbiotic fixation	.plt
codazofruit	1	No effect of stress N on grain number	.plt
Sensanox	1	Activation of anoxia stress effect	.plt

List of simulation options of the param.par file with their significations.

Simulation option	Signification	Value	file
codeinnact	Active stress N	1	Param.par
codeh2oact	Active stress H	1	Param.par
codeminopt	Non optimal N mineralization on bare soil	2	Param.par
iniprofil	Smoothing soil profile	1	Param.par
codeprofmes	Stock depth	1	Param.par
codeinitprec	No successive year	1	Param.par
codemsfinal	No MS and yield conservation after harvest	2	Param.par
codeactimulch	No mulch	2	Param.par
codefrmur	Grain elaboration	1	Param.par
codemicheur	Hour microclimat	1	Param.par
codeSIG		0	Param.par
coefb	Radiation saturating effect	0.0815	Param.par
proprac	Root/MS ratio	0.2	Param.par
khaut	Relationship between LAI and crop height	0.7	Param.par
dacohes	Bulk density under wich root growth is reduced	0.7	Param.par
daseuilbas	Threshold of bulk density of soil below that the root growth is not limited	1.2	Param.par
daseuilhaut	Threshold of bulk density of soil below that the root growth is not possible	1.7	Param.par
beta	Increase maximal transpiration when water stress occurs	1.4	Param.par
lvopt	Optimum root density for water and nitrogen uptake	0.5	Param.par
rayon	Mean root radius	0.02	Param.par
difN	Diffusion coefficient at field capacity	0.07	Param.par
concr	Rainfall mean N concentration	0.02	Param.par
pNmin	Minimum rainfall to apply N fertilizer in case of calculation	1	Param.par
FTEM		0.115	Param.par
TREF		15.0	Param.par
FTEM1	Parameter of the thermal effect on mineralisation	-0.566	Param.par
FTEM2		0.62	Param.par
FTEM3		0.9125	Param.par
FTEM4		1.026	Param.par
FHUM		0.20	Param.par
FINERT	Proportion of active nitrogen	0.65	Param.par
FMIN1	Parameter of potential rate of mineralisation	0.65	Param.par
FMIN2		11.0	Param.par
FMIN3		60.0	Param.par
Wh	N/C ratio of humidified organic matter	0.105	Param.par
pHminvol	Soil pH parameter above which volatization is minimal	5.5	Param.par
pHmaxvol	Soil pH parameter above which volatization is maximal	8.5	Param.par
Vabs2	Crop N uptake parameter	2.0	Param.par
Xorgmax	N rate at which maximum microcical immobilization is reached for a given fertilizer	400	Param.par
codeminhum	HCC and Hmin threshold for mineralisation	1	Param.par
hminn	Minim soi water content for nitrification expressed as a proportion of field capacity	0.3	Param.par
hoptn	Optimal soil water content for nitrification expressed as a proportion of field capacity	0.45	Param.par
pHminnit	Soil pH threshold under which nitrification is nill	3.0	Param.par
pHmaxnit	Soil pH threshold under which nitrification is maximal	5.5	Param.par
tnitmin		5.0	Param.par
tnitopt1	Cardinal T° for nitrification	15.0	Param.par
tnitopt2		20.0	Param.par
tnitmax		30.0	Param.par
codedenit	No denitrification of organic matter	2	Param.par

Simulation option	Signification	Value	file
profdenit	Thickness of soil layer for denitrification	20	Param.par
vpotdenit	Total denitrification potential rate	16.0	Param.par
zr	Reference height of meteorological data measurement	2.5	Param.par
NH3ref	Atmospheric ammonia concentration	0.0	Param.par
ra	Default value for RAA	50.0	Param.par
aangst	Parameter of insolation fraction	0.18	Param.par
bangst		0.62	Param.par
albveg	Albedo of the vegetation	0.23	Param.par
codernet	Brutsaert formula for radiation calculation	2	Param.par
codecaltemp	Simplified calculation of crop temperature	1	Param.par
codeclchange	No climate change	1	Param.par
codaltitude	No altitude	1	Param.par
pminruis	Proportion of run-off water above the activation threshold	5.0	Param.par
aclim	Climatic component of A	20.0	Param.par
zesx	Maximal depth of soil affected by soil evaporation	60.0	Param.par
cfes	Soil contribution to evaporation as a function of depth	5.0	Param.par
z0solnu	Bare soil roughness	0.01	Param.par
diftherm	Soil thermal diffusivity	5.37e-3	Param.par
bformnappe	Shape parameter of the water table	0.77	Param.par
rdrain	Drain radius	1.0	Param.par

List of simulation options of the paramV6.par file with their significations.

Simulation option	Signification	Value	file
codazorac	No N effect on root repartition	2	paramV6.par
codtrophrac	No trophic link	3	paramV6.par
masecplantule(1)	Initial shoot biomass of plantlet	0.5	paramV6.par
zracplantule(1)	Initial root length of plantlet	2.0	paramV6.par
psihumin	Basic potential		paramV6.par
psihucc		paramV6.par	
codeINN	Instantaneous NNI	2	paramV6.par
INNimin	NNI threshold parameter	-0.16	paramV6.par
codeHxN	Minimal stress on leaf growth	1	paramV6.par

ANNEXE III : Guide d'entretien pour la réalisation des enquêtes de pratiques

PARTIE 1 : Présentation de l'exploitation agricole

Général

Nom prénom :

Adresse :

Le lieu d'habitation est-il le siège de l'exploitation ?

Si non, de quelle distance sont-ils séparés ?

Téléphone :

Statut de l'exploitation (Gaec, Earl, Individuelle) :

SAU totale :

SAU irrigable :

Surface moyenne des parcelles :

Nombre d'îlots de parcelles (au sens PAC) :

Culture principale (en surface) :

Culture principale (en revenu) :

Ateliers de production :

Contexte familial

Nombre de personnes vivant sur l'exploitation :

Parmi ces personnes, combien travaillent sur l'exploitation ?

Age de l'exploitant :

Formation de l'exploitant :

Perspectives de succession :

Activités rémunératrices extérieures :

Responsabilités extérieures :

Votre contexte familial induit-il des contraintes particulières quant à la gestion de votre exploitation ?

Objectifs généraux de production

Quelles sont les finalités de votre activité agricole :

Pouvez-vous classer par ordre d'importance les éléments suivants :

de 1 à 11

Assurer un revenu

Avoir une production maximale

Qualité de vie, temps libre

Simplification des conduites de culture

Limitation des coûts de production

Avoir des produits de qualité

Préserver de l'environnement

Satisfaire le cahier des charges

Minimiser le temps de travail

Avoir une exploitation transmissible

Autre (préciser)

Productions de l'exploitation

Les productions animales :

Quelle est la nature des productions animales réalisées sur l'exploitation ?

Quelle est l'importance de l'atelier animal dans le résultat final de l'exploitation ?

L'élevage entre-t-il en compétition avec les autres activités de l'exploitation en terme de temps de travail ?

Comment ?

Les effluents d'élevage sont-ils utilisés pour la fertilisation azotée des cultures ?

Les productions végétales

L'assolement de l'exploitation sur la campagne 2009 :

Cultures	Surface totale (ha)	Irriguée (Oui / Non)	Surface sur la sole irrigable (ha)
Cultures d'hiver			
-			
Cultures d'été			
-			
Autres			
-			

Quelle est la destination principale des cultures ?

Le blé dur a-t-il toujours eut cette importance dans votre assolement ?

Pourquoi ? Quelles ont été les évolutions ?

Quelles sont les cultures irriguées **en même temps** que le blé dur ?

Quels sont les rotations principales existantes sur l'exploitation ?

Pourquoi avez-vous des rotations différentes sur l'exploitation ?

Comment sont réparties ces rotations sur l'exploitation ?

Pourquoi faire entrer le blé dur dans cette (ces) rotation(s) ?

Le blé dur irrigué est-il présent dans une rotation particulière ?

Si oui pourquoi ?

Sur quel type de sol implantez-vous du blé dur ? Quelles en sont les caractéristiques ?

Appellation	Caractéristiques (profondeur, texture, pente)	Surface (ha)	Blé dur irrigué Oui / Non, Pourquoi ?	Pourquoi sur ce type de sol ?

Y-a-t-il d'autres types de sol sur l'exploitation ?

Pourquoi le blé dur n'est-il pas installé sur ces autres types de sols ?

La production du blé dur

Les motivations

Quels sont vos principaux facteurs de motivation à la production du blé dur ?

(hiérarchiser les 3 principaux facteurs de production, de 1 pour le principal à 3)

revenu	
primes	
tradition	
diversification	
main d'œuvre/matériel disponible	
contractualisation	
Valeur agronomique (rotation, etc.)	
autres (préciser _____)	

Esimez-vous que le blé dur est-elle une culture à risque ?

Pourquoi ?

Pourquoi avez-vous fait le choix de mettre le blé dur sur la sole irrigable ?

Les objectifs de production

Quels sont vos objectifs de production ?

	Blé dur irrigué	Blé dur non irrigué
	<i>noter les variantes suivant la variété et le type de sol ou autre</i>	
Rendements		
Qualité		

Qu'est-ce qui détermine vos objectifs de production du blé dur ?

Annexe III : Guide d'entretien pour la réalisation des enquêtes de pratiques

Ces objectifs sont-ils régulièrement atteints ?

- Tout les ans
- 1 an / 2 minimum
- < 1 an / 2
- Jamais

Les objectifs de production sont-ils réévalués en cours de campagne ?

Pourquoi ?

En fonction de quels éléments ?

Quelles sont les stratégies mises en place pour atteindre ces objectifs?

A quel moment de la campagne décidez-vous d'irriguer ou pas le blé dur ?

Les résultats

Quels sont les rendements obtenus ?

(donner une fourchette de résultats pour les variantes)

	Irrigué	Non irrigué
En moyenne		
Variantes suivant les conditions climatiques		
Variantes suivant les types de sol		

Quelle est la qualité obtenue ?

(irrigué / non irrigué)

	Teneur en protéines	Mitadinage	Moucheture	Poids Spécifique
	Irrigué/sec	Irrigué/sec	Irrigué/sec	Irrigué/sec
En moyenne				
Une année sèche				
Une année humide				

Avez-vous souvent des problèmes de qualité sur le blé dur ? (Causant par exemple des réactions à la vente)

Quels sont les principaux facteurs limitants ou accidents affectant vos résultats ?

	Blé dur irrigué	Blé dur non irrigué
Rendements		
Qualité		

Quelles primes percevez-vous pour la culture du blé dur ? (nature, montant, origine, conditions ...)

Les variétés de blé dur cultivées

Quelles sont les variétés cultivées sur l'exploitation ? Pourquoi ? Comment sont-elles choisies ?

Quelle est l'origine des semences utilisées sur l'exploitation ?

Pourquoi ?

La contractualisation

Disposez-vous de contrat de production du blé dur?

Si oui :

Avec quel(s) organisme(s) ?

Pourquoi avez-vous choisi la contractualisation?

Quelles sont les contraintes de la contractualisation pour la réalisation des opérations culturales?

Irrigation :

Fertilisation azotée :

Si non :

Pourquoi avoir choisi de ne pas avoir de contrat de production?

Les contrats sont-ils déterminants dans la décision des pratiques d'irrigation et de fertilisation N sur le blé dur ?

Identification des atouts et des contraintes de l'exploitation agricole

L'organisation du parcellaire

Les îlots de parcelles sont-ils regroupés autour de l'exploitation ?
 La structure du parcellaire est-elle contraignante pour la réalisation des cultures ?
 Pourquoi ?
 Comment gérez-vous cette contrainte sur l'exploitation ?

Quelles sont les contraintes du parcellaire vis-à-vis des pratiques de fertilisation azotée? (ex.: proximité des cours d'eau) Cela a-t-il des conséquences sur la production du blé dur et lesquelles ?

Quelles sont les contraintes du parcellaires pour la mise en place et la réalisation de l'irrigation du blé dur ? (ex.: pentes, hydromorphie,...) Quelles en sont les conséquences sur la production du blé dur ?

Y a-t-il eu des changements significatifs récents (depuis les 6 dernières années) dans l'organisation du parcellaire ?
 Pourquoi ? (Pour lever quelles contraintes ?)

Le milieu biophysique

Le **climat** de la région est-il contraignant pour la production du blé dur ?
 Pourquoi ? Quelles stratégies mettez-vous en œuvre par rapport à ça ?
 Pensez-vous que ce climat influence vos stratégies de conduite du blé dur ?
 Comment ?

Quels sont les éléments du climat qui sont pris en compte pour la conduite du blé dur sur l'exploitation ?

Comment vous informez-vous sur cette contrainte ?
 (ex.: pluviométrie passée, prévisions météorologiques, vent)

Les **types de sol** présents sur l'exploitation sont-ils contraignant vis-à-vis de la réalisation des opérations culturales :

Irrigation :
 Fertilisation azotée :

Pensez-vous que vos types de sols ont une influence sur vos stratégies de conduite du blé dur ?
 Si oui comment ?

La ressource en eau

Appartenez-vous à un réseau collectif d'irrigants ?
 Pourquoi ?

D'où provient l'eau utilisée pour l'irrigation du blé dur ?

Type et nom de la ressource	Type et nom de la structure (si collectif)	Volume/débit attribué	Fiabilité	Tarification	Contraintes
rivière/cours d'eau - Lac/retenue - Forrage sur nappe - Réseau de grand collectif	ASA - Syndicat d'irrigation - Réseau en concession d'état				

Disposez-vous d'un compteur d'eau pour mesurer votre consommation ?

La tarification de l'eau est-elle spécifique pour la production du blé dur ?

Quelle est la composante du coût de l'irrigation la plus importante ?
 (redevance, forfait, électricité, eau)

Le coût de l'eau d'irrigation a-t-il une influence sur les pratiques d'irrigation mises en œuvre ?
 Est-ce un frein à l'irrigation ?

Jugez-vous que votre ressource en eau est suffisante ?

La ressource en eau disponible représente-t-elle une contrainte pour la production du blé dur ?
 Pourquoi ?

Etes vous parfois soumis à des restrictions d'eau ?
 Tous les ans
 1 an / 2
 < 1 an / 2
 Jamais

Si oui, à quelle période du cycle du blé dur ?

Quelles conséquences cela a-t-il sur les stratégies d'irrigation des cultures ? (choix des cultures irriguées, priorités)

Quelles conséquences cela a-t-il sur l'irrigation du blé dur ?

A quel moment de la campagne décidez-vous la quantité d'eau qui sera attribuée à chaque culture ?

Comment choisissez-vous la répartition de l'eau entre les cultures ?

Annexe III : Guide d'entretien pour la réalisation des enquêtes de pratiques

Quel volume de la ressource disponible est destiné aux cultures d'hiver ?
 Quel volume de la ressource disponible est destiné au blé dur ?
 Quelles sont les cultures prioritaires pour l'accès à la ressource ?
 A quel moment de la campagne décidez-vous que vous aller irriguer le blé dur ?
 L'irrigation du blé dur est-elle limitée par l'irrigation des autres cultures ?
 Pourquoi ?

Le matériel disponible

Matériel de fertilisation utilisé sur le blé dur :

Quel est le matériel utilisé pour la fertilisation azotée (épandeur, pulvérisateur) ?
 Ce matériel est-il en propriété ?
 Si non, d'où vient-il ?

Quels sont les contraintes imposées par votre matériel pour la fertilisation azotée du blé dur ?
 (type de produit/ doses pouvant être épandues, ...)

Le matériel influence-t-il le choix des stratégies de fertilisation azotée du blé dur ?
 De quelle manière ?

Etes-vous autonome pour la réalisation des autres opérations culturales ?
 Si non, comment est-ce gérer ? (Cuma, entreprises, ...)

Matériel d'irrigation : (pivots, enrouleurs, pompes, etc.)

Type de matériel	Age du matériel (< 5 ans / 5 <_< 10 ans / > 10 ans)	Nombre présents sur l'exploitation	Caractéristiques (Enrouleur : débit + Ø du tube / pivot : débit + rayon irrigué + tour complet ou non)	Cultures irriguées avec ce matériel dans l'année	Avantages / inconvénients pour l'irrigation du blé dur	Individuel ou collectif (I / C)
Enrouleurs						
	1					
	2					
	3					
	4					
Pivots						

Les contraintes du matériel présent sur l'exploitation influencent-elles les stratégies d'irrigation du blé dur mises en place ?
 Si oui, comment ?

Disposez-vous d'un réseau pour la distribution de l'eau ?
 Comment s'organise-t-il sur l'exploitation ?
 Est-il contraignant pour la réalisation de l'irrigation sur l'exploitation ? Si oui pourquoi ?

La main d'œuvre disponible

Nombre d'UTH (Unité de Travail Humain) :

Total	
Familial	
Salarié	
Saisonnier	

Comment organisez-vous les activités par rapport à la main d'œuvre disponible pour le blé dur ?

cf. Calendrier des activités à remplir

Estimez-vous que votre main d'œuvre disponible sur l'exploitation est suffisante ?
 Pourquoi ?

Sur le calendrier : mettre en évidence avec l'exploitant les pics de travail au cours du cycle de production du blé dur mettre en évidence les cultures entrant en concurrence avec le blé dur pour la ressource en eau, pour la main d'œuvre

Au moment d'un pic de travail, quelles vont être les priorités réalisées ?
 Quelles conséquences cela a-t-il sur la production du blé dur ?

Qui fait quoi ?	Mise en place de l'équipement	Prise de la décision de réaliser l'opération	Réalisation de l'opération culturale
Irrigation			
Fertilisation azotée			

La main d'œuvre est-elle une contrainte prise en considération lors des choix stratégiques de fertilisation et d'irrigation du blé dur ?
 Comment ?

L'environnement socio-économique de l'exploitation

La réglementation :

Disposez-vous de parcelles en zones vulnérables, ou protégées, ou autre?

De quel type?

Quelles en sont les contraintes quant aux pratiques de fertilisation azotée ?

Quelles en sont les conséquences quant aux pratiques d'irrigation du blé dur ?

Le système informatif :

Vous informez-vous sur les cours économiques des cultures que vous pratiquez ?

Pourquoi ?

Quelles conséquences ont-ils sur la production du blé dur ?

Vous informez-vous sur les cours économiques des intrants azotés ?

Quelles conséquences cela a-t-il sur les pratiques de fertilisation azotée que vous mettez en œuvre ensuite ?

Bénéficiez-vous de conseils par des conseillers agricoles ?

Par quels organismes ?

En quoi consiste-t-il concernant la fertilisation azotée et l'irrigation du blé dur ?

Comment l'utilisez-vous ? Le suivez-vous ?

En résumé

Nous avons pu voir que votre exploitation était insérée dans son environnement et que celui-ci lui conférait des caractéristiques particulières. Afin de savoir quels sont les caractéristiques qui vont avoir le plus d'importance dans la conduite du blé dur, pouvez-vous classer les différents éléments que l'on vient de détailler par ordre d'importance dans la détermination des décisions finales ?

Quels sont les facteurs ayant une influence sur :

(classez du plus contraignant - 1 - au moins contraignant - 12 - pour votre exploitation)

	La production du blé dur	Les pratiques d'irrigation du blé dur	Les pratiques de fertilisation azotée du blé dur
la main d'œuvre disponible			
la contractualisation			
la réglementation (Zones vulnérables, PNR, ZRE)			
la ressource en eau disponible pour l'irrigation			
la tarification de l'eau			
le climat et la pluviométrie			
le matériel disponible sur l'exploitation			
le mode de gestion de la ressource en eau			
la sole irrigable présente sur l'exploitation			
le type de sol			
les conseils reçus			
les cultures pratiquées sur l'exploitation			
les cours économiques des cultures / des intrants			
les objectifs généraux de production			
les restrictions de la ressource en eau			
l'organisation des activités et les priorités entre cultures			
l'organisation du parcellaire			

PARTIE 2 : Les pratiques d'irrigation et de fertilisation azotée du blé dur Cf. Feuille A3

Dans cette deuxième partie, nous allons retracer l'itinéraire technique réalisé sur la culture du blé dur sous différentes contraintes climatiques des années passées sur l'exploitation, en insistant sur les pratiques d'irrigation et de fertilisation azotée réalisées

Un itinéraire étudié correspond en fait à 4 itinéraires :

- Itinéraire pour une **année type moyenne** représentative de ce qui est fait en général sur l'exploitation
- Itinéraire pour une **année** identifiée comme **sèche en début de cycle dans la région**
- Itinéraire pour une **année** identifiée comme **sèche en fin de cycle dans la région**
- Itinéraire pour une **année** identifiée comme **humide dans la région**

Années retenues par régions	année sèche en début de cycle	année sèche en fin de cycle	année globalement humide
Midi-Pyrénées	2007	2005 / 2006	2008
Centre	2007		2006
Poitou-Charentes	2009		2006
PACA	2007		2006

Annexe III : Guide d'entretien pour la réalisation des enquêtes de pratiques

Languedoc-Roussillon	2007	2006	2008
----------------------	------	------	------

Vous souvenez-vous de l'année xxxx ? Quelles ont été pour vous les principales caractéristiques des conditions climatiques de ces années au cours du cycle cultural du blé dur ?

Avant de se lancer dans l'itinéraire technique, il est important de repérer comment sont gérées les 2 opérations culturales étudiées dans l'espace ; c'est-à-dire identifier les unités de gestion de la fertilisation azotée et de l'irrigation du blé dur.

Comment est gérée la fertilisation azotée sur l'exploitation ? Y-a-t-il des unités de gestion de la fertilisation azotée ou est-ce toujours la même chose qui est mis en place ?

Comment est gérée l'irrigation sur l'exploitation ? Y-a-t-il des unités de gestion de l'irrigation ou est-ce toujours la même chose qui est mis en place sur toutes les parcelles en blé dur ?

PARTIE 3 : Compréhension des décisions prises

Enfin, nous allons essayer de comprendre comment vous réalisez vos choix pour les modalités des pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation précédemment replacées au cours du cycle cultural de la culture. Il s'agit d'identifier les principaux éléments que vous prenez en compte pour faire vos choix et les observations réalisées en cours de campagne pour les adapter et parvenir ainsi à vos objectifs de production.

Les tableaux sont remplis au fur et à mesure que l'agriculteur explique ses pratiques. Chaque partie grisée correspond à une question qui doit permettre, en orientant petit à petit l'agriculteur, d'obtenir les informations recherchées.

Fertilisation azotée

Dans un premier temps nous allons nous intéresser à votre planification, en début de culture, des opérations culturales qui seront réalisées sur le blé dur ; puis nous verrons comment se réalise le suivi des conditions en cours de culture et quelles adaptations sont mises en place suivant les conditions. Nous aimerions pouvoir connaître les indicateurs ou observations que vous réalisez pour faire vos choix, les méthodes et outils de calcul ou de raisonnement utilisés, et les objectifs visés par chacune des opérations mises en place.

Programme prévisionnel de fertilisation azotée	Unité de gestion	Objectifs assignés à chaque modalité	Déterminants des pratiques	Observations réalisées / indicateurs observés	Outils / méthodes utilisées / calculs	Seuils (si nécessaire)
Dose totale d'azote à apporter (en uN/ha) <i>Comment déterminez-vous la dose totale d'azote à apporter pour le blé dur ?</i>						
Fractionnement à réaliser	<i>Comment déterminez-vous le fractionnement de la dose totale à réaliser au cours du cycle cultural du blé dur ?</i>					
• Nombre d'apports						
• Dose d'azote à apporter à chaque apport						
• Conditions nécessaires pour la réalisation de l'apport						
Type de produit utilisé						
Utilisation de l'irrigation pour favoriser l'absorption de l'azote par la culture	<i>Pratiquez-vous une irrigation de valorisation des apports d'azote ? Oui Non Si oui, comment déterminez-vous si il y a besoin ou non d'une irrigation pour valoriser l'azote, et comment choisissez-vous la quantité d'eau et le moment de l'apport ?</i>					
• Conditions de déclenchement						
• Dose d'eau à apporter						
• Moment de l'apport						
Réalisation en cours de culture	Unité de gestion	Objectifs assignés	Déterminants des pratiques	Observations réalisées / indicateurs observés	Outils / méthodes utilisées	Seuils (si nécessaire)

Annexe III : Guide d'entretien pour la réalisation des enquêtes de pratiques

<p>Pilotage de la fertilisation azotée en cours de culture <i>Comment réalisez-vous le pilotage de la fertilisation azotée en cours de culture ? Appliquez-vous directement votre programme prévisionnel, réalisez-vous un suivi particulier ?</i></p>						
<p>Adaptations :</p>	<p><i>Comment adaptez-vous vos pratiques aux différents événements survenant en cours de culture ? Par exemple des événements climatiques, ou encore réglementaires et économiques ? Adaptez-vous vos pratiques suivant les types pédologiques de vos parcelles ?</i></p>					
<p>• <i>Aux conditions climatiques</i></p>						
<p>• <i>Aux conditions pédologiques</i></p>						
<p>• <i>Autres (réglementation, contexte économique, contrats, cahiers des charges spécifiques, ...)</i></p>						

Notez-vous vos pratiques de fertilisation azotée dans un cahier (ou autre) ?

Comment estimez-vous l'efficacité de votre fertilisation azotée ?

Selon vous, la fertilisation azotée est-elle difficile à gérer sur le blé dur ?

Irrigation à la levée

Avez-vous déjà irrigué à la levée ?

L'irrigation à la levée est-elle pratiquée sur toutes les parcelles en blé dur ?

Pourquoi choisissez-vous ou ne choisissez-vous pas d'irriguer à la levée ?

Quels sont les observations réalisées pour choisir d'irriguer ?

Comment est déterminée la date de l'apport ?

Tout comme pour la fertilisation azotée, nous allons essayer de comprendre vos choix et pratiques mises en place concernant l'irrigation du blé dur.

Irrigation principale

Programme prévisionnel d'irrigation	Unité de gestion	Objectifs assignés à chaque modalité	Déterminants des pratiques	Observations réalisées / indicateurs observés	Outils / méthodes utilisées / calculs	Seuils (si nécessaire)
<p>Déclenchement de l'irrigation</p>	<p><i>Comment déterminez-vous le moment où l'irrigation va devoir être déclenchée ? Quelles sont les conditions qui déterminent le déclenchement de l'irrigation (précipitations passées, stades de la culture, par exemple) ? Quelles sont les modalités de cet apport (quantité d'eau à apporter, ordre de déclenchement entre unités) ?</i></p>					
<p>• <i>Conditions de déclenchement</i></p>						
<p>• <i>Date de déclenchement</i></p>						
<p>• <i>Dose de l'apport (en mm/ha)</i></p>						
<p>• <i>Organisation entre unités de gestion (ordre)</i></p>						
<p>Fréquence de retour de l'irrigation</p>	<p><i>Comment déterminer-vous le temps laissé entre 2 tour d'irrigation ? Quelles sont alors les modalités des apports suivant et les conditions observées pour pouvoir déclencher les apports ?</i></p>					
<p>• <i>Temps de retour entre 2 tours d'eau</i></p>						
<p>• <i>Dose apportée à chaque tour d'eau</i></p>						
<p>• <i>Conditions nécessaires pour le déclenchement de l'apport</i></p>						

Annexe III : Guide d'entretien pour la réalisation des enquêtes de pratiques

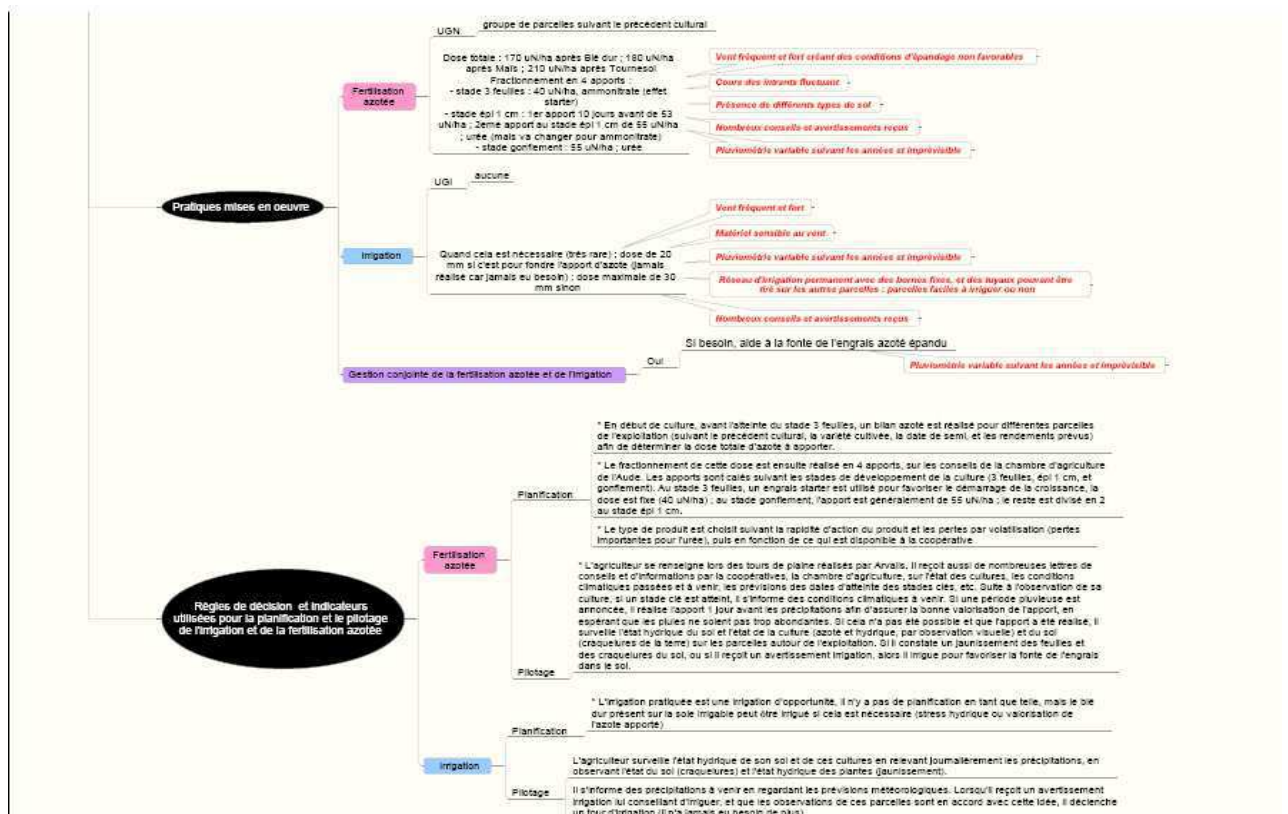
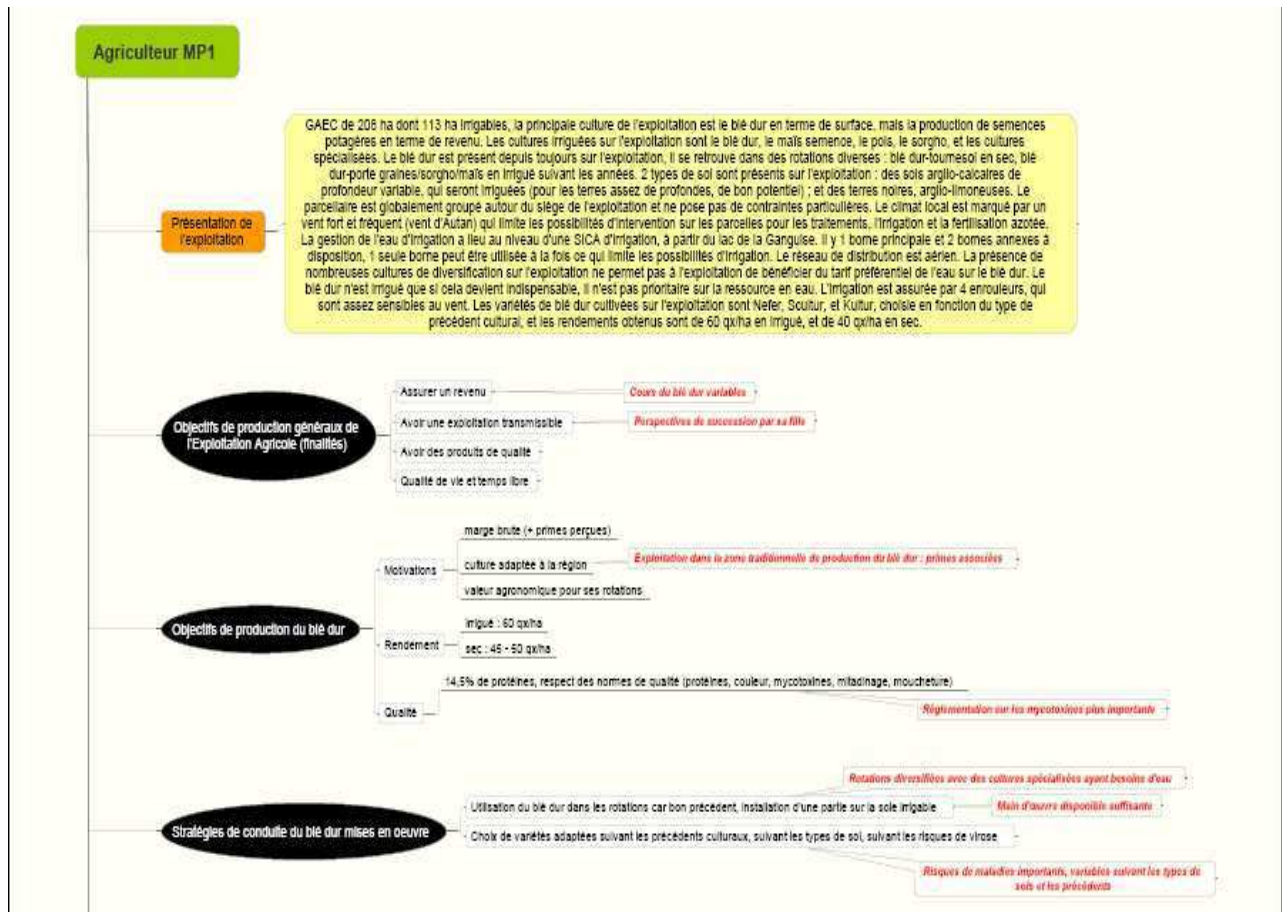
<p>Prise en compte des précipitations <i>Comment prenez-vous en compte les précipitations passées et à venir dans le raisonnement de l'irrigation ?</i></p>						
<p align="center">Arrêt de l'irrigation</p>	<p><i>Comment déterminez-vous le moment où l'irrigation va devoir être arrêtée définitivement en fin de campagne, mais également en cas de restrictions et/ou d'interdiction de l'irrigation ? Quelles sont les observations que vous réalisez ? Quelles sont les conditions à réunir pour que l'irrigation puisse être stoppée ?</i></p>					
<p>● <i>en fin de campagne</i></p>						
<p>● <i>en cas de restrictions et/ou d'interdictions</i></p>						
<p align="center">Réalisation en cours de culture</p>	<p align="center">Unité de gestion</p>	<p align="center">Objectifs assignés à chaque modalité</p>	<p align="center">Déterminants des pratiques</p>	<p align="center">Observations réalisées / indicateurs observés</p>	<p align="center">Outils / méthodes utilisées / calculs</p>	<p align="center">Seuils (si nécessaire)</p>
<p>Pilotage de l'irrigation <i>Comment réalisez-vous le pilotage de la fertilisation azotée en cours de culture ? Appliquez-vous directement votre programme prévisionnel, réalisez-vous un suivi particulier ?</i></p>						
<p align="center">Adaptations</p>	<p><i>Comment adaptez-vous vos pratiques aux différents événements survenant en cours de culture ? Par exemple des événements climatiques, ou encore réglementaires et économiques ? Adaptez-vous vos pratiques suivant les types pédologiques de vos parcelles ?</i></p>					
<p>● <i>Aux conditions climatiques</i></p>						
<p>● <i>Aux conditions pédologiques</i></p>						
<p>● <i>Autres (réglementation, contexte économique, contrats, cahiers des charges spécifiques, arrêtés préfectoraux ...)</i></p>						
<p>Concurrence entre cultures et priorités</p>						

Notez-vous vos pratiques d'irrigation dans un cahier (ou autre) ?

Comment estimez-vous l'efficacité de votre irrigation ?

Selon vous, l'irrigation est-elle difficile à gérer sur le blé dur ?

ANNEXE IV : Exemple de monographie



TITLE: Adaptation of a crop model and design of a decision model for the joint management of irrigation and nitrogen fertilization of durum wheat

AUTHOR: Solenne GUILLAUME

ABSTRACT : Changes in economic, regulatory and environmental context of agricultural production raise the need for research to evaluate and propose new strategies for joint management of irrigation and fertilization for durum wheat. The thesis had two objectives: i) adapting the simulation crop model STICS to different durum wheat cultivars, and ii) designing a decision model for nitrogen fertilization and irrigation practices. A database containing 373 experimental treatments carried out by INRA and ARVALIS before this PhD work was established and mobilized to conduct the adaptation and the evaluation of crop model.

The adaptation of the crop model was first conducted through durum wheat parameter estimation by mathematical optimization. A comparative analysis of three approaches was conducted to select an appropriate approach to obtain an accurate and robust crop model for the simulation of grain yield, grain nitrogen content and intermediate variables (biomass, leaf area, amount of nitrogen absorbed) in different soil and climatic conditions. This study provided a methodological framework for crop models parameters estimation. The results of this study showed that the crop model, with its original formalism, was not sensitive to the effect of splitting of fertilization on the grain nitrogen content and protein concentration.

The adaptation was then conducted through the modification of the formalism of nitrogen accumulation in grains by introducing a formalism inspired the AZODYN crop model. The modification did not significantly improve the model's sensitivity to the effect of N splitting on the nitrogen content of grain. The results of this study call into question the ability of crop model to simulate the absorption process of nitrogen after flowering. Unfortunately the lack of data concerning post-flowering leaf area dynamics did not allow improving the model. From a survey of 29 irrigators, practices and strategies of nitrogen fertilization and irrigation, as well as strategic and tactical decisions have been identified and formalized in a decision model. An evaluation of strategies based on survey results is given as an illustration of the potential use of the STICS soil-crop model and the decision rules identified and formalised.

The coupling of the crop model to the model decision will allow proposing and evaluating strategies adapted to the farm context for joint management of irrigation and nitrogen fertilization of durum wheat.

KEYWORDS : cultivar, crop model, cropping practices, decision model, durum wheat, nitrogen fertilization, irrigation, parameter estimation, STICS.

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Centre INRA Toulouse, Auzeville

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Agronomie

AUTEUR : Solenne GUILLAUME

DIRECTEURS DE THESE : Eric JUSTES et Jacques-Eric BERGEZ

LABORATOIRE D'ACCUEIL : UMR INRA/ENSAT 1248 AGIR

TITRE : Adaptation d'un modèle de culture et conception d'un modèle de décision pour la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur

AUTEUR : Solenne GUILLAUME

RESUME : Les changements de contexte économique, réglementaire et environnementaux auxquels la production agricole doit faire face nécessitent d'évaluer de nouvelles stratégies de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation pour blé dur. Le travail de thèse a suivi un double objectif : i) adapter le modèle de culture STICS à différents cultivars de blé dur, et ii) concevoir un modèle de décision des pratiques de fertilisation azotée et d'irrigation. Une base de données comportant 373 traitements expérimentaux issus de douze années climatiques a été constituée à partir d'expérimentations réalisées avant la thèse à l'INRA et ARVALIS puis mobilisée pour conduire le travail d'adaptation et d'évaluation du modèle de culture.

L'adaptation du modèle de culture a consisté dans un premier temps en un travail d'estimation de paramètres par optimisation mathématique pour sept cultivars de blé dur. Une analyse comparative de trois démarches a permis de sélectionner la démarche pertinente pour obtenir un modèle précis et robuste pour la simulation du rendement, de la teneur en azote des grains et des variables intermédiaires (Biomasse aérienne, surface foliaire, quantité d'azote absorbée) dans différents contextes pédo-climatiques (large gamme de niveaux de nutrition hydrique et azotée). Cette étude fournit un cadre méthodologique pour l'estimation des paramètres des modèles de culture. Les résultats de ce travail ont de plus démontré que le modèle de culture, avec son formalisme initial, n'était pas sensible à l'effet du fractionnement de la fertilisation sur la quantité d'azote et la teneur en azote des grains.

L'adaptation est appréhendée dans un deuxième temps par la modification du formalisme d'accumulation de l'azote dans les grains par l'introduction d'un formalisme inspiré du modèle AZODYN. La modification n'a pas amélioré suffisamment la sensibilité du modèle à l'effet du fractionnement sur la teneur en azote des grains. Le manque de données expérimentales en phase post-floraison et notamment la dynamique de la sénescence foliaire n'a pas permis d'améliorer la capacité du modèle de culture à simuler les processus d'absorption d'azote du sol après la floraison.

A partir d'une enquête auprès de 29 irrigants de blé dur, les pratiques et les stratégies de fertilisation azotée et d'irrigation, ainsi que les décisions stratégiques et tactiques ont été identifiées et formalisées dans un modèle de décision. Une évaluation de stratégies conçues sur la base des résultats d'enquêtes est proposée comme illustration de l'utilisation du modèle STICS adapté au blé dur et du modèle de décision formalisé.

Le couplage informatique du modèle de culture STICS au modèle de décision permettra de disposer d'un modèle bio-décisionnel et ainsi pourra être utilisé pour concevoir et évaluer des stratégies de gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur adaptées au contexte des exploitations agricoles.

MOTS-CLES : blé dur, cultivar, fertilisation azotée, irrigation, modèle de culture, modèle de décision, estimation de paramètres, pratiques agricoles, STICS.

LIEU ET DATE DE SOUTENANCE : Centre INRA Toulouse, Auzeville

DISCIPLINE ADMINISTRATIVE : Agronomie

AUTEUR : Solenne GUILLAUME

DIRECTEURS DE THESE : Eric JUSTES et Jacques-Eric BERGEZ

LABORATOIRE D'ACCUEIL : UMR INRA/ENSAT 1248 AGIR