

CIHEAM



Centre
International
de Hautes Etudes
Agronomiques Méditerranéennes

*International
Centre for
Advanced
Mediterranean Agronomic Studies*

Thèse / Thesis

requis pour
l'obtention du Titre

*submitted
for the Degree of*

Master of Science

**Évaluation de la capacité d'indicateurs
et de modèles de cultures
à quantifier différentes variables
du système sol-plante
à l'échelle d'un territoire**

Nawel Temani

Série « Master of Science » n° 118

2012

**Institut Agronomique Méditerranéen de
Montpellier**



CIHEAM
IAM MONTPELLIER

**Évaluation de la capacité d'indicateurs
et de modèles de cultures
à quantifier différentes variables
du système sol-plante
à l'échelle d'un territoire**

Nawel Temani

Série « Master of Science » n° 118

2012

**Évaluation de la capacité d'indicateurs et de modèles de cultures à quantifier
différentes variables du système sol-plante à l'échelle d'un territoire**

Nawel Temani

Série « Master of Science » n° 118

2012

Série Thèses et Masters

Ce Master est le numéro 118 de la série *Master of Science* de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

Cette collection réunit les *Masters of Science* du CIHEAM-IAMM ayant obtenu la mention « Publications », ainsi que les travaux doctoraux réalisés dans le cadre des activités scientifiques et pédagogiques de l'Institut et de ses enseignants chercheurs.

Le *Master of Science* du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes :
Evaluation de la capacité d'indicateurs et de modèles de cultures à quantifier différentes variables du système sol-plante à l'échelle d'un territoire

a été soutenu par **Nawel Temani** le 13 octobre 2011 devant le jury suivant :

M. Pierre Ruelle, Ingénieur en Chef du GREF - CEMAGREF, UMR G-EAU Président
M. Olivier Therond, Ingénieur de recherche, INRA Toulouse - UMR Agir Membre
M. Hatem Belhouchette, Enseignant-chercheur, CIHEAM-IAMM Membre

Le travail de recherche a été encadré par Hatem Belhouchette

CIHEAM-IAMM

Institut agronomique Méditerranéen de
Montpellier

Directeur : Vincent Dollé

3191 route de Mende – BP 5056
34093 Montpellier cedex 05
Tél. : 04 67 04 60 00
Fax : 04 67 54 25 27
<http://www.iamm.fr>

**L'institut Agronomique Méditerranéen
n'entend donner aucune approbation ni improbation
aux opinions émises dans cette thèse**

ISBN : 2-85352-481-7 ; ISSN : 0989-473X

Numéros à commander au
CIHEAM- IAMM
Bureau des Publications
e-mail : tigoulet@iamm.fr
Prix : 50€
© CIHEAM, 2012

Fiche bibliographique

Temani (Nawel) – Évaluation de la capacité d'indicateurs et de modèles de cultures à quantifier différentes variables du système sol-plante à l'échelle d'un territoire – Montpellier : CIHEAM-IAMM - 71p. (Master of Science, IAMM, 2012, n°118)

Résumé : L'objectif de ce travail est d'évaluer la capacité d'indicateurs et de modèles de cultures, de complications croissantes, à quantifier des variables du système sol-plante à l'échelle d'un territoire. Les outils choisis n'ont été calibrés que pour la phénologie et sont : le déficit hydrique, l'indicateur INDIGO, Jeux d'O, BILHN, Aquacrop et CropSyst. Ils ont été appliqués sur cinq sites de culture de maïs dans la région du Midi-Pyrénées. Le maïs est semé pendant une période d'une à six années de culture allant de 1986 à 2007. Huit situations qui diffèrent par le régime hydrique et/ou la fertilisation azotée et le type de sol ont été distinguées. Les résultats montrent que BILHN et Jeux d'O se sont avérés les plus performants pour la simulation du rendement. Aquacrop et CropSyst nécessitent plus de calibration pour mieux exprimer les rendements observés. La moyenne des simulations des quatre modèles semble être un bon prédicteur pour le rendement à grande échelle. Les résultats des modèles et des indicateurs pour leurs prédictions des composantes du bilan hydrique et de la lixiviation de l'azote sont très variables.

Mots clés : Modèle de culture, indicateurs agro-environnementaux, comparaison de modèles, comparaison d'indicateurs, rendement, bilan hydrique, lixiviation, échelle régionale

Abstract: *The aim of this study is to assess the ability of indicators and models of different levels of complication to quantify variables of the plant and soil system at a regional scale. The chosen tools were Water deficit, INDIGO, Jeux d'O, BILHN, Aquacrop and CropSyst and were not calibrated. They were applied for five sites of maize crop at the Midi Pyrenees region. Maize crop were sown within rotations from one year to six ranging from 1986 to 2007. Eight situations differing by water schedule and/or nitrogen fertilization or soil type were distinguished. Results show that BILHN and Jeux d'O models were the best predictors of grain yield. Aquacrop and CropSyst need more calibration to be efficient. Mean simulations of grain yield seems to be a promising predictor for grain yield at large scale. Results of water components and nitrogen leaching were very different from each other.*

Key words: *Crop models, agri-environmental indicators, model comparison, indicators comparison, yield, water balance, nitrogen leaching, regional scale.*

**“Nobody believes in simulation models except their developers...
Everybody believes in experimental data except who collected them”**

Gaylon S. Campbell

Remerciements

Au terme de ce travail, arrivant à la partie la plus agréable, je vais enfin pouvoir exprimer ma gratitude à ceux qui m'ont aidée pendant ce stage. Je tiens à remercier chaleureusement toute personne qui de près ou de loin a contribué à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, avec mon profond respect, j'exprime mes sincères remerciements à M. **Hatem Belhouchette** pour avoir accepté d'être le tuteur pédagogique de ce travail, pour son aide précieuse et son soutien sans limite tant sur le plan humain que professionnel et technique, pour ses encouragements et ses précieux conseils. Aucune parole ne pourra exprimer ma gratitude, ma reconnaissance et ma grande estime.

Mes remerciements les plus distingués s'adressent à mes maîtres de stage, Mme **Delphine Leenhardt** et M. **Olivier Therond** pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser ce stage au sein de l'UMR AGIR. Sans eux, ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

Un remerciement particulier s'adresse à M. **Olivier Therond** pour l'engagement qu'il m'a montré, pour les conseils qu'il m'a donnés, pour la disponibilité qu'il a su trouver malgré ses multiples engagements.

Un grand merci à M. **Jean-Marie Nolot**, d'abord pour m'avoir accordé la permission d'utiliser ses modèles BILHN et Jeux d'O mais également pour avoir pris la peine de m'expliquer leurs « mode d'emploi » et les formalismes qui les constituent. Son esprit d'agronome d'expérimentateur et de modélisateur... m'a réellement marquée et manquera certes à l'INRA après sa retraite.

Un autre esprit m'a également frappée, une seconde personne à qui je ne peux qu'exprimer ma profonde reconnaissance, il s'agit du statisticien, modélisateur de l'UMR, M. **Daniel Wallach**. Merci d'avoir accepté de guider ce travail et de participer à nos réunions et contribuer par votre expertise à décrire la méthodologie de comparaison des indicateurs et modèles.

Je remercie également **Denis Baudet**, qui m'a fourni à plusieurs reprises les éléments qui ont formé ma base de données.

Merci également aux chercheurs de l'UMR : Jacques-Eric Bergez, Magali Willaume, Eric Justes, Philippe Debaeke, Caroline Gibert et Marion Casgrande, avec qui j'ai eu l'opportunité de discuter de mon sujet et qui ont contribué à enrichir mon esprit critique.

Je remercie également les professeurs et maîtres qui ont accepté de juger ce travail.

Merci à mes collègues de bureau et de la cantine Greg, Arnaud, Jérôme, Dragan, Pierre et Stéphanie pour leur agréable compagnie et leur sympathie.

Je remercie globalement tous les membres de mon équipe d'accueil MAGE ainsi que tous les membres de l'UMR.

Je remercie ma chère famille et mes amis qui ont su me soutenir et me donner le courage de continuer et d'achever ce travail.

Enfin, un grand merci à Houssem pour son soutien, sa patience et pour bien plus...

Table des matières

Introduction et problématique	5
I. Etude bibliographique	7
1. Indicateurs agri-environnementaux	7
A. Définition et historique.....	7
B. Échelle d'application des indicateurs	7
2. Modèles de culture	7
A. Les modèles de systèmes de culture.....	8
B. Structure générale des modèles de culture.....	8
C. Typologie des modèles des systèmes de culture.....	9
II. Material and methods	11
1. Description of models and indicators	11
A. Environmental indicators.....	12
B. Summary model: Jeux d'O	15
C. Expert model.....	15
D. Complex model: CropSyst	17
2. Data set for models inputs	19
3. Calibration assumptions	21
4. Initial conditions and simulation	22
5. Comparison of model and indicators performance	22
A. Model performance for phenology simulation	22
B. Model performance for yield simulation	23
C. Models and indicators assessment of water and nitrogen budget.....	24
III. Results	24
1. Model performance for phenology simulation	24
2. Model performance for yield simulation	25
3. Models and indicators assessment of water and nitrogen budget	29
A. Water budget	29
B. Nitrogen leaching.....	35
IV. Discussion	37
1. Grain yield	37
A.1 Relation between phenology and grain yield	37
B.2 Inaccuracy in grain yield CropSyst simulations	38
2. Uncertainties	38
A. Input data.....	38
B. Calibration	39
C. Model structure.....	39
D. Human errors.....	39
E. Observed data	39
3. Water balance	39
4. Mean values	40
5. Model comparison using statistical indicators	40
Conclusions et perspectives	41
Liste bibliographique	43

Annexes.....	49
Annexe 1 : Enchaînement des équations de Jeux d'o.....	51
Appendix 2 : Aquacrop description.....	53
Appendix 3 : Équations de BILHN	55
Appendix 4: Water soil properties for each experimental site.....	60
Appendix 5: Degree days required to reach emergence, flowering and physiological maturity for each variety	61
Appendix 6: CropSyst conceptual model	62
Appendix 7: Aquacrop conceptual model	63
Appendix 8: Model conceptuel de Jeux d'O	64
Appendix 9: Model conceptuel de BILHN.....	65
Appendix 10: le fonctionnement conceptuel des modules dans BILHN.....	66

Liste des figures

Fig.1. Typologie des modèles des systèmes de culture selon 3 composantes : la complexité, le degré de calcul et échelle d'application (Rossitier 2003, d'après Bouma 1999).....	10
Fig. 2. Average calculated (blue line) and average each model simulated (red line) number of days required to reach the flowering phase for 8 different situations in the midi Pyrenees region.....	25
Fig. 3. Simulated and observed grain yield estimates (q/ ha) for 39 studied case from 1986 to 2007 in 5 sites under different water and nitrogen strategies. Simulation results are shown for the four individual models. The 1:1 line is shown, representing perfect agreement.....	27
Fig. 4. Inter-annual average observed (blue line) and average each model simulated (red line) maize grain yield and the standard deviation for 8 different situations in the midi Pyrenees region.....	28
Fig.5. Mean model estimates (red line) for grain yield and their standard deviation compared to observed (blue line) grain yield for 8 situations.....	29
Fig.6. Yield variability (based on standard deviation calculation) simulated for 8 different conditions.....	29
Fig.7. Comparison of mean simulated evaporation, transpiration, drainage and evapotranspiration of Aquacrop (blue line), CropSyst (red line), BILHN (green line) and Jeux d'O (purple line) models under 8 different situations. Real records of mean ETP from climatic data are compared to simulated ETP (orange line).	30
Fig.8. Model dispersion based on standard deviation calculation between models for four water components variables (evaporation, transpiration, ETP and drainage) from 1986 to 2007 for 8 different situations.....	31
Fig. 9. Simulation of water content on 15 th of June and on flowering during growing seasons of 8 different situations.....	32
Fig.10. Mean water deficit recorded across 8 different conditions.....	33
Fig. 11. Nitrogen leaching simulates by CropSyst, INDIGO and BILHN for different situations under different nitrogen management. INDIGO indicator does not simulate nitrogen leaching if no nitrogen fertilizer is applied case of the Cr*N-*irri plot.....	36
Fig. 12. Mean variability between models for simulating nitrogen leaching at 8 different situations.....	36

Liste des tableaux

Table 1. Qualitative Comparison between models and indicators.....	11
Table 2. Models and indicators typology	12
Table 3. Summary of the nitrogen model equations.....	14
Table 4. Presentation of the Jeux d'O model parameters.	15
Table 5. Presentation of the BILHN model's parameters.....	16
Table 6. Comparison of the different calculation approaches used in Jeux d'O, Aquacrop, BILHN and CropSyst.	18
Table 7. Summary description of the experimental sites.....	20
Table 8. Presentation of the studied situations.	21
Table 9. Calculations of mean bias error, modelling efficiency, relative root mean square error and index of agreement of maize grain yield in 8 situations in the midi Pyrenees region.	26
Table 11. Evaluation of water applied schedules using INDIGO irrigation indicator.....	34
Table 12. Evaluation of water applied schedules using water deficit (WD) indicator.	34
Table 13.comparaison between interpretation for drainage indicators and output models	35

Introduction et problématique

Dans les années cinquante, la maximisation des rendements était la préoccupation majeure des agronomes qui ont profité de l'industrialisation et du progrès technique pour proposer des systèmes de production permettant de satisfaire, à prix bas, la demande croissante en produits alimentaires d'une population en continuelle croissance. C'est dans cette conjoncture que s'est produit le passage de l'agriculture traditionnelle vers l'agriculture moderne. Cependant la reconnaissance que celle-ci est à l'origine de dégradations majeures des ressources naturelles conduit à remettre en question ce modèle agricole (Murua et al., 1995 ; IAASTD 2009).

Au début des années soixante-dix, le discours économique anglo-saxon commence à introduire la notion d'agriculture durable (Belhouchette, 2004), et à partir de 1985, la communauté internationale a commencé à mettre un accent particulier sur l'agriculture et le développement durable (Njomaha, 2002).

Pour accompagner le développement d'une agriculture économiquement efficace, socialement équitable et écologiquement soutenable (CMED, 1987), les agronomes se trouvent confrontés à des problèmes pluridisciplinaires dont la résolution nécessite assez souvent l'adoption d'une approche globale des pratiques agricoles pour assurer une maximisation des rendements tout en tenant compte des contraintes environnementales, sociales et économiques (Tixier, 2005). Dans ce contexte de tension potentielle entre les objectifs, les agronomes ont pris conscience de l'importance de concevoir des outils de conception et de conduite de systèmes de production agricoles mieux adaptés aux situations locales et capables d'évaluer la durabilité de ces systèmes.

Par ailleurs, bien avant la naissance du concept de l'agriculture durable, l'expérimentation agricole a toujours été utilisée comme outil d'évaluation depuis le dix-neuvième siècle. Plus tard, grâce au progrès réalisés en statistiques et en mathématiques, les principes modernes d'expérimentation agronomique ont commencé à voir le jour au cours des années 1920, à partir des travaux de Ronald Aylmer Fisher. Depuis, toute expérience doit normalement être l'objet d'une planification rigoureuse, donnant naissance à un plan d'expérience ou un protocole expérimental où les traitements, l'unité expérimentale, les observations et la méthodologie doivent être bien définis (Dagnelie, 2003). Cependant ce procédé s'avère rapidement fastidieux et coûteux s'il doit être réalisé manuellement sur un grand nombre de scénarios. En outre, Le Gal et Milleville (1996) ont montré que des techniques d'expérimentation, d'enquêtes et d'interviews atteignent leurs limites dès qu'on cherche à estimer les effets d'un changement technique ou organisationnel ou évaluer les effets du climat ou des pratiques agricoles sur le système de production.

Pour lever cet obstacle, les agronomes ont profité des progrès acquis dans le domaine de l'informatique, et notamment du développement du langage informatique et de l'intelligence artificielle, pour élaborer des indicateurs et des modèles des systèmes de culture permettant de simuler, sous une forme simplifiée, l'action des agriculteurs.

Désormais, les scientifiques utilisent ces indicateurs et modèles à des fins scientifiques et comme outils d'aide à la prise de décision. Ces indicateurs et modèles ont souvent été développés pour évaluer et simuler le comportement d'une situation de production définie par un sol, un climat et un système de culture. Autrement dit, ils ont pour vocation initiale d'être utilisés à l'échelle de la parcelle.

Cependant ils sont maintenant couramment utilisés pour conduire des travaux qui dépassent largement l'échelle de la parcelle expérimentale (Gaunt et al., 1997) comme un territoire, une région, un pays ou un continent (Ewert et al., 2006). C'est pour des prédictions futures, telles que les questions de changements climatiques (Ceglar et al., 2011), ou support pour les décideurs politiques et législateurs (Confalonieri et al., 2010 ; Heidmann et al., 2008) que le recours à la modélisation devient de plus en plus significatif.

Dans les études de modélisation menées à l'échelle régionale, la variabilité de la distribution spatiale des itinéraires techniques par exemple, est généralement estimée soit par des moyens statistiques et de probabilité soit supposée uniforme en admettant des hypothèses de simplification. Ce qui camoufle des interactions entre le sol, le climat et l'itinéraire technique qui peuvent tout de même être importants (Therond et al., 2010).

En outre, il est important de calibrer les modèles pour s'assurer de leur adéquation avec les données réelles (Heidmann et al., 2008), en effet, d'après Adam et al., (2011), la réutilisation des modèles sans aucun ajustement conduit à une incohérence dans les résultats du modèle. Ceci remet en question la robustesse du modèle. En effet, selon Confalonieri et al. (2010) un modèle est robuste si les résultats obtenus en utilisant les valeurs des paramètres calibrés et ceux par défaut ne sont pas significativement différents.

Disposer des données observées nécessaires pour assurer une calibration solide et l'évaluation des modèles, ne pose généralement pas de problème à l'échelle de la parcelle, cependant plus l'échelle augmente, plus ces données deviennent limitatives. Dans le cas où les données mesurées manquent parce que l'échelle d'étude est largement supérieure à celle de la parcelle, peut-on utiliser les résultats simulés par les modèles ?

Pour un même phénomène, les formalismes et les hypothèses considérés diffèrent largement entre les modèles. Par conséquent, la nature et le nombre de paramètres à calibrer sont très variables d'un modèle à l'autre selon sa nature. Plus un modèle est mécaniste, plus il fait intervenir des paramètres et plus sa calibration se complique. On peut alors se demander si le niveau de complication des modèles est un frein ou si leur caractère mécaniste est un avantage à leur utilisation sur des grandes échelles ?

Le présent travail tente de comparer les résultats de plusieurs modèles, de complication croissante allant des indicateurs simples aux modèles dynamiques semi-mécanistes, quant à leur simulation du rendement, de la consommation en eau et de l'azote dans divers situations.

Sur la demande de mon maître de stage, la partie bibliographique ainsi que les conclusions et perspectives seront traitées en langue française et le reste de l'analyse sera faite en anglais.

I. Etude bibliographique

1. Indicateurs agri-environnementaux

A. Définition et historique

Les définitions du concept d'indicateur varient beaucoup sur le plan conceptuel (OCDE, 2001). Quant aux indicateurs agri-environnementaux, Vernier (2007) retient qu'ils sont une combinaison de variables descriptives, qui permettent d'obtenir une vision synthétique d'une situation, d'un phénomène souvent complexe, et qui sont utilisés pour évaluer, suivre les impacts de l'agriculture sur l'environnement et favoriser l'aide à la décision. Ils doivent permettre de représenter à partir de données simples et accessibles des phénomènes complexes. D'après Zahm et ses collaborateurs (2005), la mise en place de ces indicateurs a connu ses premières ébauches en 1987 avec le rapport Bruntland qui formule la définition du concept du développement durable. En 1992, le concept entre en application avec l'engagement des états signataires à la Conférence des Nations Unies pour l'Environnement et le Développement de mettre au point une stratégie Nationale de Développement. Depuis, la Commission européenne soutient le développement et commence à élaborer des indicateurs de durabilité en agriculture.

Actuellement, on distingue plusieurs indicateurs de l'environnement, voire même une explosion d'indicateurs agri-environnementaux, d'après Bockstaller et al (2008) et Riley (2001). Ils deviennent une véritable alternative aux mesures directes qui présentent assez souvent des difficultés opérationnelles dans leurs applications (Bockstaller et al., 2008).

B. Échelle d'application des indicateurs

Les indicateurs agri-environnementaux peuvent être utilisés à différentes échelles spatiales de la parcelle expérimentale à tout un pays passant par l'exploitation agricole, les bassins versants et autres types de territoires. Cependant l'application de tel ou tel indicateur à une échelle particulière doit être réalisée en considérant certaines contraintes et objectifs (OCDE, 2001).

D'abord par rapport à l'échelle d'étude, Vernier (2007) montre qu'en agri-environnement, on distingue trois types de niveau d'organisation spatiales à savoir : le niveau d'organisation à enjeu environnemental (bassin versant, unité paysagère, etc.) ; le niveau d'organisation de la gestion de la production agricole (la parcelle, l'exploitation agricole, la filière de production, la coopérative, etc. ..) ; le niveau d'organisation du pouvoir administratif ou professionnel (les différentes circonscriptions administratives de l'Etat ou des collectivités territoriales, les parcs naturels, les structures de coopération, etc.).

Ensuite, la capacité à explorer les données depuis la parcelle vers des échelles plus élevées peut se heurter à l'inconvénient d'une perte de précision due à l'extrapolation à un rang plus élevé de données relevées au niveau du champ (OCDE, 2001).

2. Modèles de culture

Les systèmes de culture sont des systèmes complexes qui intègrent un grand nombre de facteurs (Poussin, 1987). La compréhension du fonctionnement de ce type de système nécessite de prendre en considération les caractéristiques de ses composantes (climat, sol, succession culturale et pratiques agricoles) ainsi que leurs interactions. Dans le cadre de l'analyse de la durabilité de ces systèmes, il est aussi nécessaire de considérer les impacts des pratiques agricoles sur l'environnement.

L'analyse des systèmes de culture peut suivre la voie expérimentale, d'ailleurs Brisson (2009) montre que c'est l'approche d'expérimentation qui permet d'appréhender la complexité de la réalité, en l'occurrence celle de la parcelle agricole et ses nombreux aspects et interactions. Toutefois, n'oublions pas que l'expérimentation doit répondre à certaines conditions telles que proposées par Dagnelie (2003), d'après Fisher (1931), à savoir : la répétition de chacun des traitements, la randomisation et le contrôle local. Le premier a pour objectif d'estimer la variabilité résiduelle, le second veut dire la répartition « au hasard » des différents traitements au sein des différentes unités expérimentales et permet d'obtenir des estimations non biaisées de la variabilité résiduelle et de l'influence des traitements. Le dernier a pour but d'augmenter

la précision de l'expérience. Par conséquent, mener une expérimentation devient difficile, onéreux en termes de temps et d'argent avec l'augmentation de l'échelle d'étude vu qu'elle nécessite plusieurs années d'expériences pour être significative. Dans des situations similaires, le recours à l'utilisation des modèles de culture devient intéressant dans le sens où il va diminuer le nombre d'expérimentations tout en apportant une réponse à la question étudiée (Belhouchette, 2004).

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité qui permet de fournir de l'information sans passer par des expérimentations réelles (Rossitier, 2003). Les résultats des modèles viennent compléter l'information apportée par la voie empirique (Soltani et Hoogenboom, 2008). Les modèles ne peuvent pas rendre compte de l'ensemble des processus qui entrent en jeu. Par conséquent, un modèle de culture doit être envisagé comme un support d'interprétation d'une réalité très complexe (Jego, 2008).

Les modèles de culture sont des programmes informatiques capables de simuler le comportement du système sol/plante considérant tel ou tel système de culture. L'intégration, à la fois, des interactions au sein de la plante et ses interactions avec son environnement renvoie vers un grand nombre de processus complexes dont quelques-uns restent toujours méconnus (Kumar et Chaturevdi, 2009). Par conséquent, tous les modèles se basent sur une simplification des phénomènes biophysiques, visant à rendre compte des principaux phénomènes déterminés selon l'objectif du modèle (Tixier, 2004).

A. Les modèles de systèmes de culture

Belhouchette (2004) rapporte que pour simuler la croissance et le développement des cultures, les agronomes ont, dans un premier temps, développé plusieurs modèles permettant de simuler le fonctionnement d'une culture spécifique. Cependant, la modélisation des systèmes de culture nécessite un modèle capable de simuler différentes plantes cultivées en rotation ou en association. L'approche initiale du développement de modèles de culture spécifique a alors constitué un obstacle important pour passer de la culture aux systèmes de culture. Pour permettre la simulation des systèmes de culture, une première approche a été d'assembler les modèles de simulation créés pour des cultures spécifiques en un seul modèle. Tel est le cas du logiciel DSSAT (Uehara 1989 ; Uehara et Tsuji, 1991) qui intègre les modèles CERES, GRO et SIMPOTATO. Toutefois, ce type de modèle s'est avéré incapable de simuler des successions culturales du fait que chaque modèle possède ses propres modules. Changer la culture implique donc des modifications au niveau des modules et par conséquent des propriétés et des états initiaux différents.

Toutefois, Belhouchette (2004) rapporte que le modèle dans ce cas perd sur sa généralité ; en effet, ces modèles sont plutôt moins sensibles à des changements de lieux ou de saison. De ce fait, d'autres modèles ont alors été spécialement conçus et développés pour simuler les systèmes de culture à savoir WOFOST (Supit, 1994), CropSyst (Stöckle et al., 2003), APSIM (Mc Cown et al., 1996), DSSAT (Jones et al., 2003), EPIC (Williams et al., 1989), STICS (Brisson et al, 1998).

Avec ce progrès, la modélisation des cultures dans la recherche agronomique a évolué au cours des 20 dernières années d'une activité marginale souvent critiquée par de nombreux agronomes à un outil couramment utilisé dans la recherche (Robertson et Carberry, 2010). Ces modèles sont considérés comme de bons outils pour répondre aux préoccupations contemporaines par leur capacité à simuler les effets des pratiques culturales et à produire des informations pour traiter les enjeux agri-environnementaux (Brisson et al, 1998).

B. Structure générale des modèles de culture

Les modèles de cultures se structurent autour d'un schéma dynamique de croissance du couvert végétal (Brisson, 2009) où la biologie occupe une place importante (Jego, 2008). Ils comprennent un ensemble de variables d'entrée, de paramètres, de variables d'état et de variables de sortie (Hadira, 2006). Variables et paramètres se déclinent généralement en plusieurs modules dont un s'intéresse à la description du sol et les autres se consacrent à la description du fonctionnement de la culture en termes de croissance et de développement (Barbottin, 2004).

Brisson (2009) rapporte que dans tous les modèles de culture, le flux de matière carbonée pilote le fonctionnement trophique de la plante et peut, dans certains cas, être accompagné d'un flux d'azote pouvant également être soumis à une loi de répartition entre organes. L'essentiel des autres processus est

introduit dans les modèles comme des flux d'information servant à orienter, modifier ou limiter le flux de carbone.

C. Typologie des modèles des systèmes de culture

Il existe plusieurs typologies des modèles des systèmes de culture selon qu'on se base sur le domaine d'application, la complexité, les formalismes...

Godard (2005) a classé les modèles de culture en 3 types selon leur domaine d'application ; ainsi on distingue :

a) les modèles éco-physiologiques : sont des modèles qui se basent sur une description fine des processus éco-physiologiques. Les premiers modèles éco-physiologiques ne simulaient que le cycle de carbone ensuite ils se sont complexifiés pour être dynamiques, capables d'adopter un pas de temps journalier et intégrer la photosynthèse, la respiration, la décomposition, le bilan énergétique et le bilan hydrique. Tel est le cas du modèle WOFSOT (Van Diepen et al., 1989).

b) les modèles agronomiques : introduisent les pratiques culturales aux notions physiologiques caractéristiques de la culture comme le modèle STICS (Brisson et al., 1998) ou APSIM (Mac Cown et al., 1996).

c) les modèles agro-environnementaux : des problèmes d'érosion de pollution par les nitrates et les pesticides ont commencé à occuper une bonne partie de la recherche ce qui a fait émerger des modèles tels que EPIC (Williams et al., 1984) adapté à la simulation de l'impact de l'érosion des sols sur la production agricole ou encore CropSyst (Stöckle et al., 2003) qui simule à la fois l'érosion, la lixiviation d'azote ainsi que les pertes d'azote par volatilisation et dénitrification incomplète. Plusieurs modèles de simulation de l'azote ont été développés durant les dix dernières années. Des modèles comme SOILN, WAVE, LEACHN, CREAMS, SLIM, ... simulent les flux d'azote et sa transformation à l'échelle de la parcelle.

Par ailleurs selon Rossitier (2003) que les modèles de cultures soient éco-physiologiques, agronomiques ou agro-environnementaux, on y distingue forcément 3 composantes : la complexité, le degré de calcul et échelle d'application (Fig. 1).

La réunion de ces 3 composantes permet la classification des modèles des systèmes de cultures. Ainsi, par la complexité, on distingue des modèles empiriques et des modèles mécanistes, par le degré de calcul on les classe en modèles qualitatifs à modèles quantitatifs. Ensuite l'application de ces deux composantes à n'importe quelle échelle d'application, qu'il s'agisse de la molécule à la région reste possible bien que d'une manière pratique, les modèles les plus mécanistes et les plus quantitatifs s'appliquent généralement à moindre échelle (Rossitier, 2003).

La figure 1 montre les différents types de modèles qui découlent de cette décomposition, on distingue :

- des modèles du type K1 : ils sont des modèles empiriques qualitatifs qu'on applique généralement à l'échelle de la parcelle expérimentale de leur utilisateur ne nécessitant pas de calculs ils sont difficiles à formaliser et suivent plutôt l'intuition de leurs utilisateur.
- des modèles du type K2 : sont également qualitatifs mais envisagent des mécanismes donc un certain niveau de calcul. Pour cette catégorie, on distingue notamment l'approche de la FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations) qui utilise l'expertise de spécialistes pour modéliser des aspects complexes moyennant une série d'hypothèses simplificatrices qui aboutissent ainsi à ce qu'on appelle des modèles d'experts.
- des modèles du type K3 : renferment également des modèles empiriques mais forcément quantitatifs qui appliquent des relations statistiques entre les sorties des modèles (tel que le rendement) et les données d'entrées (telles que la précipitation, la structure du sol, la température...). Ce type de modèles statistiques empiriques ne peut pas être appliqué en dehors de leurs domaines de calibration.

Les type K4 et K5 : tentent plutôt d'être mécanistes, ce qui signifie qu'ils se basent plus sur des lois physiques, biologiques, physiologiques... que des observations empiriques relatives au site de

l'expérimentation. Cette caractéristique élargit leur domaine d'application. Toutefois, une distinction catégorique entre le mécaniste et l'empirique n'est toujours pas évidente puisque tous les modèles mécanistes ont une base empirique :

- les modèles du type K4 sont les modèles dynamiques de simulation des systèmes de cultures qui sont supposés être mécanistes mais ont un grand nombre de composantes empiriques, de ce fait, leur échelle d'application ne doit pas être très étendue.
- les modèles du type K5 se basent plus sur l'approche mécaniste détaillée, sont généralement les plus complexes et sont plutôt des sous modèles qui ont quand même recours à l'empirisme. En effet, un problème d'inadéquation entre les données fournies par le site d'étude et les exigences des paramètres du modèle sont assez souvent dans ce type de modèles. Comblent cette lacune se fait généralement par biais des modèles statistiques empiriques.

Dans le présent travail, la classification des modèles étudiés va suivre la démarche proposée par Rossitier (2003).

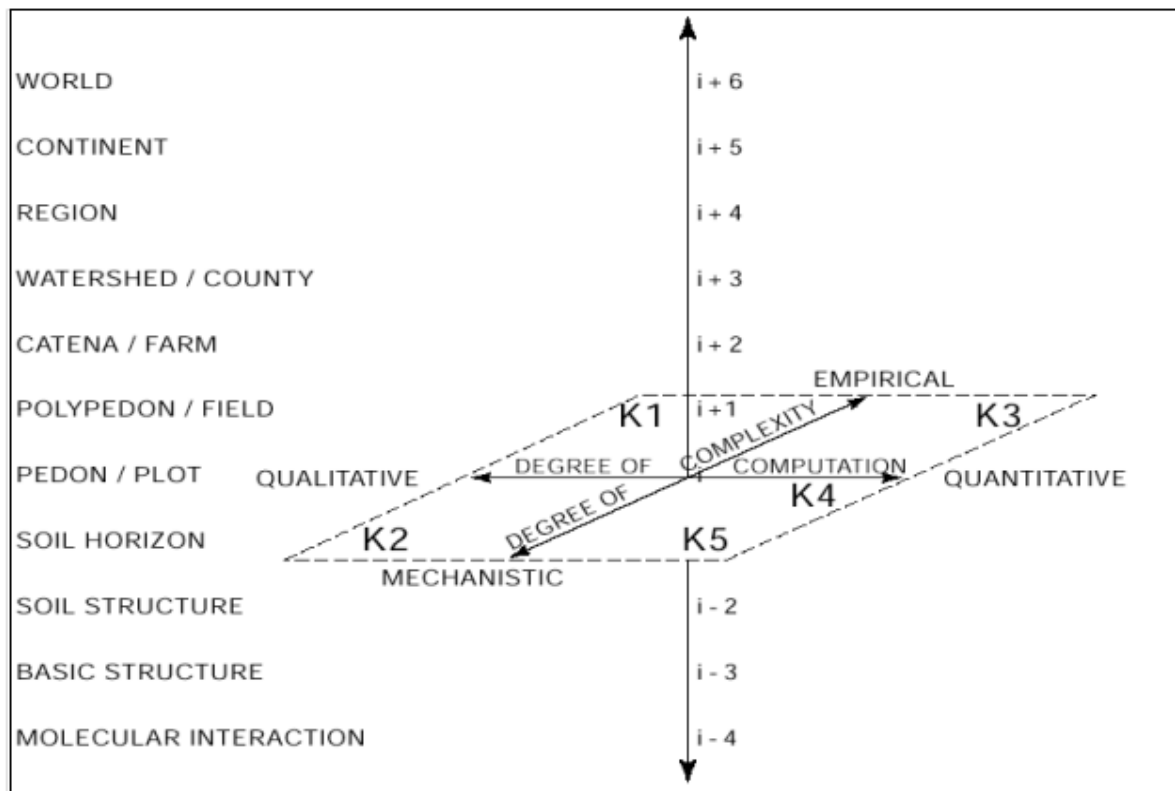


Fig.1. Typologie des modèles des systèmes de culture selon 3 composantes : la complexité, le degré de calcul et échelle d'application (Rossitier 2003, d'après Bouma 1999).

Glossary

Composite indicator: a composite indicator is the mathematical combination of individual indicators that represent different dimensions of a concept whose description is the objective of the analysis (Nardo et al., 2005)

Agri-environmental indicator: is a summary measure, combining raw data, used to describe the state of the environment, a risk to the environment, a change in the environment, or a driving force behind such a change, that can be attributed wholly or in part to an agricultural activity or activities (OCDE,2001).

MBE: Mean bias error

RRMSE: relative root mean square error

IA: Willmott's index of agreement

EF: modeling efficiency

ETP: evapotranspiration measured in mm.

II. Material and methods

1. Description of models and indicators

Models and indicators included in the comparison were 6 in number namely: Water deficit, INDIGO, Jeux d'O, Aquacrop, BILHN and CropSyst. There were two reasons for the choice of these models and indicators: firstly, the different degrees of complexity of formalisms and approaches used to reproduce either water balance, nitrogen budget or crop growth development and yield elaboration. They differ by their complexity which is evaluated qualitatively in Table 1, by the number of their equations and parameters. Secondly, these models and indicators were chosen because of their ability to compute different variables of interest. Related details are provided in Table 2.

Table 1. Qualitative Comparison between models and indicators

Model	Water deficit	INDIGO	Jeux d'O	Aquacrop	BILHN	CropSyst
Informatics language	-	Access Visual Basic	Excel	Delphi	Excel	Pascal/Delphi
Number of equations	1	10(For I _{irrig}) 20 (For I _N)	17	>80	70	>160
Number of parameters	-	-	9	20	20	54
Evaluation of the difficulty of a first run learning time	*	***	**	***	****	*****
Initial conditions difficulties	*	***	**	**	****	***

*: Very fast (less than 30 min/no initial conditions required);

** Fast (one day/only soil water content is required);

*** Difficult (1-2 weeks/water and nitrogen data are required);

****Very difficult (more than 2 weeks/water and detailed nitrogen data are required).

Table 2. Models and indicators typology

Indicator/ Model	Used version	type	Typology justification
Water deficit	-	Simple indicator	It is using one type of biophysical variables obtained from a given database. This kind of indicators is classified by Bockstaller et al. (2008) as a simple indicator.
INDIGO (irrigation indicator (I_{irri}) and nitrogen indicator (I_{N}))	v.2.0	Calculation indicator	INDIGO is integrating more than one type of factors, e.g. farm practices and soil conditions. I_{N} is used to assess the environmental impact of nitrogen fertilization and I_{irri} evaluates the effects of an applied water schedule on environment. These aspects define a calculation indicator according to Bockstaller et al. (2008)
Jeux d'O	v.2	Summary model	As defined by Tiftonell et al. (2010), the term summary model has been coined to refer to an approach that summarizes existing knowledge from underlying processes into simple functional relationships that describes the main responses of those processes at the higher integration level under study. In the case of Jeux d'O, such processes are those governing water budget and utilization in plant. Summary functions of growth and water management in the Jeux d'O model are made by a combination of both empirical field data and related expert knowledge.
Aquacrop	v.3.1+	Expert model	Aquacrop model was developed using water management and crop development expert knowledge from major scientific and academic institutions and governmental Organizations worldwide (Steduto et al., 2009). As mentioned in the model's manual, some relations are made on the base of empirical expert data.
BILHN	v.1	Expert model	The developer of BILHN model testifies that the model was developed on the base of using his expertise on crops especially in southwestern France. Functions of growth, water and nitrogen management involved in BILHN model are made basically by using a qualitative approach turned on quantitative relations relating water and nitrogen to crop growth and development.
CropSyst	v.3.04.08	Dynamic partially-mechanistic model	Some authors such as (singh et al., 2008; confolonieri et al., 2006; Stöckle et al., 2003) consider CropSyst as a dynamic mechanistic model. According to Rossiter et al. (2003), a mechanistic model is a model where processes, not just relations, are modelled. However, CropSyst uses some simplifications such as The 'big-leaf' approach to calculating the carbon balance of plant canopies; therefore we are classifying the model as a dynamic partially mechanistic model.

A. Environmental indicators

- Water deficit

Soil water deficit is calculated as described by the following equation:

$$W_D = P + RU - ETP$$

Where W_D (mm) is the soil water deficit, RU (mm) is the soil water storage, P (mm) is the accumulated rainfall during the crop growing season and ETP (mm) is the accumulated evapotranspiration during the crop growing season.

- **INDIGO**

Indicator of overall agri-environmental diagnosis (Bockstaller et al., 1997) was developed by the INRA of Colmar to assess the impact of agricultural practices on the environment. It consists of several composite indicators in relation with practices such as: plant protection, fertilization, irrigation... Only nitrogen (I_N) and irrigation (I_{irrig}) indices will be considered in our case.

-Irrigation indicator (I_{irrig}) is a calculation of the water balance per decade for a giving year by using the following equation (Bockstaller and Girardin, 2007).

$$I_{irrig} = 10 - \text{Max}(D, E) / C$$

Where D (mm) is the drainage, E (mm) stands for an excess of irrigation which is not counted as drainage if a rationing of irrigation is applied, and C is a standard calibration factor to obtain the minimum acceptable value of 7. In fact the range of values from 7 to 10 corresponds in the practical way to the acceptable degree of irregularity in irrigation.

Drainage is calculated as follows:

$$D_i = P2_i - DHP2_i$$

Where $P2_i$ is the deep reservoir recorded for the decade I and $DHP2_i$ is water deficit calculated using the next formula:

$$DHP2_i = RU2 - (R2_{i-1} - ETR2_i)$$

Where $RU2$ is water storage of the deep reservoir, $R2_{i-1}$ is the water filling of the deep reservoir at $i-1$ decade and $ETR2_i$ is the contribution of the deep reservoir of the decade i to elaborate the actual evapotranspiration.

-Nitrogen indicator (I_N) is constructed from three modules based on the calculation of various forms of nitrogen losses: NO_3 leaching, losses of N_2O and NH_3 volatilization.

The table 3 summarizes the different equations used for each form of nitrogen losses.

Table 3. Summary of the nitrogen model equations.

Indicator	Equation	Comments
I_{NH3}	$I_{NH3} = \sum(Dose * CV)$	<p>CV: Coefficient of volatilization extracted from literature and depends on the fertilizer type, its application and the proportion of limestone in the soil.</p> <p>Dose: dose of nitrogen fertilizer expressed in kgN/ha.</p>
I_{NO3}	$I_{NO3} = LP + LH$	<p>LP: leaching risk after a fertilisation input described by:</p> $LP = \sum Li$ <p>Where Li is the leached nitrogen after each input I calculated using the following formula:</p> $Li = Xi' * \text{leaching coeff} (D*ti) * f$ <p>Where: Xi' is the dose of the nitrogen fertilizer used to conclude the volatilization losses.</p> <p>leaching coeff: leaching coefficient of a fertilizer for a “D” drainage (mm) weighted by a ti factor which is a water balance weighting factor.</p> <p>f: the frequency of a wet period that takes place after an application of the fertilizer.</p> <p>LH: leaching risk in winter described by:</p> $LH = N \text{ balance} * \text{leaching Coeff} + N \text{ balance} * D * \text{leaching Coeff}$ <p>N balance: nitrogen input-nitrogen output during winter period.</p>
I_{N2O}	<p>In case of absence of over fertilisation :</p> $I_{N2O} = X' * 0,0125 * C_{soil} * C_{tsoil} * C_{mode} * C_{irr}$ <p>In case of over fertilisation:</p> $I_{N2O} = (X' * 0,0125 + N_{re} * 0,0175) * C_{soil} * C_{tsoil} * C_{mode} * C_{irr}$	<p>Nre: residual nitrogen (kgN/ha)</p> <p>X ': Total dose of nitrogen fertilizer expressed in kgN/ha.</p> <p>Csoil: weighting factor depending on soil type and its proportion of organic matter. It ranks from 1 to 2.</p> <p>Ctsoil: weighting factor taking into account the effect of tillage. Its value is between 1 and 1.5.</p> <p>Cmode: the mode of fertilization weighting factor. Cmode= 1 if the fertilizer is buried and Cmode= 1.10 if not.</p> <p>Cirri: irrigation weighting factor that is equal to 1 if the crop is rainfed and 1.20 if it is irrigated.</p>
I_N	$I_N = \text{Minimum} (I_{NO3}, I_{NH3}, I_{N2O})$	The final indicator is the minimum of losses modules to prevent that a module compensates another.

or each indicator, outputs are converted into scores ranging from 0 to 10, a value of 10 indicates that there were no losses; a value of 7 corresponds to the maximum acceptable value (Bockstaller et al., 2008). In other words, a value of 7 indicates that the applied management is leading to some losses but losses are acceptable if the indicator is not less than 7.

B. Summary model: Jeux d'O

Jeux d'O is a water balance summary model developed in UMR AGIR of INRA Toulouse by Nolot (1991) for his personal use therefore there is no publication on the model. Nolot has mobilised his expertise on Midi-Pyrenees's cropping systems to develop the Jeux d'O model. Jeux d'O summarises the main water balance processes such as drainage, evaporation, transpiration and crop water satisfaction, the model recommends as well an irrigation scheduling but it does not simulate the nitrogen budget. Details of the model's equations are present in appendix 1 then its conceptual model is presented in Appendix 8.

To run Jeux d'O, four modules related to the climate, water management, soil and crop must be filled. The required climate data are: daily records of maximum and minimum temperatures (° C), rainfall (mm) and potential evapotranspiration (mm). Soil is considered as a reservoir defined by its maximum water storage (mm), a percentage of clay (%), and a coefficient of soil structure ranging from 0 to 1 it equals 1 for a perfect soil and decreases with soil problems such as the existing of a clapping layer.

There are nine crop parameters that can be adjusted from the values proposed by default (Table 4).

Table 4. Presentation of the Jeux d'O model parameters.

Parameter	Presentation of the parameter	Unit
Jflo	Degree days required to reach flowering	° day
Frein	Photoperiodic plant break coefficient especially for winter crops	From 0 to 1.
C _{racine}	Root rate progression (degree days required to progress by 1 mm)	° day/mm
C _{vig}	Vigor coefficient defining the inflection of the crop coefficient (Kc), a vigorous plant is designed by a coefficient < 0,5	-
Kmax	Maximum crop coefficient	-
Csto	Soil structure coefficient, a value of 1 corresponds to a good soil structure.	From 0 to 1
Sirri1; Sirri 2; Sirri3	Irrigation threshold that defines a beginning of irrigation.	-

C. Expert model

- Aquacrop

Aquacrop is a water productivity crop model developed by the Land and Water Division of FAO. Aquacrop calculates the water storage but it does not simulate the nitrogen budget. Water storage calculation in various soil horizons is considering the inputs (rainfall, irrigation) and outputs (runoff, evaporation, transpiration, and deep percolation). Infiltration and internal drainage are estimated by an exponential drainage function that takes into account the initial wetness and the drainage characteristics of the various soil layers. The evapotranspiration is separated into evaporation and transpiration by the model, treating the final yield as a function of final biomass and harvest index. Effects of water stress are segregated into four components: canopy growth, canopy senescence, transpiration and harvest index. Indeed, soil water stress affects the development of the canopy cover, the expansion of the root zone, results in stomata closure and a reduction of crop transpiration rate, and alters the Harvest Index. If the soil water stress is severe it can result in failure of pollination, and can trigger early canopy senescence (Raes et al., 2011).

The effects of water stress on stomata conductance, canopy senescence, and leaf growth are expressed through coefficients which vary from 0 to 1. For example, for greater yield needs high carbon dioxide fixation through high stomata conductance and high transpiration (Araya, 2009). A detailed Aquacrop model description is available in Steduto et al. (2009), Raes et al. (2009) and Raes et al., (2011) and summarized in appendix 2. Aquacrop conceptual model is present in appendix 7.

- **BILHN**

BILHN is a water and nitrogen management model developed in UMR AGIR of INRA Toulouse by Nolot (2004). BILHN was designed for use in the SGCI program (Systèmes de Grandes Cultures Intégrés) where crop management strategies, with contrasting irrigation opportunities, were evaluated using 8-years of experiments and simulations (Debaeke et al., 2008). BILHN model is developed under excel with five modules namely: climate, soil, crop, management and bioagressors.

Input and Output related to the water budget in the model includes precipitation, irrigation, actual and potential crop transpiration, soil evaporation, drainage. A water stress index is calculated as the ratio between actual to potential transpiration.

Data related to nitrogen budget provided by the model are nitrogen leached, denitrification, mineralization, nitrogen absorbed by the crop and percentage of nitrogen in the grain.

The calibration of BILHN requires the adjustments of 20 parameters (Table 5) compared to reference values calibrated on cultural characteristics observed at Auzeville, southwestern France.

Detailed description of equations in the model is summarized in appendix 3. The general conceptual mode is summarized in appendix 9 and detailed conceptual functioning of each model is summarized in appendix 10.

Table 5. Presentation of the BILHN model's parameters.

Parameter	Description	Unit
Topt	Optimal temperature for growth	°C
Cracine	Root rate progression (degree days required to progress by 1 mm)	° day/mm
zero	The base temperature	°C
Jflo	Degree days required to reach flowering	° day
Cycle2	Multiplication factor that defines the duration of the period from flowering to physiological maturity.	-
IMS	Biomass production index	-
Csto	Index of stomatal control to distinguish between anisohydric and isohydric plants	-
CoefH	Water stress index	-
CoefN	Nitrogen stress index	-
C _{NP}	Ratio of plant by grain Nitrogen content.	-
C _{vig}	Vigor coefficient defining the inflection of the crop coefficient (Kc), a vigorous plant is designed by a coefficient < 0,5	-
Sirri1;Sirri2; Sirri3	Irrigation threshold that defines a beginning of irrigation.	-
b1;b2;b3	Nitrogen plant requirements for 3 development stages to reach the optimal grain yield	Kg N/q
dmal	Index of Beginning the pest attack	-
mal	Degree of pests damage	-
RDT p	Potential yield	q/ha
%LG	Proportion of legume crops	%

D. Complex model: CropSyst

CropSyst Model (Cropping Systems Simulation Model, Stöckle and Nelson, 1997) serves as an analytical tool to study the effect of climate and management on cropping system productivity and the environment (Wang et al., 2006). Crop phenological evolution is determined by thermal time (degree per days, the cumulative air temperature above a base temperature) (Stöckle and Nelson, 1997). Plant growth is simulated as a potential growth calculated from potential transpiration and radiation use efficiency, then actual biomass is calculated after applying water, nitrogen and temperature stress indexes (Belhouchette et al., 2008). These quantities are used as indicators of the plant response to environmental conditions. All these indices range from 0 to 1, where 0 is no stress and 1 is maximum stress (Stöckle and Nelson, 1997).

According to Singh et al. (2008), Water budget in the model includes precipitation, irrigation, runoff, interception, water infiltration, and water redistribution in the soil profile, crop transpiration, and evaporation. Users may select different methods to calculate water redistribution in the soil profile and reference evapotranspiration. Water redistribution in the soil is handled by a simple cascading approach or by a finite difference approach to determine soil water fluxes.

Nitrogen budget in CropSyst includes N transformations, ammonium sorption, symbiotic N fixation, crop N demand and crop N uptake. Nitrogen transformations of net mineralization, nitrification and denitrification are simulated. The water and nitrogen budgets interact to produce a simulation of N transport within the soil.

A process such as yield elaboration or crop transpiration is simulated by all selected models. However every process is modelled with specific mechanistic details depending on the main objective of each model.

The conceptual model of CropSyst is present in appendix 6.

The table 6 shows comparison of some methods of calculation related to different variables used in each model.

Table 6. Comparison of the different calculation approaches used in Jeux d'O, Aquacrop, BILHN and CropSyst.

Calculation approach	Models				
	Concerned variable	Jeux d'O	Aquacrop	BILHN	CropSyst
Penman–Monteith	Evapotranspiration		X		X
Priestley Taylor	Evapotranspiration				X
Separating (E) and (Tr)	Transpiration (Tr) and evaporation (E)	X	X	X	X
Richie Approach	Soil evaporation	X	X		
finite difference method	Soil evaporation				X
Water stress integration in the (Tr) calculation	-Water stress index -crop transpiration		X		
Absorbed water = Transpiration	Transpiration				X
The method of « curve number » as described by the USDA-SCS	runoff		X		X
Richard's equation solved by a finite difference method	infiltration				X
Cascade method	infiltration	X	X		X
Deep percolation consideration	Deep percolation		X		X
Capilarity rise	Capilarity rise		X		X (for finite difference method)
Production function	Yield	X	X		
Light conversion to biomass	Yield				X
Day temperature conversion to biomass				X	
Harvest index includes an adjustment of the water stress	Waters stress index Harvest index		X		X
Biomass accumulation integrates water stress index	Waters stress index biomass			X	X
Biomass accumulation integrates a nitrogen stress index	Nitrogen stress index biomass			X	X
Effect of the water stress on the canopy cover			X		
Effect of bioagressors on biomass				X	

2. Data set for models inputs

Dataset involving 36 experimental units, distributed across 4 sites of the Midi-Pyrenees region and one site of the Aquitaine region in south western France, was used to compare different indicators and models outputs. The maize cropping systems differed in terms of sowing date, maize variety, nitrogen fertilization and water management (table 7).

Most of the required meteorological data are daily records of precipitation, maximum and minimum temperature, solar radiation and evapotranspiration that are provided by each site's weather station. Soil measurements were made independently for each site; the main related data are summarized in Appendix 4.

Table 7. Summary description of the experimental sites

Site name and GPS coordinates	Department	Years of rotation	Sowing date	Maize variety	Plot name	Water management (mm)	N management (kg N/ha)
Lamir (43°N43', 0°E 58')	Gers	1986-1988	16/05/86	Sabrina	T0	0	170 -232
			21/05/87	Sabrina			
			11/05/88	Sabrina			
		1986-1989	13/05/86	Sabrina	T4	190 - 282	212 -232
			21/05/87	Sabrina			
			11/05/88	Sabrina			
Parizot (43°N25', 1°E46')	Tarn	1991-1996	16/04/91	Volga	P2	0	150 /200
			08/05/92	Volga	P4	0	150 /200
			05/05/93	Volga			
			07/05/94	Volga			
			05/05/95	Volga			
			16/05/96	Natalia			
Bouillac(43°N50', 1°E07')	Tarn-et-Garonne	1996-2000	06/05/96	cecilia	T1	120 - 210	200
			14/05/97	cecilia			
			16/05/98	cecilia			
			11/05/99	cecilia	T3	120, 123, 150	150
			09/05/00	cecilia			
			Bergerac (44°N85', 0°E48')	Dordogne	2007	20/04/07	Dk315
	Dk315	d-				35	247
	Dk315	t+				152	247
	Dk315	t-				35	247
Crambade (43°N25', 1°E39')	Haute Garonne	1990-1991	02/05/90	Volga	T1	172-330	0
			02/05/91				
				Volga	T3		
			Volga	T4			

From the experimental sites 8 different situations were extracted. They correspond to a combination of location X water and/or nitrogen management X soil characteristics. The code used to identify each situation is constructed first by the initial letters of the studied site, and then nitrogen management followed by water management and concluded by the soil name in the case there is a difference between soil water storage in the same site. The explanation of each situation nomenclature is detailed in table 8. Each combination of situation X year corresponds to a simulation in all models expected in CropSyst model where, a simulation corresponds to a rotation per situation. For example, to the LA*N+*Rain*To situation from 1986 to 1988, 3 simulations were performed for Aquacrop, Jeux d'O and BILHN models while only one simulation of 3 years of rotation was run in CropSyst model.

Table 8. Presentation of the studied situations.

Situation nomenclature	Site location	Nitrogen management	Water management	Soil water storage (mm)	comment
LA*N+*Rain*To	La=Lamir	N+ = application of nitrogen fertilizer	Rain=rainfed	208	In Lamir site we distinguish 2 situations differing by water management and soil storage
LA*N+*Irri*T4	La=Lamir	N+ = application of nitrogen fertilizer	Irri= Irrigated	180	
Pa* N+*Rain*P2	Pa=Parizot	N+ = application of nitrogen fertilizer	Rain=rainfed	200	In Parizot site we distinguish 2 situations differing by soil storage
Pa* N+*Rain*P4	Pa=Parizot	N+ = application of nitrogen fertilizer	Rain=rainfed	180	
Be*N+*Irri+	Be=Bergerac	N+ = application of nitrogen fertilizer	Irri+ = well irrigated	180	In Bergerac site we distinguish 2 situations differing by irrigation management
Be*N+*Irri-	Be=Bergerac	N+ = application of nitrogen fertilizer	Irri- = Low level of irrigation (35 mm)		
Bo*N+*Irri	Bo=Bouillac	N+ = application of nitrogen fertilizer	Irri= Irrigated	159	One situation in Bergerac site
Cr*N-*irri	Cr=Crambade	N- =Without nitrogen fertilizer	Irri= Irrigated	180	One situation in Crambade site

3. Calibration assumptions

Crop models require detailed set of internal parameters and input data. Some of them cannot be easily measured or determined. The user has to face the task of determining the parameters required to calibrate and how to do it (Cameira et al., 2005). In our case, applying many crop models to a large area in order to compare them is hampered by many difficulties which are:

- (1) Even though a same process is simulated, each model uses a specific formalism. Consequently deferent parameters have to be considered for each model calibration.
- (2) Even though a same parameter exists in two models, their sensitivity to the parameter may be different.
- (3) As defined by Singh et al. (2008), model calibration or parameterization is the adjustment of parameters so that simulated values compare well with the observed ones. Therefore usually results of several (at least two or three) experiments are used to ensure the calibration phase (Bechini et al, 2006; Shili-Touzi et al., 2010; Araya et al., 2010). In a large area, calibrating a model for a whole region on the basis of two or three specific local experiments may faithfully reproduce the characteristics of the calibrated experiments but not those of the overall region

because of its variability. Therefore it may lead to inaccuracy and influence on the variability of the studied area.

- (4) Given that our main objective is to compare the output of different crop models. If each model is calibrated differently, obtained results may come from either the model's performances or the procedure of calibration of the user.

For these reasons we elected to only modify model parameters corresponding to the degree days required to reach each phenological stage of every maize variety (Appendix 5) and to use the default parameter values proposed by each model for all the other parameters.

4. Initial conditions and simulation

Initial conditions of soil moisture and nitrogen in soil for each simulation in five different sites for several years from 1986 to 2007 would have been very difficult even impossible to determine therefore some assumptions were taken. From one hand, we decided to choose one date of beginning for all the simulations for all models; this date was the 1st of January because usually at this period of the year in all sites, soils are at their field capacity. In the other hand, discussions with experts of the midi-Pyrenees region helped us to take a second assumption about nitrogen budget in soil. At the January the 1st all soils contain 50 kg mineral N/ha.

The four Models were run from the first of January to December 31 of the last year of rotation.

5. Comparison of model and indicators performance

A. Model performance for phenology simulation

Observed flowering dates were missing but the requirement of each variety in degree days to reach anthesis were provided. Thus a manual calculation of real dates of flowering will replace observed data. Then a calculation of standard deviation between observed and manually calculated dates will provided in addition to graphical comparison between both cases.

Calculation of thermal time accumulation used following equations:

$$CGD_{day} = CGD_{day-1} + GD_{day}$$

$$\text{And } GD_{day} = T_{avg} - T_{base}$$

$$\text{where } T_{avg} = \begin{cases} T_{base} & \text{if } T_{avg} < T_{base} \\ T_{cutoff} & \text{if } T_{avg} > T_{cutoff} \\ (T_{max} + T_{min}) / 2 & \text{otherwise} \end{cases}$$

Where GDday (°C-days) is today's thermal time, CGDday (°C-days) is today's accumulated thermal time since planting, Tbase, Tcutoff are crop input parameters that define the range of temperatures for viable development in our case Tbase= 6°C and Tcutoff= 30°C , Tmin (°C) is the daily minimum air temperature and Tmax (°C) is the daily maximum air temperature.

B. Model performance for yield simulation

To assess the agreement between model simulations and observed grain yield, graphical plots were made and judged qualitatively. It is acknowledged that if model output can be presented in appropriate formats, direct visual comparisons of models with data can yield significant insights about model performance (Bellocchi et al., 2009). The qualitative assessment was followed by a Statistical analysis using indices to make comparisons reproducible, objective and quantitative. Four statistical measures were chosen.

- Mean bias Error (MBE)

MBE was selected because it provides information on the long term performance of the model (Katiyar et al., 2010). It is calculated as described by Siosemarde and Byzed (2011) in the equation (1)

$$MBE = \sum_{i=1}^n [(P_i - O_i) / n] \quad (1)$$

Where n is the sample size, O_i and P_i are the observed and the predictive grain yield values respectively. A low MBE is desirable. Ideally a zero value of MBE should be obtained. A positive value gives the average amount of over-estimation in the calculated and negative underestimate (Katiyar et al., 2010).

- Modelling efficiency (EF)

The model efficiency was calculated using Eq (2). EF was chosen because it allows straight identification of inefficient models: The zero or negative value means that the average value of all measurements (\bar{O}) is a better predictor than the model (Confalonieri et al., 2009).

It varies from minus infinity for a poor model to 1.0 for a perfect model (Absullah, 2009). If positive, the model is a better predictor than the average of measured values (Confalonieri and Bechini, 2004).

$$EF = 1 - \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]}{\left[\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2 \right]} \quad (2)$$

- Relative root mean square error (RRMSE)

RRMSE is a derived statistics of the mean square error used because it measures the mean absolute difference between observed and estimated values (Bellocchi et al., 2009). The value of RRMSE was calculated using the formula (3) as described by Belhouchette (2004):

$$RRMSE = \frac{\left[\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 / n \right]^{0.5}}{\bar{O}} \times 100 \quad (3)$$

Where O_i and P_i are the observed and the predictive values, respectively, \bar{O} is the average of the observed values. The model shows perfect fit to observed data when RRMSE value is close to zero.

- Willmott's index of agreement (IA)

As reported by Nath and Patil (2006), IA was proposed by Willmott (1981) as an alternative to r (correlation coefficient) and r^2 (coefficient of determination). IA can have values within the range [0, 1], and values close to 1 indicate high simulation quality (Palosuo et al, 2011). It is used in our case because it can detect additive and proportional differences in the observed and simulated means and variances; and it is overly sensitive to extreme values due to the squared differences (Legates and McCabe, 1999).

The index is given by Eq (4).

$$IA = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - O_i| + |P_i + O_i|)^2} \quad (4)$$

According to Bellocchi et al (2009), the combination of multiple assessment metrics and the setting of criteria have evolved into formal structures. It is regarded as a positive step in achieving robust assessments. Therefore, as used by Stöckle (1999) and reported by Bellocchi et al (2009) RRMSE and IA will be taken together. The Upper and lower limits were suggested for a solid judgment on the model performance: good when $RRMSE \leq 10\%$ and $IA \geq 0.95$, acceptable when $10\% \leq RRMSE \leq 20\%$ and $IA \geq 0.90$, poor with other values.

C. Models and indicators assessment of water and nitrogen budget

Variables used to illustrate water budget are: evaporation, transpiration, evapotranspiration, drainage and water content at a fixed date (15 June) and at flowering.

Variable used for nitrogen budget is the nitrogen leached.

Observed measures of water budget were not available. Some quantities of leached nitrogen were available for tow sites but there was not any indication about the used method of quantification and units of the available values. Therefore they are considered as missed data as well. The aim of this section is to illustrate the variability of outputs between models and indicators. It will be done using graphical illustrations. Then indicators interpretation will be qualitatively compared to models output to assess consistency between the two types of outputs.

III. Results

1. Model performance for phenology simulation

CropSyst model simulates the following phenological stages: emergence, flowering, physiological maturity and grain filling while Jeux d'O and BILHN simulate emergence, flowering and physiological maturity only. This last stage is not simulated by Aquacrop model that reproduces emergence, flowering and grain filling. Accordingly only emergence and flowering are simulated by our four models and can be compared between them. From the other hand, emergence is not a varietal characteristic and it is fixed to 80 degree days for maize crop while flowering varies from one variety to another. Moreover anthesis is a key stage for yield elaboration. Therefore only flowering simulation will be compared between models.

The number of days required to start anthesis by each model is compared to a manually calculated flowering date. Results are shown in Fig.2. Crop phenology was closely predicted for anthesis, by CropSyst, BILHN and Aquacrop model whereas Jeux d'O clearly over estimated it. Surprisingly, even though Jeux d'O and BILHN use the same formalism of degree days accumulation, their simulation to the date for starting of anthesis is different.

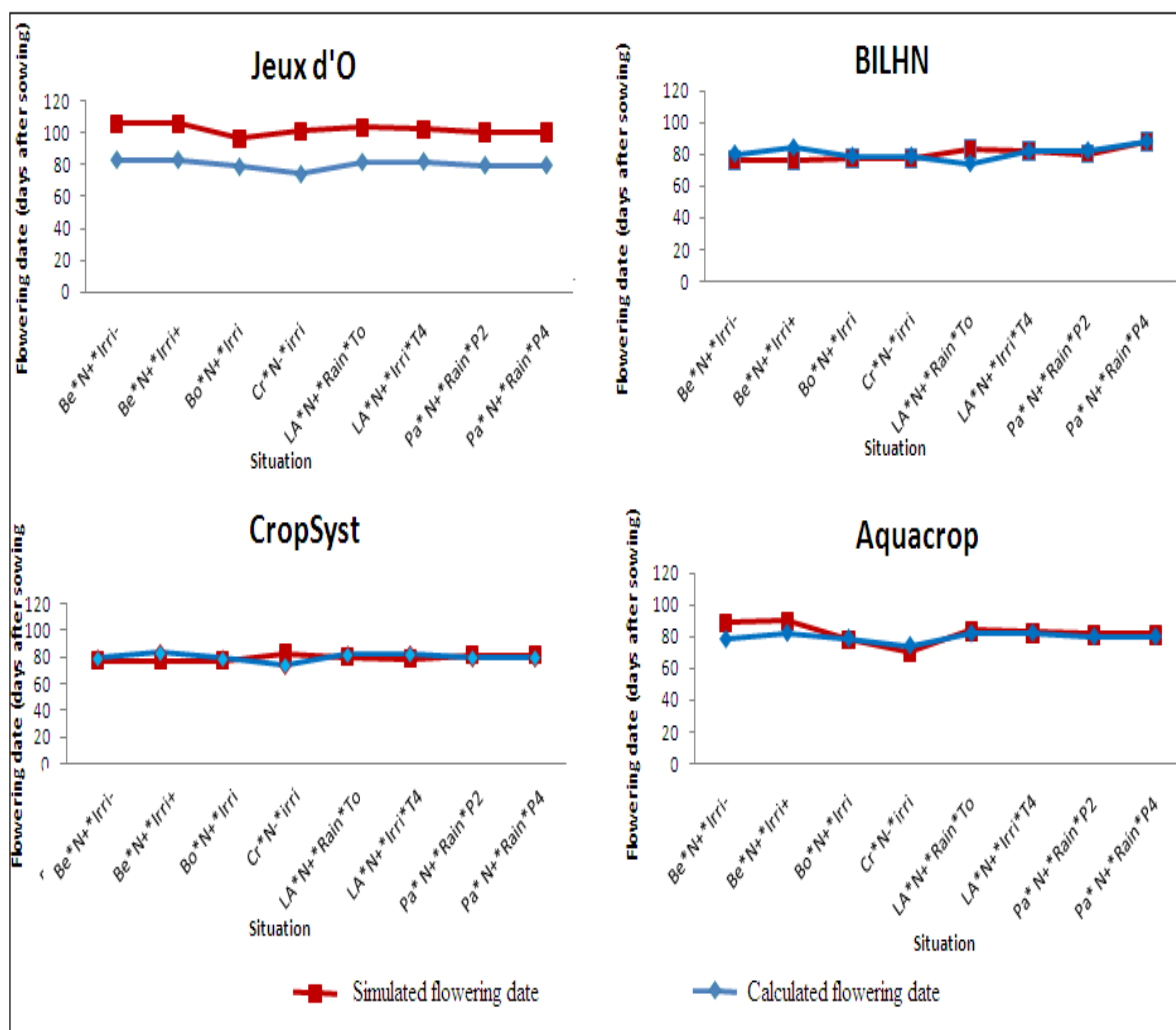


Fig. 2. Average calculated (blue line) and average each model simulated (red line) number of days required to reach the flowering phase for 8 different situations in the Midi Pyrenees region.

2. Model performance for yield simulation

A statistical analysis of the results of comparison between observed and model-predicted yields is presented in Table 9. It globally shows that none of the models perfectly reproduced observations at all situations. The combination of RRMSE and IA analysis show that the best performance regarding yield estimation was for Jeux d'O model. It was classified twice as a good model: with a RRMSE value of 9.10% and an IA=1 in the Lamir site under irrigation and in the Parizot site under rainfed condition it gives a RRMSE of 10% and an IA of 0.99. The model gives also an acceptable grain yield prediction in 2 other situations where RRMSE and IA values were respectively. 10.30%, 12% and 0.99 and 1.

BILHN had a good performance prediction in "Be*N+*Irri-" situation with a RRMSE of 9.40% and an IA of 1. BILHN simulation was acceptable in two situations: "Be*N+*Irri+" and "Bo*N+*Irri".

Aquacrop gives an acceptable prediction of grain yield in Lamir and Bergerac sites under irrigated conditions. While CropSyst Model simulated in an acceptable way only one situation (in Lamir site under rainfed conditions).

CropSyst clearly systematically underestimated yields. In fact, MBE varies from -7.35 q/ha to -83,3 q/ha. Furthermore higher EF values were calculated for CropSyst model while best values of EF were given by Jeux d'O model.

Table 9. Calculations of mean bias error, modelling efficiency, relative root mean square error and index of agreement of maize grain yield in 8 situations in the midi Pyrenees region

Situation	Model	N	Observed	Simulated	MBE	EF	RRMSE (%)	IA
			Average	Average	(q/ha)			
LA*N+*Rain*To	Aquacrop	3	68.00	96.87	28.87	-1.58	43.10	0.98
	CropSyst	3	68.00	60.65	-7.35	0.43	20.0	0.99
	BILHN	3	68.00	86.00	18.00	-0.26	30.10	0.99
	Jeux d'O	3	68.00	73.30	5.29	0.30	22.40	0.99
LA*N+*Irri*T4	Aquacrop	4	96.00	79.20	7.88	0.61	10.20	1.00
	CropSyst	4	96.00	31.00	-62.71	-14.88	65.40	0.85
	BILHN	4	96.00	96.00	27.40	-2.08	28.80	0.98
	Jeux d'O	4	96.00	101.03	4.93	-1.54	9.10	1.00
Pa* N+*Rain*P2	Aquacrop	6	91.00	70.52	-20.50	-40.16	44.10	0.95
	CropSyst	6	91.00	12.70	-78.32	-155.70	86.20	0.81
	BILHN	6	91.00	96.50	5.43	-12.13	25.00	0.98
	Jeux d'O	6	91.00	95.40	4.40	-1.14	10.00	0.99
Pa* N+*Rain*P4	Aquacrop	6	91.00	45.10	-46.40	-76.14	54.40	0.92
	CropSyst	6	91.00	12.80	-78.70	-192.40	86.10	0.81
	BILHN	6	91.00	95.16	3.70	-14.43	24.30	0.99
	Jeux d'O	6	91.00	97.00	5.51	-1.80	10.30	0.99
Be*N+*Irri+	Aquacrop		125.15	133.42	8.27	-1.44	15.30	1.00
	CropSyst	2	125.15	82.77	-12.52	-12.88	36.60	0.97
	BILHN	2	125.15	129.00	3.86	-1.09	14.20	1.00
	Jeux d'O	2	125.15	91.40	-33.75	-8.53	30.30	0.98
Be*N+*Irri-	Aquacrop	2	109.47	133.61	24.14	-5.84	23.90	0.99
	CropSyst	2	109.47	83.53	-7.98	-6.74	25.40	0.98
	BILHN	2	109.47	107.00	-2.47	-0.06	9.40	1.00
	Jeux d'O	2	109.47	77.30	-32.17	-10.37	30.30	0.98
Bo*N+*Irri	Aquacrop	10	101.00	75.00	-26.14	-16.13	33.20	0.97
	CropSyst	10	101.00	16.00	-78.30	-170.90	80.40	0.82
	BILHN	10	101.00	110.00	8.90	-2.90	15.80	0.99
	Jeux d'O	10	101.00	106.00	4.92	-14.11	31.90	1.00
Cr*N-*irri	Aquacrop	6	98.90	63.00	-35.92	-12.35	37.80	0.96
	CropSyst	6	98.90	15.60	-83.30	-66.00	84.60	0.82
	BILHN	6	98.90	73.67	-25.27	-6.38	28.10	0.98
	Jeux d'O	6	98.90	98.10	-0.85	-0.36	12.00	1.00

Statistical analysis results are partly confirmed graphically by Fig.3. It shows that best agreement between observed and simulated maize grain yield is represented by Jeux d'O and BILHN models while the worst one is represented by CropSyst model.

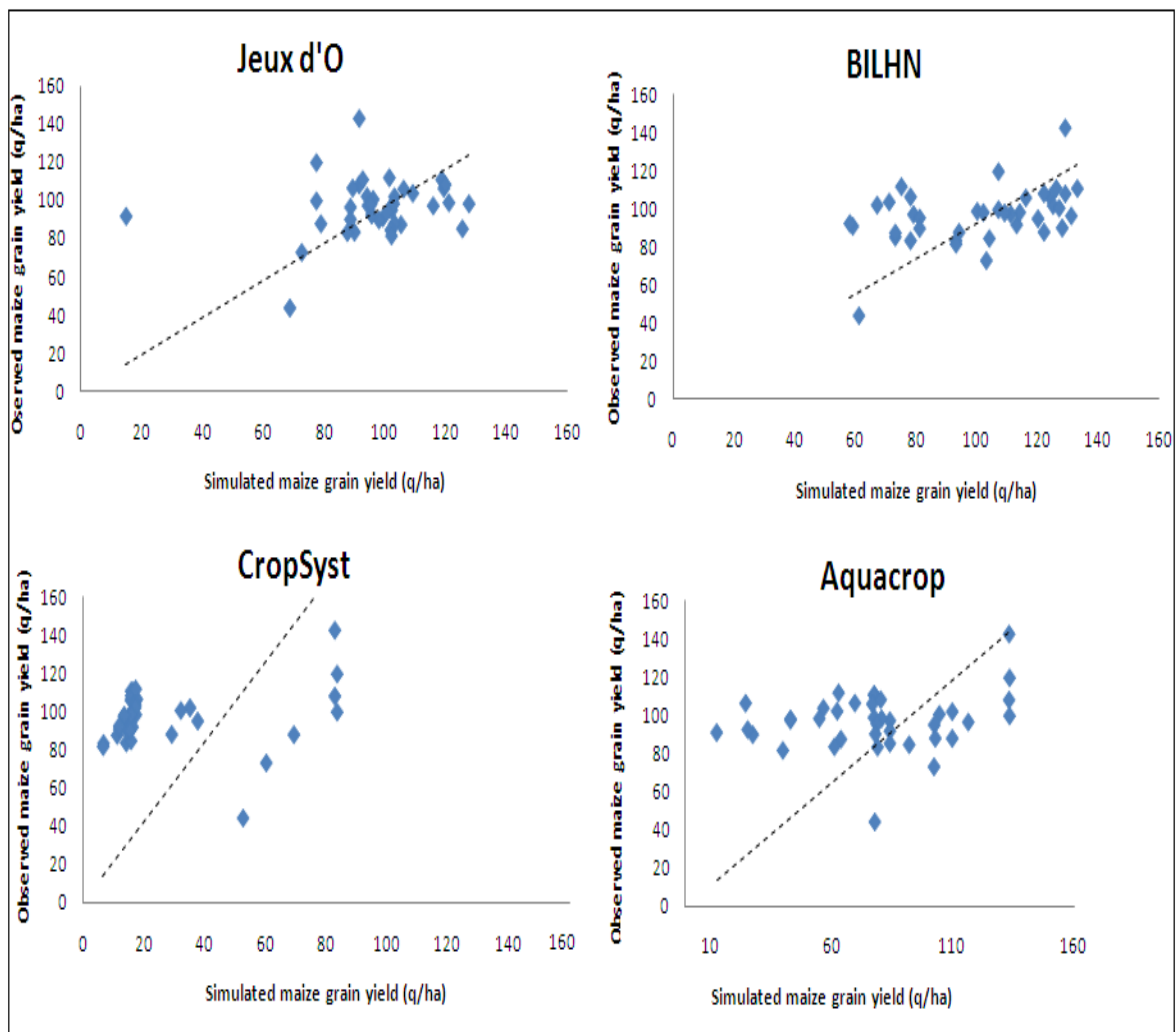


Fig. 3. Simulated and observed grain yield estimates (q/ ha) for 39 studied case from 1986 to 2007 in 5 sites under different water and nitrogen strategies. Simulation results are shown for the four individual models. The 1:1 line is shown, representing perfect agreement.

Inter-annual average and variability of predicted maize grain yield at single sites by each model is presented in Fig .4. It aims to show general capacity of each model to discriminate average site yield. BILHN well-reproduces average observed grain yield behavior for 7 situations from 8 in absolute and relatively between sites. BILHN underestimated grain yield in Crambade site only. Jeux d'O model simulations were as well in close agreement with observed yield tendencies excepted in Bergerac site, where yield was underestimated. CropSyst model clearly underestimated grain yield for all situations and Aquacrop underestimated it for 5 situations and overestimated it for 3 others.

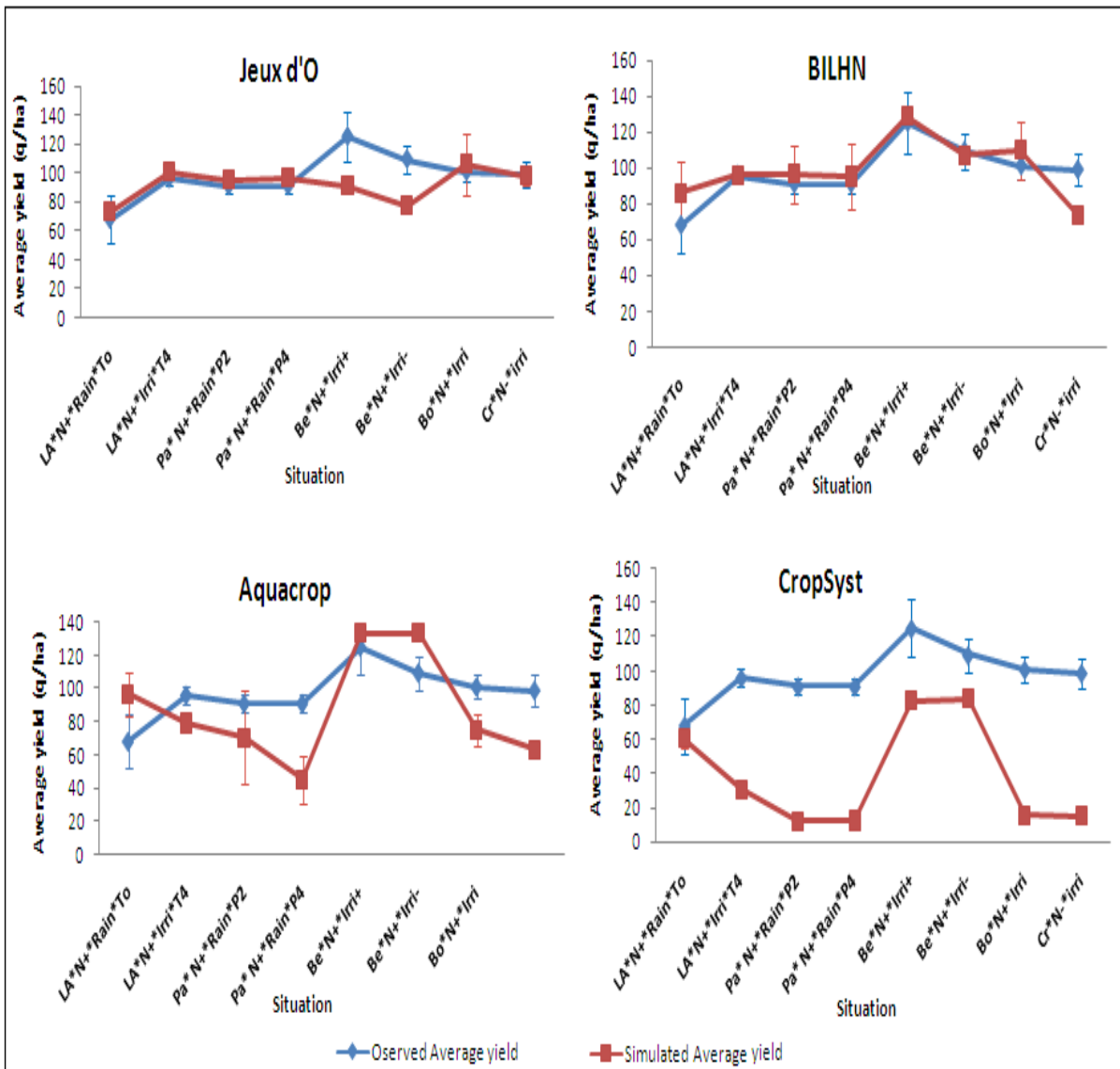


Fig. 4. Inter-annual average observed (blue line) and average each model simulated (red line) maize grain yield and the standard deviation for 8 different situations in the midi Pyrenees region.

Observed yields were accurately reproduced by the mean estimates from BILHN and Jeux d'O models as confirmed statistically and graphically.

Palosuo et al., (2011), showed that mean model predictions (the average of outputs of used models) can be a good better predictor (than, each model outputs) of observed grain yield. Accordingly we tested the agreement of our four models prediction with observed yields. Results are shown in Fig.5.

Fig. 5. Shows that despite the discordance of CropSyst and Aquacrop to simulated grain yield, the average predicted grain yield of BILHN, Jeux d'O, CropSyst and Aquacrop led to a good agreement with observed yield for 7 situations excepted (Cr*N-*Irr) situation where mean model prediction slightly over estimated yields.

In this comparison, BILHN and Jeux d'O (Fig.4) simulates for maize grain yield still better than all models average prediction.

If model results are not close to each other, dispersion between them will spread out over a large range of values. More interval of variability is large more the probability that observed yields will be included in this range is large. Hence variability between models lead to a bigger standard deviation that can explain that their average predictions became close to observed values despite the discordance of some ones. Therefore mean values only are not sufficient and were followed by a representation of the variability between models across the 8 different situations (Fig. 6).

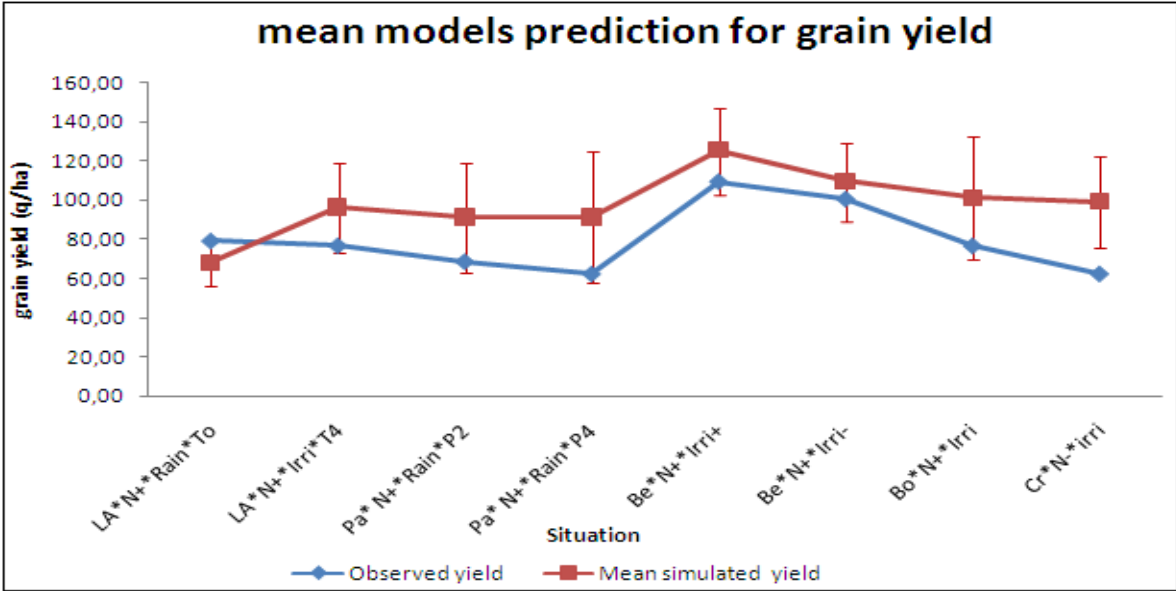


Fig.5. Mean model estimates (red line) for grain yield and their standard deviation compared to observed (blue line) grain yield for 8 situations.

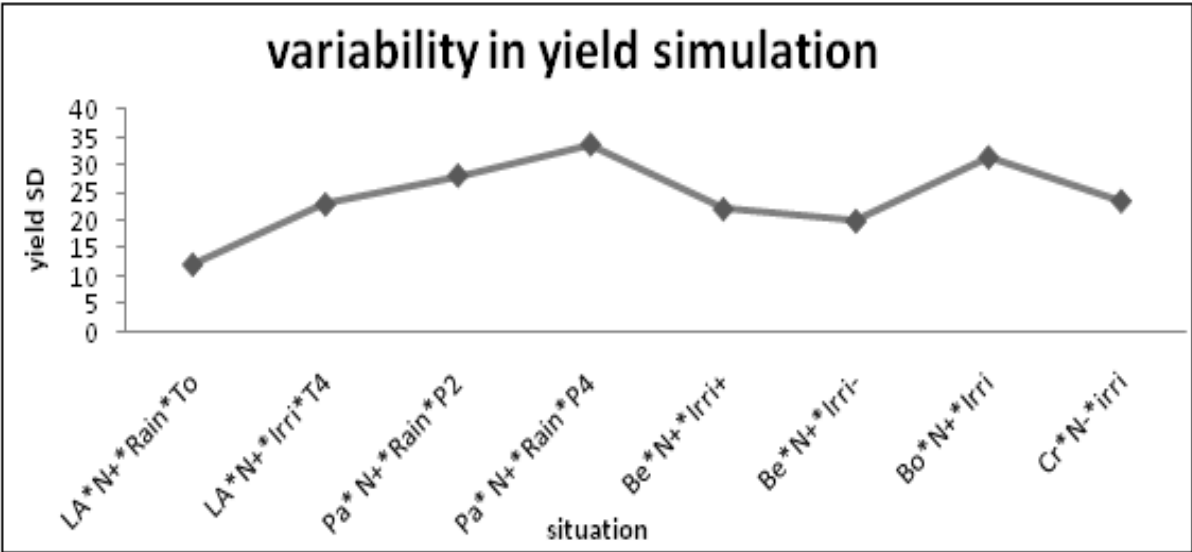


Fig.6. Yield variability (based on standard deviation calculation) simulated for 8 different conditions.

3. Models and indicators assessment of water and nitrogen budget

A. Water budget

Water components are in close relationship with yield elaboration in the conceptual functioning of the four models. Therefore, even if corresponding observed data are missing, variability between model simulations will be presented and compared to indicators interpretation.

Fig.7. shows average and standard deviation simulation for evaporation, transpiration, evapotranspiration and drainage corresponding to 8 different situations.

Evaporation simulated by Jeux d'O and BILHN model varies slightly between situations. Aquacrop and CropSyst simulated maximum evaporation in Lamir site but each for a different water management and soils conditions.

Maximum transpiration is simulated by CropSyst and Aquacrop models to be in the same site (Bergerac) but under different water schedules, while maximum transpiration is recorded to be in Bouillac and Crambade according to BILHN and Jeux d'O respectively. There are substantial discrepancies in the estimates for maximum minimum and tendencies of drainage, evaporation and transpiration between models.

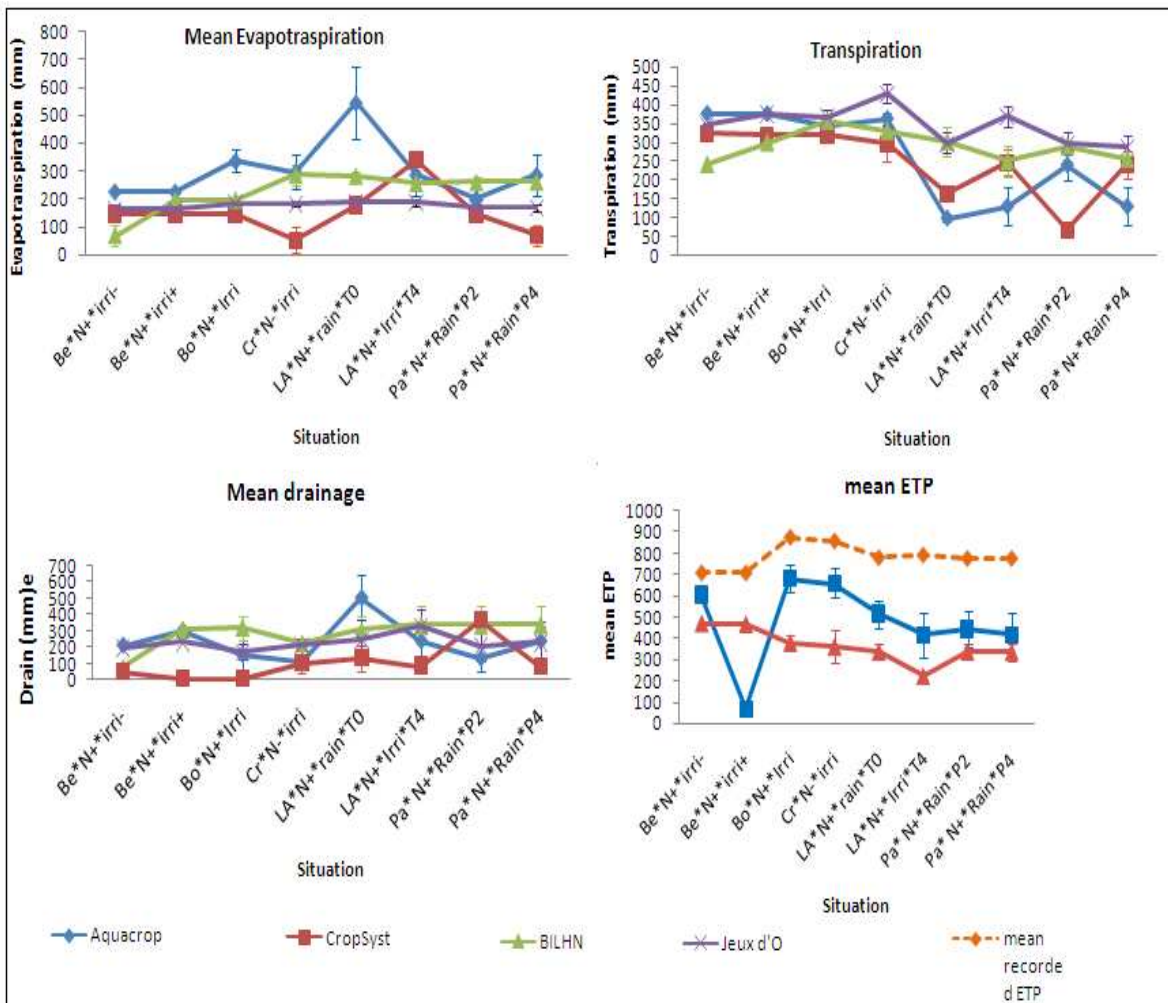


Fig.7. Comparison of mean simulated evaporation, transpiration, drainage and evapotranspiration of Aquacrop (blue line), CropSyst (red line), BILHN (green line) and Jeux d'O (purple line) models under 8 different situations. Real records of mean ETP from climatic data are compared to simulated ETP (orange line).

ETP is simulated by CropSyst and Aquacrop models whereas BILHN and Jeux d'O use the recorded daily ETP that must be defined as input weather data. Therefore only CropSyst and Aquacrop are shown in the ETP plot of Fig.6. Simulated quantities of ETP are quite different but they represent the same tendencies for 7 situations from the 8. At Bergerac site under 152 mm of irrigation (Be*N+*irri+) ETP simulated by the Aquacrop model drops notably which is not the case of CropSyst model. Real records of ETP show that that drop does not exist.

Despite discordance in simulating evaporation and transpiration tendencies under different conditions by CropSyst and Aquacrop models, their simulation for evapotranspiration (their sum) led to a similar behavior with larger quantities for Aquacrop. Differences seem to be compensated for ETP simulation.

Evaporation, transpiration, ETP and drainage in 8 different situations were simulated differently by each model. Therefore we tried to show variability in models response for these variables across situations and years in Fig.8.

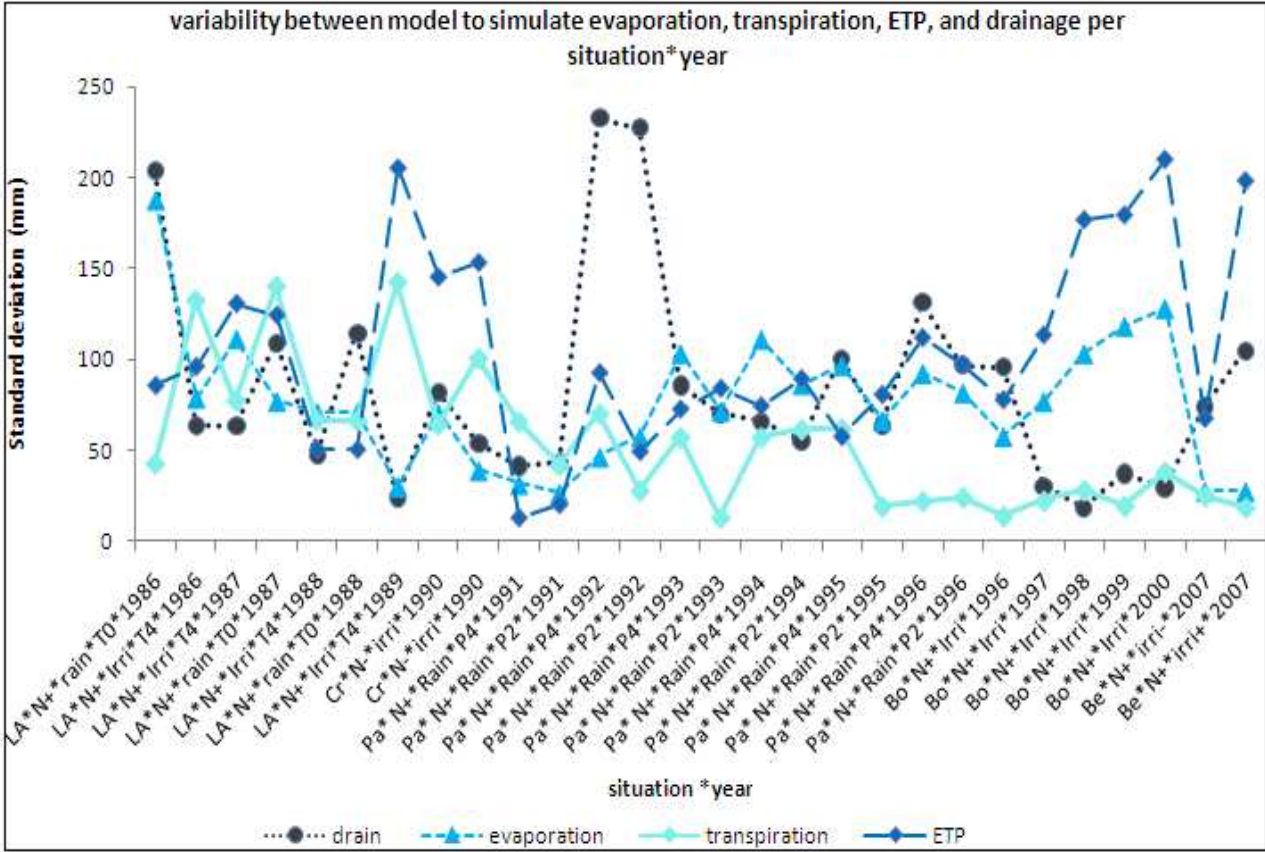


Fig.8. Model dispersion based on standard deviation calculation between models for four water components variables (evaporation, transpiration, ETP and drainage) from 1986 to 2007 for 8 different situations.

Fig.8. shows that simulated evaporation, transpiration, ETP and drainage are spread out over a large range of values. Indeed evaporation varies from 5 to 200 mm; transpiration ranges from 5 to 140 mm, and drainage fluctuate between 6 and 230 mm.

This dispersion in simulating key variables of water budget can explain variability in yield simulation. Water use in soil is in relationship with soil type, weather conditions and much more other factors that exceed evaporation and drainage. A comparison between simulated soil water content in two different dates may be interesting. Thus water content on 15th of June and on flowering during every growing season is simulated by all models for each situation. Results are shown in Fig. 9.

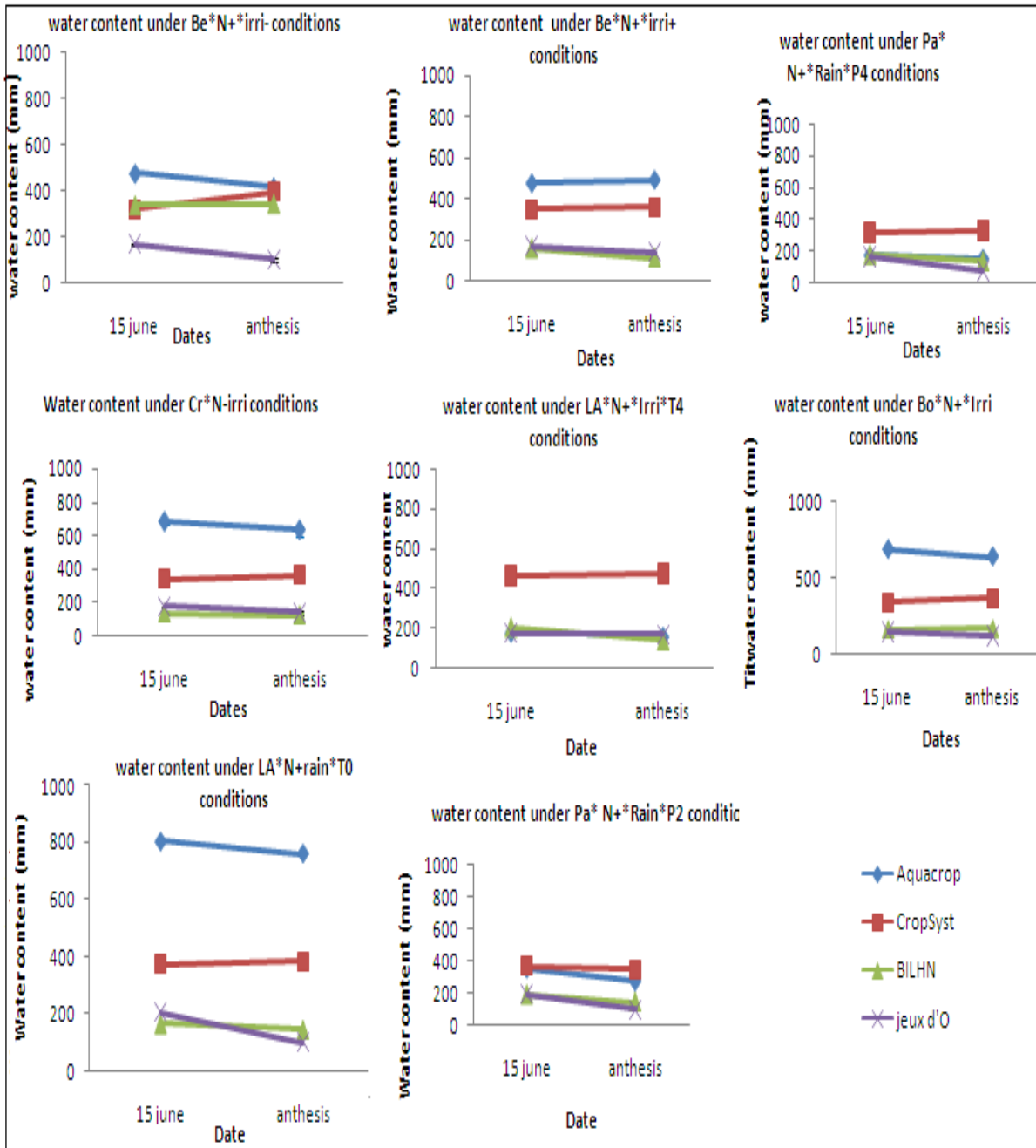


Fig. 9. Simulation of water content on 15th of June and on flowering during growing seasons of 8 different situations.

Only in Bergerac site under irrigated condition Jeux d'O and BILHN simulated water content differently otherwise they reproduce similarly water content on different stages of growth.

Aquacrop has the most important simulated quantities on 5 sites from 8 and in two others it reproduces what BILHN and Jeux d'O simulated. While at the Parizot site (Pa*N+*Rain*P20 situation), Aquacrop and CropSyst simulated similarly water content at these two key stages that are important to decide any irrigation schedules.

Fig.7, fig. 8 and fig.9 show that there were substantial discrepancies in simulating different components of water budget.

Water budget can also be evaluated using simple indicators as water deficit or agri-environmental indicators such as INDIGO I_{irri} indicator. Results of water deficit calculation per situation and values of INDIGO I_{irri} are represented in Fig.8 and table 10 respectively.

Fig.10. indicates that the most important water deficit is recorded in Crambade site and lowest water deficit corresponds to Bergerac site. It is in concordance with the fact that irrigation in Bergerac site can reach 330 mm which is the maximum applied water quantity over situations and years, while minimum applied water quantity is in Crambade site. To go further we can compare water deficit to the applied water schedule to assess its adequacy (Table 12).

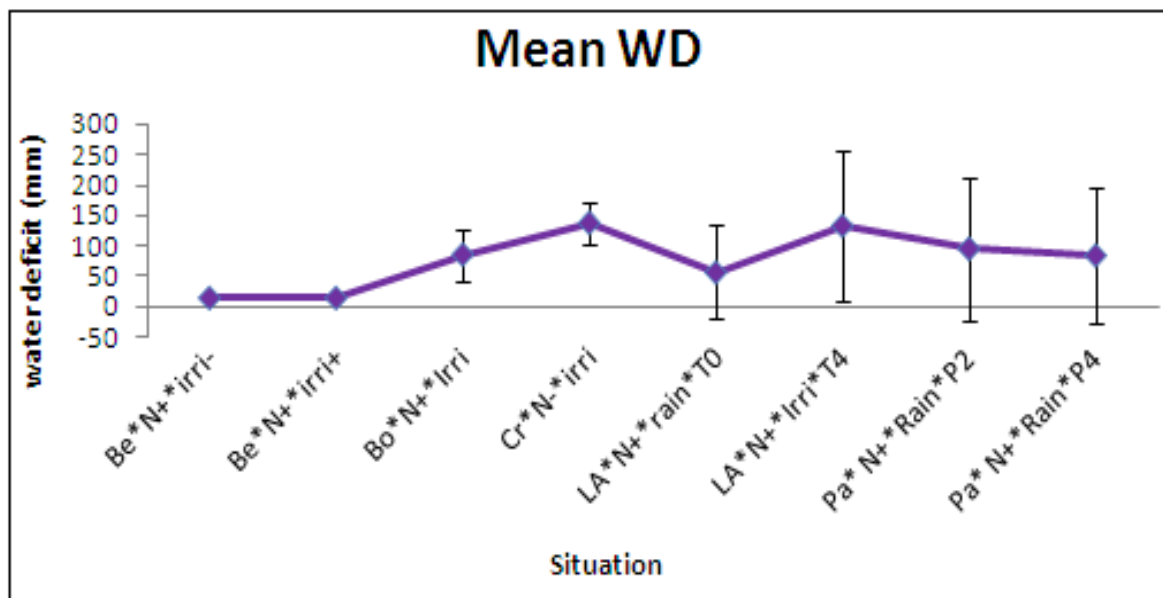


Fig.10. Mean water deficit recorded across 8 different conditions.

Table 10. Evaluation of water applied schedules using INDIGO irrigation indicator.

site	year	situation	INDIGO I _{irri} indicator	interpretation
Bouillac	1996	Bo*N+*irri	9.1	Acceptable excess
	1997	Bo*N+*irri	10	Good irrigation management without excess
	1998	Bo*N+*irri	10	Good irrigation management without excess
	1999	Bo*N+*irri	10	Good irrigation management without excess
	2000	Bo*N+*irri	5.6	Bad management (due to Drainage of 62 mm)
Crambade	1990	Cr*N-*irri	9.8	Acceptable excess
	1991	Cr*N-*irri	10	Good irrigation management without excess
Bergerac	2007	Be*N+*irri+	10	Good irrigation management without excess
	2007	Be*N+*irri-	6.6	Bad management (due to Drainage of 35 mm)
Lamir	1986	La*N+irri*T4	9.8	Good irrigation management
	1987	La*N+irri*T4	9.8	Good irrigation management
	1988	La*N+irri*T4	9.8	Good irrigation management
	1989	La*N+irri*T4	4.2	Bad management due to Drainage of 256 mm)

Table 11. Evaluation of water applied schedules using water deficit (WD) indicator.

situation*year	year	WD (mm)	applied water quantity (mm)	interpretation
LA*N+*Irri*T4*1986	1986	198,7	279	excess
LA*N+*Irri*T4*1987	1987	16,3	190	excess
LA*N+*Irri*T4*1988	1988	0	180	excess
LA*N+*Irri*T4*1989	1989	312,8	282	not sufficient
Cr*N-*irri*1990	1990	171	330	excess
Cr*N-*irri*1991	1991	102	250	excess
Bo*N+*Irri*1996	1996	0	180	excess
Bo*N+*Irri*1997	1997	79	120	excess
Bo*N+*Irri*1998	1998	173,3	210	good
Bo*N+*Irri*1999	1999	104,8	180	excess
Bo*N+*Irri*2000	2000	70,8	210	excess
Be*N+*irri-*2007	2007	15,6	35	good
Be*N+*irri+*2007	2007	15,6	152	excess

A comparison between indicators interpretations and simulated quantities of drainage are presented in table 13. It shows that there is an important difference between outputs. For example, under the LA*N+*Irri*T4*1986 situation, INDIGO indicates that a good water management is applied and no drainage is noted while model Aquacrop, CropSyst, BILHN and Jeux d'O simulated drained water quantity of about 369 mm, 412 mm, 295 mm and 232 mm.

Table 12.comparison between interpretation for drainage indicators and output models

Situation*year	Drainage interpretation		Drainage quantities (mm)			
	Water deficit	INDIGO	Aquacrop	CropSyst	BILHN	Jeux d'O
LA*N+*Irri*T4*1986	possible drainage	without excess	369	412	295	232
LA*N+*Irri*T4*1987	possible drainage	without excess	485	375	339	268
LA*N+*Irri*T4*1988	possible drainage	without excess	422	431	499	543
LA*N+*Irri*T4*1989	not sufficient	256	205	240	275	266
Cr*N-*irri*1990	possible drainage	Acceptable excess	105	55	310	178
Cr*N-*irri*1991	possible drainage	without excess	124	208	293	253
Bo*N+*Irri*1996	possible drainage	Acceptable excess	362	109	151	280
Bo*N+*Irri*1997	possible drainage	without excess	93	79	151	141
Bo*N+*Irri*1998	without excess	without excess	89	82	138	107
Bo*N+*Irri*1999	possible drainage	without excess	90	184	210	172
Bo*N+*Irri*2000	possible drainage	62	129	183	228	163
Be*N+*irri-*2007	without excess	without excess	212	43	310	198
Be*N+*irri+*2007	possible drainage	35	302	6	321	230

B. Nitrogen leaching

Fig.11. illustrates simulated nitrogen leaching in the 8 different situations for each model simulating this process. It shows that BILHN gives the higher quantities of nitrogen leached in 7 cases from 8 while CropSyst gives the lowest ones. In Parizot site for the year 1992 an important quantity of nitrogen leaching 260 kg N/ha and 87 kg N/ha is detected by BILHN and CropSyst respectively while INDIGO simulation was about 28 kg N/ha. INDIGO indicator of nitrate leaching seems few sensitive to years and situation effects. Even if we decided to not use the nitrogen leaching observed data from the analysis because there were questionable, measured nitrogen leached for that year in that site was about 89 kg N/ha, or 89 kg NO₃/ha because units of measured variable were missing. Noticeable discrepancies are observed between models for some situations. Therefore, in Fig.12 we represent the variability between models for each situation.

Fig 12. Average of simulated leached nitrogen under 8 situations can vary from 10 to 80 kg N/ha and the standard deviation can be very important.

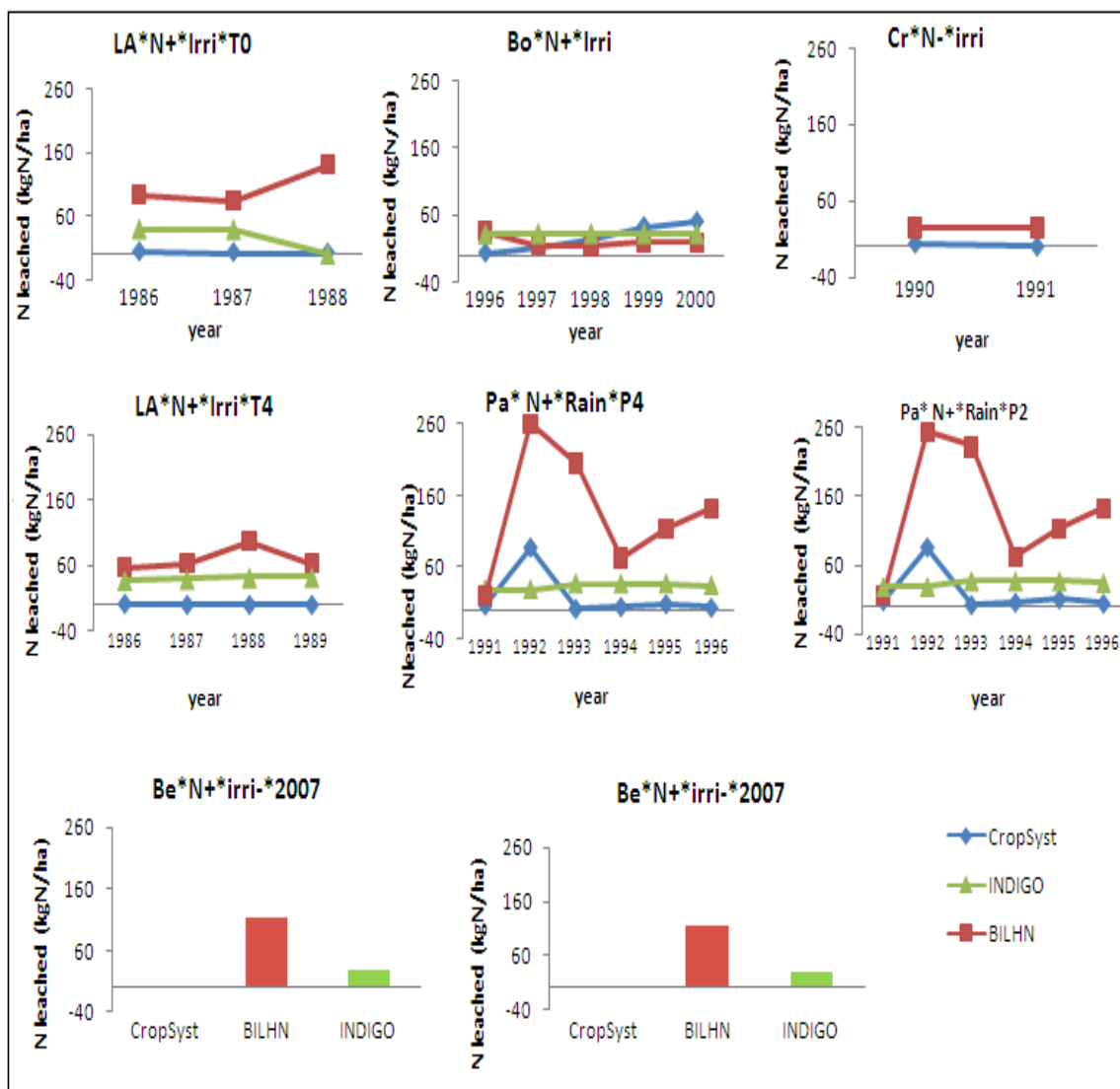


Fig. 11. Nitrogen leaching simulates by CropSyst, INDIGO and BILHN for different situations under different nitrogen management. INDIGO indicator does not simulate nitrogen leaching if no nitrogen fertilizer is applied case of the Cr*N-*irri plot.

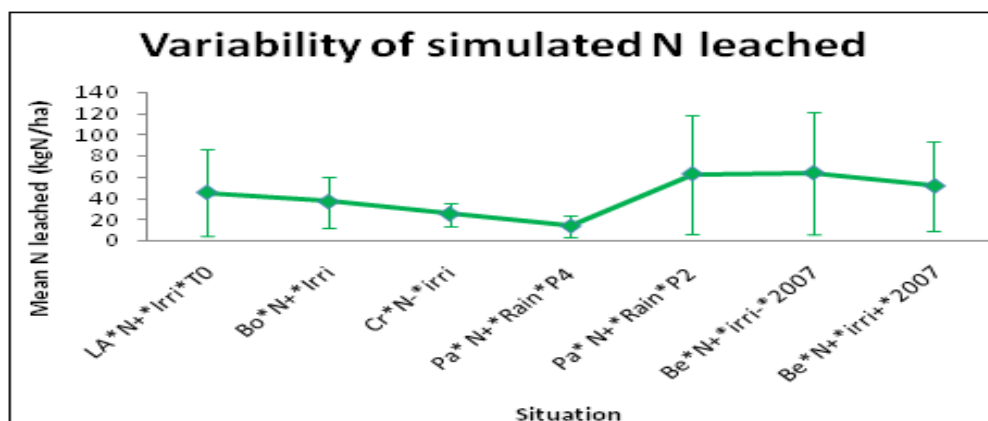


Fig. 12. Mean variability between models for simulating nitrogen leaching at 8 different situations.

VI. Discussion

Indicators and models were evaluated focusing on their ability to correctly reproduce across contrasting environmental situations the studied variables namely grain yield, water balance or nitrogen leaching depending on the main objective that the tool was designed for.

1. Grain yield

The four models were designed to simulated grain yield but globally none perfectly reproduced observed data in the 8 different situations. This result is in line with a similar work conducted by Palosuo et al (2011). They tried to compare the performance of eight crop growth simulation models for winter wheat during 49 growing season across Europe. They finally found that none of them was perfect in all situations. Nevertheless, in our case one model (BILHN) correctly reproduced the observed grain yield in 7 situations from the 8 studies cases. Then, Jeux d'O model perfectly simulated grain yield under 6 conditions from the 8. Statistical and graphical analysis classified the four models as follows: CropSyst<Aquacrop<BILHN<Jeux d'O.

Surprisingly this classification is reversed if we consider the ability of the same models for simulating dates for starting the anthesis stage. In fact for this variable, Fig. 2 showed that the best model was CropSyst then Aquacrop followed by BILHN and finally Jeux d'O. The latter overestimated the occurrence of flowering stage in all the 8 given cases. From one hand, how does a model completely overestimates a key phenological stage for yield elaboration such as anthesis and perfectly reproduce grain yield? On the other hand why does a models perfectly reproduces phenology and completely under estimates grain yield?

To try to answer these questions, it is important to come back to formalism that is used for each one of these models and to focus on relationship between grain yield and phenology for both cases.

A. Relation between phenology and grain yield

- The case of Jeux d'O model

Maize grain yield in Jeux d'O model follows an empirical function of production equation described by the following equation:

$$Y = [a(TR_M)^2 + b(TR_M) - c] Y_p$$

Where Y is the grain yield expressed in (kg/ha) a, b and c are crop coefficient, considered for maize crop to be equal to (-2), (4.5) and (-1.5) respectively; TR_M is the ratio between actual and potential transpiration and Y_p is the potential excepted yield expressed in (kg/ha).

Consequently, phenology is not accounted for in simulating grain yield in Jeux d'O model.

- The case of CropSyst model

Grain yield in CropSyst model is expressed as described in the following equation:

$$Y = HI \cdot AGB$$

Where Y is the grain yield expressed in kg/ha, AGB is the above ground biomass accumulated during growing season. Therefore longer the crop cycle is, greater is the amount of biomass accumulated if no other stress occurs as observed by Temani (2010). Finally HI is the harvest index expressed as follows:

$$HI = HI_{unstressed} \cdot (1 - avgStressf Sf) \cdot (1 - avgStressgf Sgf)$$

Where avgStressf is the mean water stress index during flowering, avgStressgf is the mean water stress index during the grain filling period and Sf, Sgf are the harvest index adjustment parameters for water stress sensitivity during flowering and grain filling respectively (Stöckle and Nelson, 1997).

In CropSyst model yield elaboration is closely related to phenology. Even if the model well reproduces phenological dates for anthesis simulated grain yield are inaccurate.

B. Inaccuracy in grain yield CropSyst simulations

CropSyst model clearly underestimated grain yield for all sites and conditions. Similar results were reported by Palosuo et al (2011). However, statistical analysis was not as unexpected as ours. Statistical tests for estimates of grain yield by CropSyst were very questionable. Indeed EF reaches (-192.4) at the Parizot site under rainfed conditions. MBE equals (-78.3 q/ha) at Bouillac site under irrigated conditions and RRMSE reached 84.9% at the irrigated Crambade site. Thus we tried to find if there were any problem of units in the defaults parameters or in the input weather and soil data. None were found. Furthermore if such assumption is correct why does the same model give an acceptable level of average simulated yield of 83.53 q/ha; 82.77 q/ha and 60.65 q/ha for Bergerac site under two different water schedules. The same observation is made for the rainfed Lamir situation. Moreover, under the former conditions (La*N+*rain*T0) CropSyst was statistically the best model with an EF of 0.43, a MBE of (-7.35 q/ha), an IA of 0.99 and a RRMSE of 20%.

We tried to find and analyze common points that distinguished these three situations from the five others but none of these 3 sites have easily identifiable specificities (for instance the absence of irrigation in LAMIR exist also in two other experiments in Parizot site...). In the models misspecification of interactions between different aspects (sowing date, nitrogen management, water schedules, crop variety, soil characteristics...) can become inappropriate for some conditions. In some case, it is possible to improve model behavior through data-consuming calibration. May be if such mechanistic model was calibrated there were no inaccuracy at some sites. This assumption is in line with Palosuo et al (2011) conclusion. They showed that the use of crop simulation models in climate impact and adaptation studies with restricted calibration leads to a high degree of uncertainty in estimated impact indicators. Adam et al (2011) as well, mentioned that the reuse of a model without any adaptation might lead to inaccuracies in model outputs. Accordingly, it seems that adaptations of climatic conditions, soil characteristics, agricultural practices and phenology are insufficient to adapt CropSyst model to a given situation and further parameters have to be calibrated. It may not be sufficient to only adapt model parameters for phenology for larger scale applications, but also to evaluate the use of approaches to simulate key growth processes in response to climatic variability (Adam et al., 2011).

Hence, this result underlines the importance to focus on sources uncertainty in estimates.

2. Uncertainties

According to Walker et al. (2003), there is a wide variety of contributions on uncertainty in models, it may be related to input data (soil weather...), calibration and model structure. Palosuo et al (2011) added human errors related to the setup of this kind of model comparison study, but which are very difficult to quantify. In our case we also distinguish a fifth source of uncertainty which is observed data (grain yield, biomass, and nitrogen leaching...) that influences the model evaluation.

A. Input data

In our case input data, even if we tried to choose experimental sites where detailed daily weather data, soil characteristics and practices were available, some inaccuracies were noted. In fact the used data base (BaseAgro) is very old and in some cases it was even impossible to find back some needed details. Therefore initial conditions were missing and we took some assumptions concerning water content and nitrogen balance in the soil at the beginning of simulations. However for short term simulations, initial conditions can have an important effect on final yield in CropSyst model (Belhouchette, 2004). For the other models, this effect depends on the sensitivity of the model to initial conditions.

Furthermore, using database that was not designed for the research question can lead to such problems. In fact, in Base agro there were no information related to dates of anthesis, grain filling, physiological maturity and harvest. Even if such data are important in modelling they were very difficult to find for different experiments.

B. Calibration

In our case only crop phenology was fixed at the thermal time defining each phenological stage. As discussed previously it may be insufficient. But even the used method to fix the phenological stage can be a source of uncertainty. Especially in the case of CropSyst default values of required thermal time to reach maturity for instance is about 1770 ° days for maize in the model while it is equal to 1990, 1940, 1960 and 1770 for Volga and Cecilia, Natalia Sabrina and DK315 maize variety. Only DK315 variety has phenological characteristics as those described by default in the model. It may be interesting to mention that, this variety was used in the Bergerac site where average grain yield were about 83.53 q/ha and 82.77 q/ha.

Hence, we tried to use the thermal time phenological degree days of the DK315 variety at the other sites. A comparison between results showed that grain yield still without any change.

From another hand, we hypothesized that may be if we had the real dates of phenological stages and we calibrated at least phenology may be the response of CropSyst and Aquacrop models to yields were better. Hence, we calculated manually the real dates then we calibrated the models using it. But no changes were noted.

C. Model structure

In this study we are testing different types of models differing by their formalisms and their complexity. Internal model structure that is generally no well or fully defined even in the model's manual has important impact on model outputs. For instance, for CropSyst model, thermal time accumulation is detailed. Using the same equations to calculate manually the date of the phenological maturity we did not found exactly the same date in all cases (difference may reach a week). Aquacrop model uses also the same formalism for thermal time accumulation but dates are different from those manually calculated and those given by CropSyst. Even if the process is well known and documented, internal model functioning is still questionable.

D. Human errors

This study uses different types of models, two of it (Jeux d'O and BILHN) have not a formal documentation. Therefore some misunderstanding of their use is possible. Nonetheless both of these two models had the best performance compared to the observed data. Even for well documented models and indicators, compilation of consistent and complete datasets for each model, simulations with appropriate input data is laborious and involves the risk of human errors (Palosuo et al 2011).

E. Observed data

In our case data base is old. Consequently, it was even impossible to discuss with experimenters who performed measurements in order to verify some additional and useful data. Hence, data such as the size of the plots that may give an important idea on the observed yield in each site are missing.

Moreover, there was no information about the nature and method used to measure the nitrogen leaching. Thus, we were not able to use these data.

3. Water balance

There were substantial discrepancies in simulating different components of water balance such as evaporation, transpiration, ETP and drainage between models. More discrepancies were noted by comparing between indicators and models outputs.

Complex models such CropSyst and Aquacrop provide much more details of water budget variables such as rising capillarity, surface runoff, soil and residue evaporation, infiltration through soil layers, deep percolation...it can be very interesting if each observed data was available. But such variables are very difficult to measure especially in a large scale were it become even impossible.

4. Mean values

Palosuo et al. (2011) noticed that average yield of yields simulated by the 8 tested crop models was a better predictor for grain yield than single models simulations. In our study simulation of BILHN and Jeux d'O were better than mean values.

5. Model comparison using statistical indicators

Classical statistical indicator as RRMSE, IA, MBE, EF... are important tools to measure the agreement between observed and simulated data but are unable to discriminate model capacities to simulate observed tendencies, between years, situation, sites. Thus, it is possible that a model giving more or less the same result in contrasting situations will be classified statistically as better than a model that reproduces the observed tendencies (decrease, increase). Therefore, we completed the statistical analysis with a graphical comparison. In general way, for model comparison statistical indicators must be completed graphically or using other statistical methods.

For model comparison many studies use AIC (Akaike Information Criterion) and the BIC (Bayesian Information Criterion) but in our study, where no parameters were calibrated, AIC and BIC cannot be calculated. Furthermore, these estimators generally lack of robustness, (Bellocchi et al., 2009).

Maybe a variance analysis can be an interesting method to compare models across different conditions, some projects (as the one directed by Wallach during the time of our study) are focusing on this questions that it is very exploratory.

Conclusions et perspectives

L'objectif de ce travail est d'évaluer la capacité d'indicateurs et de modèles de cultures à quantifier des variables clés du système sol-plante à l'échelle d'un territoire.

Les indicateurs et les modèles choisis sont des outils d'aide à la décision capables de simuler les mêmes variables selon différents formalismes. Par conséquent, ces outils sont classés suivant une échelle de complication croissante allant d'indicateurs simples aux modèles dynamiques mécanistes des systèmes de culture.

L'idée d'utiliser plusieurs types d'indicateurs et des modèles différents par leur complication provient principalement de la problématique suivante qui fait intervenir l'échelle de l'étude :

« Les modèles de culture ont été développés pour être appliqués à l'échelle de la parcelle. Cependant ils sont de plus en plus utilisés sur des échelles plus étendues telles que le territoire. Or il est connu que ces modèles sont demandeurs en données ce qui complique encore plus leur application à de grandes étendues surtout qu'une calibration préalable est nécessaire. Cette phase est plus ou moins complexe selon les modèles. Parmi le panel de modèles disponibles, il serait intéressant de trouver un modèle qui reproduit bien les données observées et apporte l'information escomptée sans pour autant nécessiter un long processus de calibration. Par ailleurs, on observe de plus en plus une tendance vers l'utilisation des indicateurs pour guider les pouvoirs publics et apporter des réponses à des questions agronomiques et/ou environnementales qui peuvent aller jusqu'à des échelles géographiques larges. Ainsi on dispose de deux types d'outils, qui malgré leurs différences peuvent apporter des réponses pour des questions comparables. Modèle ou indicateur lequel serait plus approprié à l'échelle régionale ? La simplicité des modèles rendrait-elle leur utilisation plus facile donc plus adéquate à la région ? Ou bien, vu la complexité des processus recherchés, la prise en compte du maximum de données offrant une meilleure description de la situation, ferait-elle que les modèles les plus mécanistes soient plus appropriés à cette échelle ? »

Les outils choisis pour mener cette comparaison allant du plus simple au plus compliqué sont : le déficit hydrique, l'indicateur INDIGO, Jeux d'O, BILHN, Aquacrop et CropSyst. Ils seront comparés pour leurs quantifications du rendement, l'évaporation, la transpiration, l'évapotranspiration, le drainage et la lixiviation de l'azote pour une monoculture de maïs en Midi-Pyrénées.

Cinq sites répartis dans la région du Midi-Pyrénées du sud ouest de la France semés en maïs pendant une à six années. Huit situations ont été distinguées. Elles sont différentes par le régime hydrique et/ou la fertilisation azotée et le type de sol.

Modèles et indicateurs ont été utilisés pour les mêmes situations. Les modèles sont utilisés sans calibration, une simple fixation de la phénologie des variétés de maïs a été effectuée.

Pour le rendement, deux modèles ont montré une bonne reproduction des données observées, il s'agit de BILHN et Jeux d'O. Par contre, les modèles les plus mécanistes utilisés avec une calibration restreinte entraînent un grand degré d'incertitude. Malgré les résultats satisfaisants de BILHN et Jeux d'O, il convient de noter que ces deux modèles ont été développés et utilisés à Toulouse, une ville de la région d'étude ce qui n'est pas le cas ni de CropSyst ni d'Aquacrop. Vu que tous les modèles n'ont pas été calibrés, ceci pourrait créer un biais dans les conditions de comparaison entre les modèles. Ainsi, deux hypothèses se présentent :

Soit dans cette étude BILHN et Jeux d'O ont été appliqués dans leur domaine d'application ainsi le fait qu'ils n'ont pas été calibrés ne les a pas affectés comme les autres modèles développés ailleurs.

Soit BILHN et Jeux d'O sont performants et robustes ce qui leur a permis de bien simuler le rendement du maïs même sans calibration.

La vérification de l'une ou l'autre suppose que les BILHN et Jeux d'O doivent faire l'objet d'autres travaux sur d'autres régions pour mieux définir leur domaine d'application et mieux les caractériser.

Pour faire face à ce problème de domaine d'application, un résultat assez intéressant ressort de ce travail : malgré la disparité des résultats des quatre modèles utilisés dans cette étude pour le rendement, la moyenne des rendements simulés des quatre modèles est en concordance avec les rendements observés pour sept situations sur les huit considérées. Par conséquent, au lieu d'utiliser un seul modèle et se limiter à un seul domaine d'application, il serait intéressant d'adopter la combinaison de plusieurs notamment pour des applications aux grandes unités géographiques.

Les résultats des composantes du bilan hydrique et de la lixiviation de l'azote sont très variables entre modèles et indicateurs.

Les modèles offrent la capacité de quantifier un large nombre de variables du bilan hydrique ou azoté tels que le ruissellement superficiel, la remontée capillaire, l'eau interceptée par le couvert végétal ou encore la lixiviation de l'azote, la volatilisation de l'ammoniac... toutefois, les expériences correspondant à la détermination de ce type de variables sont très délicates et difficiles à mener et à vérifier. Dans notre cas, on cherchait à évaluer la performance d'un régime hydrique et d'une fertilisation azotée. Les indicateurs choisis permettaient de déclasser directement les régimes les moins performants « selon l'outil » toutefois aucun modèle n'apportait une réponse directe à la question.

Bibliographie

- Abdullah W. S. (2009).** Exponential model for predicting the sorption isotherms-evaluation, statistical appraisal and comparison with existing models. *Jordan journal of civil engineering*, vol. 3, n. 4, p. 344-355.
- Adam, M., Van Bussel L.G.J., Leffelaar P.A. et al. (2011).** Effects of modelling detail on simulated potential crop yields under a wide range of climatic conditions. *Ecological modelling*, vol. 222, n. 1, p. 131-143.
- Araya A., Habtu S., Hadgu K.-M. et al. (2010).** Test of AquaCrop model in simulating biomass and yield of water deficient and irrigated barley (*Hordeum vulgare*). *Agricultural water management*, vol. 97, n. 11, p. 1838–1846 97.
- Araya A., Keesstra S.D., Stroosnijder L. (2010).** Simulating yield response to water of Teff (*Eragrostis tef*) with FAO's AquaCrop model. *Field crops research*, vol. 116, n. 1–2, p. 196–204.
- Barbottin A. (2004).** Utilisation d'un modèle de culture pour évaluer le comportement des génotypes : pertinence de l'utilisation d'Azodyn pour analyser la variabilité du rendement et de la teneur en protéines du blé tendre. Thèse de doctorat en Agronomie : Institut National Agronomique Paris-Grignon, Ecole Doctorale ABIES, 178 p.
- 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*, vol. 21, n. 7, p. 1042-1054.
- Belhouchette H. (2004).** Evaluation de la durabilité de successions culturales à l'échelle d'un périmètre irrigué en Tunisie : utilisation conjointe d'un modèle de culture (CropSyst), d'un SIG et d'un modèle bio-économique. Thèse de doctorat en science du sol : ENSAM Montpellier, 155 p.
- Belhouchette H., Braudeau E., Donatelli M. et al. (2008).** Integrating spatial soil organization data with a regional agricultural management simulation model : a case study in Northern Tunisia. *Transactions of the ASABE*, vol. 51, n. 3, p. 1099-1109.
- Bellocchi G., Rivington M., Donatelli M., Matthews K. (2009).** Validation of biophysical models : issues and methodologies. A review. *Agronomy of sustainable development*, vol. 30, n. 1, p. 109-130.
- Bockstaller C., Girardin P. (2007).** Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO. (outil destiné aux agronomes pour leur permettre d'évaluer les impacts des pratiques agricoles sur l'environnement). http://www.inra.fr/presse/indigo_r_un_outil_d_evaluation_agri_envirionnementale.
- Bockstaller C., Guichard L., Makowski D. et al. (2008).** Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. A methodological review. *Agronomy for sustainable development*, vol. 28, n. 1, p. 139-149.
- Bockstaller C.; Girardin P. (2003).** How to validate environmental indicators. *Agricultural systems*, vol. 76, n. 2, p. 639-653.
- Brisson N., Launay M., Mary B., Beaudoin N. (2009).** *Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model*. Versailles : Quae.

Brisson N., Mary B, Ripoche D. et al. (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*, vol. 18, n. 5-6, p. 311-346.

Brisson N., Wery J., Boote K.W. (2006). Fundamental concepts of crop models illustrated by a comparative approach. In : Wallach D., Makowsky D., Jones J.J. *Working with dynamic crop models*. Amsterdam : Elsevier. p. 261-284.

Cameira M.R., Fernando R.M., Ahuja L., Pereira L. (2005). Simulating the fate of water in field soil-crop environment. *Journal of hydrology*, vol. 315, n. 1-4, p. 1-24.

Ceglar A., Crepinsek Z., Kajfez-Bogataj L., Pogacar T. (2011). The simulation of phenological development in dynamic crop model: The Bayesian comparison of different methods. *Agricultural and forest meteorology*, vol. 151, n. 1, p. 101-115.

CMED (Commission mondiale sur l'environnement et le développement). (1987). *Rapport de Brundtland G. H. : Notre avenir à tous*. Montréal : Ed. du Fleuve.

Confalonieri R., Bechini L. (2004). A preliminary evaluation of the simulation model CropSyst for alfalfa. *European journal of agronomy*, vol. 21, n. 2, p. 223-237.

Confalonieri R., Acutis M., Bellocchio G., Donatelli M. (2009). Multimetric evaluation of the models WARM, CropSyst, and WOFOST for rice. *Ecological modelling*, vol. 220, n. 11, p. 1395-1410.

Dagnelie P. (2003). *Principes d'expérimentation : planification des expériences et analyse de leurs résultats*. Gembloux : Presses agronomiques. 397 p.

Debaeke P., Willaum M., Casadebaig P., Nolot J.-M. (2008). Raisonner les systèmes de culture en fonction de la disponibilité en eau. *Innovations agronomiques*, n. 2, p. 19-36.

Ewert F., Van Ittersum M. K., Therond O., et al. (2006). Complex scaling issues in integrated assessment modelling: Approaches used and their integration into SEAMLESS-IF. In : *Proceedings of the Conference on integrated assessment of agriculture and sustainable development: Setting the agenda for science and policy (AgSAP 2009)*. Wageningen : Wageningen University and Research Centre. p. 56-57. Egmond aan Zee, The Netherlands, 10-12 March 2009.

Gaunt J.L, Riley J., Stein A, Penning de Vries FWT (1997). Requirements for effective modelling strategies. *Agricultural systems*, vol. 54, n. 2, p. 153-168.

Godard C. (2005). Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne. Application à l'évaluation des impacts du changement climatique. Thèse de l'Institut national agronomique Paris-Grignon. 278 p.

Hadria R. (2006). Adaptation et spatialisation du modèle STICS pour la gestion d'un périmètre céréalier irrigué en milieu semi aride. Thèse en mécanique des fluides et énergétique : Faculté des Sciences Semlalia, Université Cadi Ayyad. 216 p

Heidmann T., Tofteng C., Abrahamsen P. et al. (2008). Calibration procedure for a potato crop growth model using information from across Europe. *Ecological modelling* vol. 211, n. 1-2, p. 209-223.

IAASTD. (2009). *Agriculture at a crossroads. International assessment of agricultural knowledge, science and technology for development*. Washington D.C. : Island Press.

Jego G. (2008). Influence des activités agricoles sur la pollution nitrique des eaux souterraines. Analyse par modélisation des impacts des systèmes de grande culture sur les fuites de nitrate dans les plaines alluviales. Thèse en agrosystèmes, écosystèmes et environnement : Université Toulouse III Paul Sabatier. 229 p.

Jones J.W., Hoogenboom G., Porter C.H. et al. (2003). The DSSAT cropping system model. *European journal of agronomy*, vol. 18, n. 3, p. 235-265.

Katiyar A.K., Kumar A., Kumar Pandey C., Das B. (2010). A comparative study of monthly mean daily clear sky radiation over India. *International journal of energy and environment*, vol. 1, n. 1, p. 177-182.

Kumar R., Chaturevdi S. (2009). Crop modeling: A tool for agricultural research. Agropedia. [consulté en 2011]. <http://agropedia.iitk.ac.in/?q=content/crop-model>

Le Gal P., Milleville P. (1996). Du transfert technique à l'aide à la décision. In : Sébillote (ed.). *Recherches-systèmes en agriculture et développement rural : conférences et débats*. Montpellier : CIRAD-SAR. p. 191-206. Recherches-systèmes en agriculture et développement rural, Symposium International, Montpellier, 1994/11/24-25.

Legates D.R., McCabe Jr. G.J. (1999). Evaluating the use of “goodness-of-fit” Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water resources research*, vol. 35, n. 1, p. 233–241.

McCown R.L., Hammer G.L., Hargreaves J.N.G. et al. (1996). APSIM: a novel software system for model development, model testing and simulation in agricultural systems research. *Agricultural systems*, vol. 50, n. 3, p. 255-271.

Murua J.R., Laajimi A. (1995). Transition de l'agriculture conventionnelle vers l'agriculture durable : quelques réflexions. In : Zekri S., Laajimi A. (eds). *Agriculture, durabilité et environnement*. Zaragoza : CIHEAM-IAMZ. p. 75-86. (Cahiers Options Méditerranéennes ; v. 9), Séminaire de l'Association Tunisienne des Anciens de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Zaragoza, 1993/12/02-03, Tunis.

Nardo M., Saisana M., Saltelli A. et al. (2005). *Handbook on constructing composite indicators: methodology and user guide*. Paris : OECD.

Nath S., Patil R.S. (2006). Prediction of air pollution concentration using an in situ real time mixing height model. *Atmospheric environment*, vol. 40, n. 20, p. 3816–3822.

Njomaha C. (2003). Durabilité des systèmes de culture dans l'extrême-nord Cameroun. In : Jamin J.Y., Seiny-Boukar L., Floret C. (eds). *Savanes africaines : des espaces en mutation, des acteurs face à de nouveaux défis. Actes du colloque, 27-31 mai 2002, Garoua (Cameroun)*. Montpellier : CIRAD.

OCDE (2011). *Indicateurs environnementaux pour l'agriculture. Volume 3 : méthodes et résultats*. Paris : OCDE.

Palosuo T., Kersebaum K. C., Angulo C. et al. (2011). Simulation of winter wheat yield and its variability in different climates of Europe. A comparison of eight crop growth models. *European journal of agronomy*, vol. 35, n. 3, p. 103-114.

Poussin J.C. (1987). Notions de système et de modèle : note. *Cahiers des sciences humaines*, vol. 23, n. 3-4, p. 439-441.

Raes D., Steduto P., Hsiao T-C., Fereres E. (2011). AquaCrop Version 3.1plus. Reference manual. Chap. 3 : calculation procedures. Rome : FAO. [Consulté en 2011]. <http://www.fao.org/nr/water/aquacrop.html>

Raes D., Steduto P., Hsiao T-C., Fereres E. (2009). AquaCrop, the FAO crop model to predict yield response to water: II Main algorithms and software description. *Agronomy journal*, vol. 101, n. 3, p. 438–447.

Riley J. (2001). Multidisciplinary indicators of impact and change: Key issues for identification and summary. *Agriculture, ecosystems & environment*, vol. 87, n. 2, p. 245-259.

Robertson M., Carberry P. (2010). The evolving role of crop modelling in agronomy research. Culvenor Proceedings of 15th Agronomy Conference, 15-18 November 2010, Lincoln (New Zealand).

Rossiter D.G. (2003). Biophysical models in land evaluation. Article 1.5.27 in Theme 1.5 Land use and land cover. In : *Encyclopedia of life support systems (EOLSS)*. Oxford: EOLSS.

Shili-Touzi I., De Tourdonnet S., Launay M., Doré T. (2010). Does intercropping winter wheat and red fescue as cover crop improve agronomic and environmental performances? A modeling approach. *Field crop research*, vol. 116, n. 3, p. 218-229.

Singh A.K., Tripathy R., Chopra U.K. (2008). Evaluation of CERES-wheat and cropsyst models for water–nitrogen interactions in wheat crop. *Agricultural water management*, vol. 95, n. 7, p. 776-786.

Siosemarde M., Byzedi M. (2011). Studying of number of dataset on precision of estimated saturated hydraulic conductivity. *World Academy of science, engineering and technology*, vol. 74, p. 521-524.

Soltani, A., Hoogenboom G. (2007). Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. *Field Crops Research*, vol. 103, p. 198-207.

Steduto P. Hsiao T.C., Raes D., Fereres E. (2009). AquaCrop, the FAO crop model for predicting yield response to water: I. Concepts and underlying principles. *Agronomy journal*, vol. 101, n. 3, p. 426–437.

Stöckle C.O., Nelson R. (1997). *CropSyst user's manual*. Pullman : Washington state university, Biological systems engineering department. 186 p.

Stöckle C.O., Donatelli M., Nelson R. (2003). CropSyst, a cropping systems simulation model. *European journal of agronomy*, vol. 18, n. 3-4, p. 289-307.

Supit I., Hooyer A.A., Van Diepen C.A. (eds). (1994). *System description of the WOFOST 6.0 crop simulation model implemented in the CGMS Vol. 1: Theory and algorithms*. Luxembourg : Office for official publications of the EU. (Agricultural series).

Temani N. (2010). Assessing wheat and maize cropping systems responses to the uncertainty of climate change: Application to an irrigated area in Northern Tunisia. Master en sciences et technologies, agronomie et agroalimentaire. SupAgro, Montpellier. 51 p.

Therond O. et al. (2011). Using a cropping system model at regional scale: Low-data approaches for crop management information and model calibration. *Agriculture, ecosystems & environment*, vol. 142, n. 1-2, p. 85-94.

- Tittonell P., Corbeels M., Van Wijk M.T., Giller K.E. (2010).** FIELD : A summary simulation model of the soil-crop system to analyse long-term resource interactions and use efficiencies at farm scale. *European journal of agronomy*, vol. 32, n. 1, p. 10-21.
- Tixier P. (2004).** Conception assistée par modèle de systèmes de cultures durables, application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 233 p.
- Uehara G. (1989).** Technology transfer in the tropics. *Outlook on agriculture*, vol. 18, n. 1, p. 34-42.
- Uehara G., Tsuji Y. (1991).** Progress in crop modelling in the IBSNAT project. In: Muchow R.C., Bellamy J.A. (eds). *Climatic risk in crop Production: Models and management for the semi-arid tropics and subtropics*. Wallingford : CAB International.
- Van Diepen C-A., Wolf J., Van Keulen H., Rappoldt C. (1989).** WOFOST : a simulation model of crop production. *Soil use and management*, vol. 5, n. 1, p. 16-24.
- Vernier F. (2007).** Définition d'objets spatiaux de référence pour le calcul d'indicateurs agri-environnementaux à différentes échelles. Conférence francophone SIG2007, Versailles 11-12 Octobre.
- Walker W.E., Harremoes P., Rotmans J. et al. (2003).** Defining uncertainty: a conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support. *Integrated assessment*, vol. 4, n. 1, p. 5–17.
- Williams J.R., Joes C.A., Kiniry J.R., Spanel D.A. (1989).** The EPIC crop Growth model. *Transactions of the ASAE*, vol. 32, n. 2, p. 497-511.
- Zahm F., Vernier F., Paulais J. (2005).** Test d'une méthode pour l'appui à la construction et l'évaluation ex-ante de programmes de mesures de la DCE sur deux bassins versants en situation de "RNABE pesticides" (partie VIII). 42 p. Rapport pour le CEMAGREF Bordeaux.

Annexes

Annexe 1 : Enchaînement des équations de Jeux d'o

°JFLO : somme des degrés jours nécessaires pour atteindre le stade floraison (jours)

Cracine : le coefficient de vitesse d'enracinement, en °J pour progresser de 1mm

Cstru : Coefficient de structure du sol

Cvig : Coefficient de vigueur

Drain : drainage (mm)

ECHV : échelle de végétation, somme de degrés jour depuis le semis déterminant le stade de végétation (%)

ETP : évapotranspiration potentielle (mm)

EVA : évaporation (mm)

FREIN HIVER : Coefficient de Frein de photopériode au delà du 15 février

Hr : contenu du réservoir enraciné (mm)

HS : contenu du réservoir 5mm (mm)

Ht : contenu du réservoir à RUmax (mm)

Hw : contenu du réservoir W (mm)

Kc : coefficient de culture

RDT : rendement (q/ha)

RDTp : rendement potentiel (q/ha)

RU : réserve utile (mm)

RU : réserve utile (mm)

RU_r : taille du réservoir enraciné (mm)

S_{FREIN} : cumul de frein, atteint le 15 février

Sirr : seuil de TR_M, indice de stress hydrique (RdeD irrigation)

TM : transpiration maximale du jour (mm)

T_{MOY} : Température moyenne (°C)

TR : transpiration réelle (mm)

Tr_M : rapport de la transpiration réelle et la transpiration maximale

TRW : transpiration quand le réservoir est à HW

1. $ECHV_t = ECHV_{t-1} + SI(OU(\text{DATE}_t < \text{date de semis}; ECHV_{t-1} > \text{DATE DE RECOLTE}; \text{°JFLO} = 0; ET(HS' < 1; ECHV_{t-1} = 0)); 0; \text{MAX}(0; T_{MOY}) * SI(\text{DATE}_t > \text{FREIN } 15/02; 1; \text{FREIN HIVER}) / \text{°JFLO})$
2. $RU_{rt} = \max(50; \min(RU_{max}; Jflor / Cracine * si(echV < 1; echV; 1 + (echV - 1) / 2)))$

3. $RU_t = \text{MAX}(RU_{\text{r initial}}; \text{MIN}(RU; \text{CSTRU} * \text{°JFLO} / \text{Cracine} * \text{SI}(\text{ECHV}_t < 1; \text{ECHV}_t ; 1 + (\text{ECHV}_t - 1) / 2)))$
4. $TR_M_t = 1 - \text{ABS}(1 - (\text{Hrt} - 1 - \text{HS}_{t-1}) / (RU_{\text{rt}} - 1 - 5))^{(\text{CTRU}_m \wedge \text{ECHV}_t)}$
5. $Kc_t = \text{SI}(\text{ET}(\text{DATE}_t < \text{DATE DE RÉCOLTE}; \text{°JFLO} > 0); \text{MAX}(0; Kc_{t-1} + 2 * TR_M_t \wedge \text{COEFF DE SENSIBILITÉ DE KC AU STRESS HYDRIQUE} * KC \text{ MAX} * T_{\text{MOY}} / \text{°JFLO} / (1 + S_{\text{FREIN}}) * \text{SI}(\text{ECHV}_t + \text{FREIN} < \text{CVIG} * (1 + S_{\text{FREIN}}); (\text{ECHV}_t + \text{FREIN}) / \text{CVIG} / (1 + S_{\text{FREIN}}); \text{SI}(\text{ECHV}_t < 1; (1 - (\text{ECHV}_t + S_{\text{FREIN}}) / (1 + S_{\text{FREIN}})) / (1 - \text{CVIG}); -2 * (((1 - \text{ECHV}_t) / (1 - \text{ECHV}_t \text{ À MATURITÉ})) \wedge \text{COEFF DE SENESCENCE))))); 0$
6. $EVA_t = \text{ETP} * \text{MAX}(0; KC \text{ ATTEINT EVA} - KC_{t-1}) * (0,3 * (\text{HWt} - 1 / \text{Rur initial}) \wedge \text{COEFF EVA} + 0,7 * (\text{HSt} - 1 / \text{réservoir surface}) \wedge \text{COEFF EVA})$
7. $TM_t = (\text{ETP}_t - EVA_t) * KC_t$
8. $TR_t = TM_t * TR_M_t$
9. $Sirr_t = \text{SI}(\text{ECHV}_t = 0; 0; \text{SI}(\text{ECHV}_t < \text{Stade végétatif de changement du SIRR1}; \text{SIRR1}; \text{SI}(\text{ECHV}_t < \text{Stade végétatif de changement du SIRR2}; \text{Sirr1} + (\text{Sirr2} - \text{Sirr1}) * (\text{ECHV}_t - \text{Stade végétatif de changement du SIRR1}) / (\text{Stade végétatif de changement du SIRR2} - \text{Stade végétatif de changement du SIRR1}); \text{SI}(\text{ECHV}_t < \text{Stade végétatif de changement du SIRR3}; \text{Sirr2}; \text{SI}(\text{ECHV}_t < \text{ECHV}_t \text{ À MATURITÉ}; \text{Sirr2} + (\text{Sirr3} - \text{Sirr2}) * (\text{ECHV}_t - \text{Stade végétatif de changement du SIRR3}) / (\text{ECHV}_t \text{ À MATURITÉ} - \text{Stade végétatif de changement du SIRR3}); 0))))))$
10. $IRR_t = \text{SI}(\text{OU}(\text{Type d'usage} = "D"; \text{ET}(\text{Type d'usage} = "C"; \text{DATE}_t > \text{date de semis})); \text{SI}(TR_M_t < \text{SIRR}_t; \text{MIN}(\text{SIRR3}; (\text{RU} - \text{HT}_t) * \text{Coeff de sécurité de RU}; \text{MAX}(0; (\text{°JFLO} * \text{ECHV}_t \text{ à maturité} - \text{ECHV}_t) * 150)); 0); \text{SI}(\text{NB.SI}(\text{première dose d'irrigation}; \text{dernière dose d'irrigation}; \text{DATE}_t) > 0; \text{RECHERCHEH}(\text{DATE}_t; \text{première dose d'irrigation}; \text{dernière dose d'irrigation}; 2); 0))$
11. $Ht = \text{MIN}(RU; \text{HT}_{t-1} + \text{PLUIE} + \text{IRR}_t - \text{EVA}_t - \text{TR}_t)$
12. $\text{Drain} = \text{MAX}(0; \text{HT}_t + \text{PLUIE} + \text{IRR}_t - \text{EVA}_t - \text{TR}_t - \text{RU})$
13. $Hr_t = \text{MIN}(RU_t; \text{Hrt} - 1 + \text{PLUIE} + \text{IRR}_t - \text{EVA}_t - \text{TR}_t + \text{SI}(\text{RU}_{\text{rt}} - 1 < \text{RU}; (\text{RU}_t - \text{RU}_{\text{rt-1}}) * (\text{HT}_t - \text{Hr}_{t-1}) / (\text{RU} - \text{RU}_{\text{rt-1}}); 0))$
14. $\text{HS}_t = \text{MIN}(\text{réservoir surface}; \text{MAX}(\text{limite sol sec}; \text{HSt} - 1 + \text{PLUIE} + \text{IRR}_t - \text{EVA}_t))$
15. $\text{TRw}_t = \text{TR}_t * \text{HWt} - 1 / \text{Hrt} - 1$
16. $\text{HW}_t = \text{MIN}(\text{HWt} - 1 + \text{PLUIE} + \text{IRR}_t - \text{EVA}_t - \text{TRw}_t; \text{Rur initial})$
17. $\text{RDT} = (-2 * (\sum \text{TR}_M)^2 + 4.5 * (\sum \text{TR}_M) - 1.5) * \text{RDTp}$

Appendix 2 : Aquacrop description

Aquacrop Model	
variable	Method of calculation
Water balance	<p>The amount of water stored in the root zone is simulated by accounting for the incoming and outgoing water fluxes at its boundaries.</p> <p>Incoming water fluxes= rainfall +irrigation+ capillary rise.</p> <p>Outcoming water fluxes= runoff+ deep percolation+evapotranspiration</p> <ul style="list-style-type: none"> - Rainfall: climatic data - Irrigation: management file - Runoff: runoff calculation is based on the Curve <p>Number method developed by the US Soil Conservation Service.</p> <p>Deep percolation (Dp): $Dp = P_e - P_m$</p> <p>Where P_m is the monthly rainfall given in inches (1 inch = 25.4 mm) and is the monthly effective rainfall (P_{em}) obtained by an empirical equation defined by USDA (1970). P_m, P_{em} and Dp are given in inches (1 inch = 25.4 mm)</p> <ul style="list-style-type: none"> - evapotranspiration (ETP) <p>$ETP = E + Tr$</p> <p>Where</p> <ul style="list-style-type: none"> - E is the soil evaporation (mm). The calculation procedure for soil evaporation assumes that the evaporation takes places in two stages: an energy limiting stage (Stage I) and a falling rate stage (Stage II) calculated as detailed in the following equations : $E_{Stage I} = (1 - CC^*) Ke_x ET_o$ $E_{Stage II} = Kr (1 - CC^*) Ke_x ET_o$ <p>Where :</p> <ul style="list-style-type: none"> Ke_x : maximum soil evaporation coefficient for fully wet and not shaded soil surface. Ke: soil water evaporation coefficient. ET_o is the evapotranspiration rate from a grass reference surface. $(1 - CC^*)$: the fraction of the soil surface not covered by green canopy. Kr : The evaporation reduction coefficient is 1 if the soil is sufficiently wet and the soil evaporation is not hampered by water depletion.

	<p>- Tr is the crop transpiration expressed by:</p> $Tr = (K_s K_{cb}) ETo$ <p>Ks: is the soil water stress coefficient, Kcb : The crop transpiration coefficient.</p>
Yield (Y)	<p>Y= HI*B</p> <p>Where</p> <p>-Y : is the yield (t/ha)</p> <p>Hi : is the harvest index calculated by the following equation :</p> $HI = f_{HI} \cdot HI_0$ <p>with HI₀ is the reference harvest index ; f_{HI} is an adjustment stress factor depending on timing and extent of stress</p> <p>-B: is the biomasse (t/ha) calculated using the following formula:</p> $B = K_{sb} WP^* \sum \left(\frac{Tr}{ET_o} \right)$ <p>Where Ksb is an air temperature stress coefficient which becomes smaller than 1, and reduces biomass production.</p> <p>WP* is the normalized water productivity (WP*).</p>

Appendix 3 : Équations de BILHN

BILHN est un modèle agronomique d'experts conçu pour la gestion de l'eau et de l'azote.

4 grands modules peuvent être considérés dans le modèle dont trois sont à leurs tours divisés en sous modules :

- Module phénologie de la culture qui doit être le premier module à définir,
- Module bilan hydrique – croissance, utilise les rapports journaliers du sous module biomasse rendement ainsi que le sous module azote dans la plante :
- Module azote, comprend les sous modules suivants : azote dans la plante (calculé dans le module bilan hydrique), azote absorbé, matière organique, azote dans le sol.
- Module biomasse-rendement divisé en deux sous modules un rapport journalier de l'accumulation de biomasse calculé dans le module bilan hydrique et un rapport à la récolte calculé une seule fois en tant que module à part.

Variables

%NG : teneur en N du grain (%N)

besN : besoin N du jour (uN)

deN : N dénitrifié (uN)

dMSp : biomasse potentielle du jour en (t/ha)

Drain : drainage (mm)

echT : échelle de température (%)

echV : échelle de végétation (%)

eiv : indice d'interception de la lumière

ETP : évapotranspiration du jour (mm)

Eva : Evaporation (mm)

Hr : contenu du réservoir enraciné (mm)

Hs : contenu du réservoir 5mm (mm)

Ht : contenu du réservoir RUm_{ax} (mm)

Hw : contenu du réservoir W (mm)

inn : indice de nutrition N (%)

IR : indice de récolte (%)

Irr : dose d'irrigation (conseil ou réalisé) (mm)

jn15 : jour normalisé 15° (minéralisation) (%)

LJ : indice de longueur du jour
mal : état sanitaire (%MS; 1 = sain) (%)
MS : biomasse aérienne (t/ha)
MSt : dégât d'adventices et biomasse finale de culture (%)
Nabs_t : N absorbé (avec 20% racines)
Nmin : minéralisation N nette (avec RES)
Nr : N minéral de RUr (uN)
Nres : stock de N organique frais (t/ha)
Ns : N minéral de Rus (uN)
Nt : N minéral de Rut (uN)
Nw : N minéral de RUw (uN)
PIR1 : apport d'eau du jour plafonné (mm)
PIR2 : excès d'eau du jour (mm)
PV : pluie du jour (mm)
rdt0 : rendement grain sec (q/ha)
refN : courbe de dilution (%N)
Res : stock de MO fraîches (t/ha)
RUm : réserve utile maxi (mm)
Sirr : seuil de TR_M (RdeD irrigation)
Tm : température moyenne du jour (°C)
TM : transpiration maximale du jour (mm)
TRr : transpiration (mm)
Tu2 : température utile à EIV et dM_{Sp} (°C)
Tutil : température utile (°C)

Paramètres :

coefH : coefficient de satisfaction en eau
coefLJ : coefficient de longueur du jour
coefN : coefficient de satisfaction en azote
Csto : coefficient de fermeture des stomates
Cvig : coefficient de vigueur
Dmal : début de la maladie

Dmat ϕ : date de maturité physiologique

efN : coefficient d'efficacité de l'azote (%)

EIVm : indice d'interception de lumière maximale

Ims : indice de matière sèche

nbjn15a : nombre de jour normalisé

RUs : réserve utile à la surface (mm)

RUt : réserve utile totale (mm)

Tm ; Top ; ETP ; Pv sont des valeurs des données météo prédéfinies et Cvig ; cycl $^{\circ}$ J ; coefLJ ; coefH ; coefN ; EIVm ; cycl2 ; refN ; Ims ; Dmat ϕ ; sont paramètres culturaux fixés par l'utilisateur ; Rus ; Arg ; RUw, sont des variables fixes liée au sol ; Dmal paramètre lié à l'état phytosanitaire de la culture (début de la maladie)

1. Module Phénologie

- $LJ = 1 + \text{coefLJ} * \sinus((\text{jour} - 21/03) * 2 * \pi / 365)$
- $Tutil = \max(0; (Tm - \text{zéro}))$
- $Tu2 = Tutil_t * (1 - \text{si}(Tm > Topt; ((Tm - Topt) / 10)^2))$
- $\text{echV}_t = \text{echV}_{t-1} + Tutil_t / \text{cycl}^{\circ}\text{J} * \text{si}(\text{jour} < 15/02; \text{frein}; 1)$
- $\text{echT}_t = \text{echT}_{t-1} + Tutil_t / \text{cycl}^{\circ}\text{J}$

2. Données d'entrées du bilan hydrique

- $RUm = \text{prof} * (1 - \text{gravier}) * (12 + 39 * \text{Arg} - 64 * \text{Arg}^2) / 10$
- $\text{Sirr} = \text{ratH} * \text{si}(\text{echv}_t < 0.4; \text{Sirr1}; \text{si}(\text{echV}_t < 0.8; \text{Sirr1} + (\text{Sirr2} - \text{Sirr1}) * (\text{echV}_t - 0.4) / (0.8 - 0.4); \text{si}(\text{echV}_t < 1.1; \text{Sirr2}; \text{si}(\text{echV}_t < \text{cycl2}; \text{Sirr2} + (\text{Sirr3} - \text{Sirr2}) * (\text{echV}_t - 1.1) / (\text{cycl2} - 1.1); 0))))$
- $\text{Irr}_t = \text{si}(\text{jour} < \text{dMJ}; \text{Irr réalisé}; \text{si}(\text{TR_M}_{t-1} < \text{Sirr}; \min(\text{dosIm}; RUm - \text{Ht}_{t-1} - 20; (\text{Dmat}\phi - \text{jour}) * 4); 0)) / \text{efirr}$
- $\text{PIR2} = \max(\text{Irr}_t + \text{Pv} + \text{PIR2}_{t-1} - \text{PIRm}; 0)$
- $\text{PIR1} = \min(\text{PIRm}; \text{Pv} + \text{Irr}_t + \text{PIR2})$

3. Module Bilan hydrique – croissance

- $Rur_t = \text{si}(\text{ou}(\text{typ}=0; \text{typ}=3; \text{echV} > \text{cycl2}; RUw; \min(RUm; \max(RUw; \text{si}(\text{echV}_t < 1; \text{Cstru} * \text{echT}_t / 10 * \text{cycl}^{\circ}\text{J} / \text{racine}; RUr_t + \text{Cstru} * 0.5 * Tutil / 10 / \text{racine}))))$
- $\text{Hr}_t = \min(\text{si}(RUr < RUm; \text{Hr} + \text{PIR1} - \text{Eva}_{t-1} - \text{TRr}_{t-1} + \text{dRUr} * (\text{Ht}_{t-1} - \text{Hr}_{t-1}) / (RUm - RUr_t); \text{Ht}); RUr)$
- $\text{TR_M}_t = 1 - \text{abs}(1 - (\text{Hr}_t / RUr_t))^{(\text{Csto} * 120 / (\text{Arg} + 15))}$

4. Module biomasse-rendement (rapport journalier)

- $\text{dMSp}_t = LJ * EIV_t * Tu2 / 100 * Ims * \text{TR_M}_t^{\text{coefH}}$
- $\text{MS}_t = \text{si}(\text{typ}=0; 0; \text{MS} + \text{dMSp}_t * \min(1; \text{inn}_t^{\text{coefN}}) * \text{mal})$

5. Sous module azote dans la plante

- a. $\text{refN} = \min(4; \text{CrefN} + 1.5 * (1.7 - \text{echV}_t)^2)$

- b. $besN = 10 * 1.2 * (dMSp_t * refN_t - drefN_t * MS_t)$
 c. $inn_t = \min(1.3; Nabs_{t-1} / 1.2 / MS_{t-1} / 10 / refN_t)$

- $EIV_t = si(ou(typ=0; echV > cycl2; echT < 0.10); 0; EIV + Tu2 / 1000 * si(echV_t < 1; echT_t * LJ^2 * Cvig * (1 - EIV_{t-1} + echV_t) * \max(0; EIV_m - EIV)^1 * (inn_t * TR_M_t)^1; SI(EIV > 0; -2 * ((echV_t - 1) / (cycl2 - 1))^2; 0)))$
- $Hs = \min(RUs; \max(RUs - RUs * (1 + 2 * Arg / 100); Hs_{t-1} + PIR1 - ETP * \max(0; 9 - EIV_{t-1}) / 0.9 * (Hs_{t-1} / RUs)^5))$
- $Eva = ETP * \max(0; (0.9 - EIV_{t-1}) / 0.9 * \max(Hs_{t-1} / RUs; Hw_{t-1} / RUw)^5)$
- $Hw = \min(Hw_{t-1} + PIR1 - Eva_{t-1} - TRw_{t-1}; RUw)$
- $TM = (ETP - Eva_t) * EIV_{t-1} * 1.25$
- $TRr = TM_t * TR_M_t$
- $TRw = TRr_t * Hw_t / Hr_t$
- $jn15 = Hw / RUw * (\exp(0.07 * (\min(Tm; 25^\circ) - 10)) - \exp(-0.7))$
- $Ht = \min(Ht_{t-1} + PIR1_t - Eva_t - TRr_{t-1}; RUm)$

6. Module biomasse-rendement (rapport à la récolte)

- $MSt = MS * (1 - MH)$
- $IR = 0.24 + 0.5 * (MSt - MSflo * 0.8) / MSt * (1 - 0.5 * mal)$
- $rdt0 = MSf * IR$
- $\%NG = Nabs / 1.2 / rdt0 / (cNP * (1 / IR - 1)^2 + 1) / 10$

7. Module azote

7.1 Sous module azote absorbé

- $Nabs_t = si(typ=0; 0; Nabs_{t-1} + besN_t * si(coefN=0; 1; 1.25 / \min(inn_{t-1}; 1) * (1 - \exp(-0.3 * (Nr_{t-1} - Ns_{t-1} - 0.05 * (RUr_{t-1} - RUs)) / dMSp_t)))$

7.2 Sous module MO

- $RES_t = RES_{t-1} * (1 - jn15 / nbjn15a) + \text{apports} (MOi_t, MS \text{ de CI, pailles} = MS * (1 - IR) * \text{inpail} + \text{pert} * rdt0)$
- $Nres_t = Nres_{t-1} * (1 - jn15 / nbjn15a) - \min(Nw_{t-1} - Ns_{t-1}; 75 * RES_{t-1} * jn15 / nbjn15a * (1 - Nres / RES_{t-1} / 10)) + \text{apports} (Nmo, Nabs / 1.2 \text{ si CI, N paille} = \text{inpail} * (Nabs_t / 1.2 - 10 * \%NG * rdt0) + \text{pert} * \%NG * rdt0)$

7.3 Sous module Azote dans le sol

- $Ns = (fN_t + Ns_t) * (1 - si(Hs_{t-1} + PIR1_t > RUs; (Hs_{t-1} + PIR1_t - RUs) / RUs / (1 + 2 * Arg / 100); 0) - 0.01 * Hw_t / RUw)$
- $Nt = Nt_{t-1} + fN_t + dNmin_t - dNabs_t - Nless_t$
- $Nr_t = si(RUr_t = RUw; Nw; Nr + dNmin_t + fN_t - dNabs_t - si(Hr_t + PIR1_t > RUr; 0.7 * (Hr + PIR1_t - RUr) / RUr / (1 + 2 * Arg / 100); 0) + si(RUr_{t-1} < RUm; (Nt_{t-1} - Nr_{t-1}) * dRUr / (RUm - RUr_t); 0))$
- $Nw_t = Nw_{t-1} + fN_t + dNmin_t - dNabs_t * (Nw_{t-1} - Ns_{t-1}) / (Nr_{t-1} - Ns_{t-1}) - si(Hw_t + PIR1_t > RUw; 0.7 * (Hw_t + PIR1_t - RUw) / RUw / (1 + 2 * Arg / 100); 0)$

7.4 Sous module pertes d'azote

- $deN_t = deN_{t-1} + Nw_t * jn15_t * si(Hw_t = RUw; 1; 0) * 0.01 / Cstru + \max(0; Nres_t * jn15_t / nbjn15a - \min(Nw_t - Nsv; 75 * RES_t * jn15 / nbjn15a * (1 - Nres_t / RES_t / 10)) * 0.3)$
- $Nmin = Nmin_{t-1} + jn15 / nbjn15a * (Cstru * \min(Na + Nres_t - \min(nbjn15a / jn15 * (Nw_t - Ns_t); 75 * RES * (1 - Nres_t / 10 / RES_t)) - deN_t)$

- $\text{drain}_t = \text{drain} + \max(0; H_t + \text{PIR1} - \text{Eva} - \text{TRr} - \text{RUm})$
- $\text{Nless}_t = \text{Nless}_{t-1} + \text{drain} * 0.7 / (1 + 2 * \text{Arg} / 100) * \text{si}(\text{RUr1} < \text{RUm}; (H_t - H_{r_t}) / (\text{RUm} - \text{RUr}_t); (H_{r_t} - H_w) / (\text{RUr}_t - \text{RUw}))$

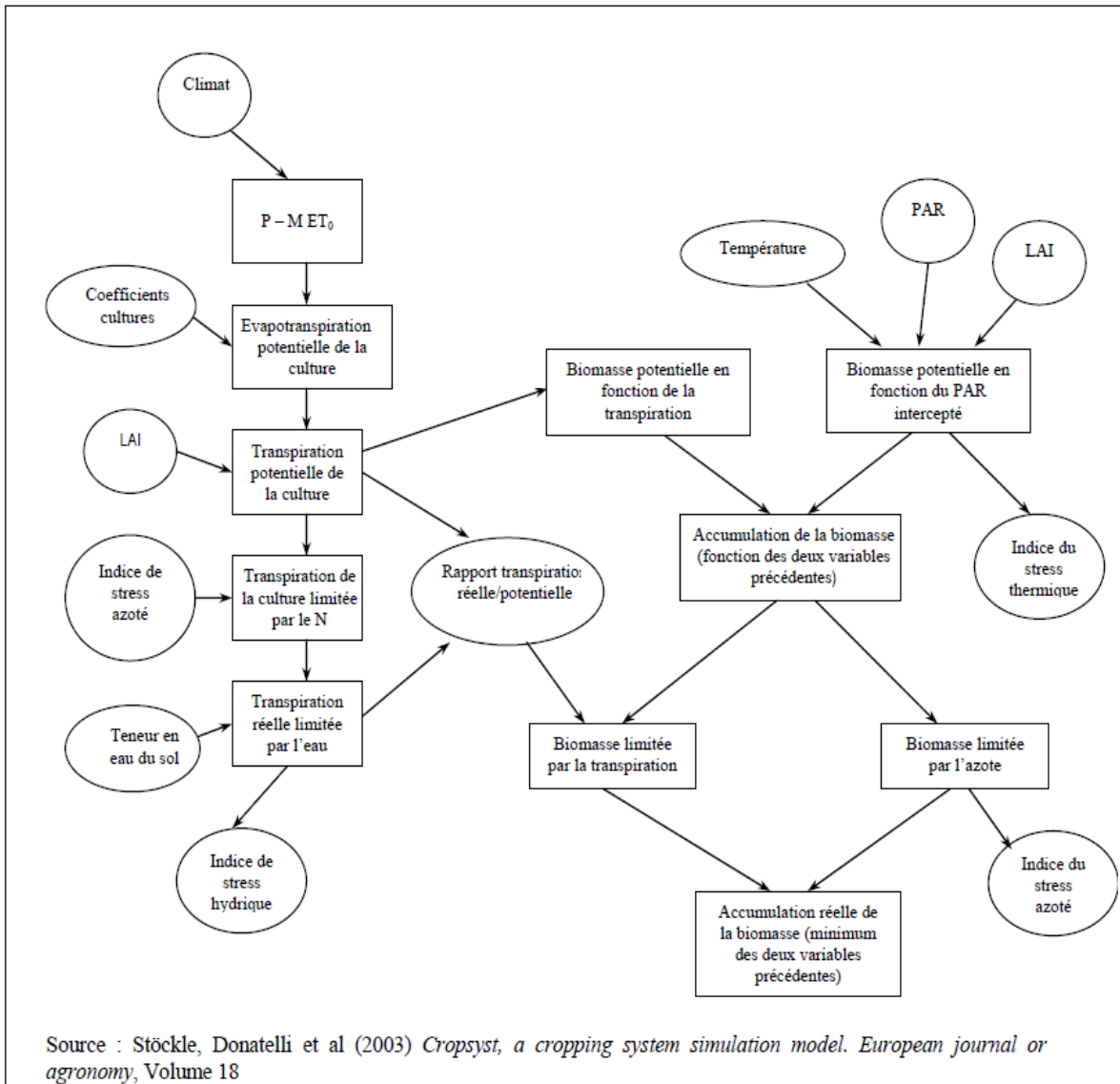
Appendix 4: Water soil properties for each experimental site

Site	plot	Soil depth (m)	Clay on the first 30 cm (%)	Sand on the first 30 cm (%)	Organic matter (on the first 30 cm) (%)	Maximum water storage (mm)
Lamir	T0	1.60	15.4	35.3	1.8	208
	T4	1.60	14.0	31.3	1.9	180
Parizot	P2	1.50	13.7	25.5	1.3	200
	P4	1.50	15.2	26.2	1.3	180
Bouillac	T1	1.20	13.0	14.0	1.2	159
	T3	1.20	13.0	14.0	1.2	159
Bergerac	d+	1.20	15.3	51.5	1.6	180
	d-	1.20	15.3	51.5	1.6	180
	t+	1.20	15.3	51.5	1.6	180
	t-	1.20	15.3	51.5	1.6	180
Crambade	T1	1.0	40.0	11.0	-	236
	T3	1.0	40.0	11.0	-	236
	T4	1.0	40.0	11.0	-	236

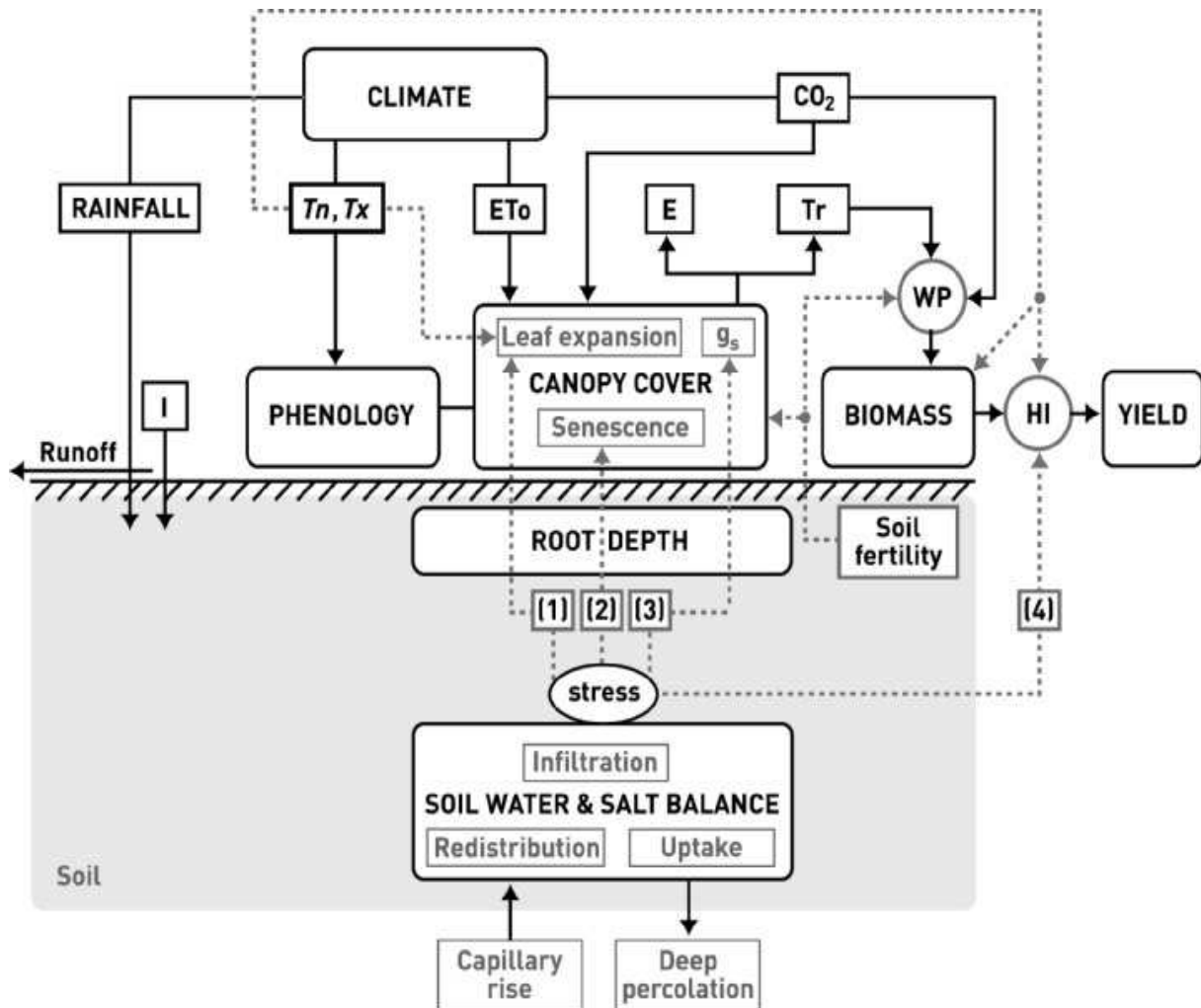
Appendix 5: Degree days required to reach emergence, flowering and physiological maturity for each variety

Variety	Emergence (degree days)	Flowering (degree days)	physiological maturity (degree days)
Dk315	80	905	1770
Natalia	80	1015	1940
Volga	80	1015	1990
Sabrina	80	1020	1960
Cecilia	80	1040	1990

Appendix 6: CropSyst conceptual model



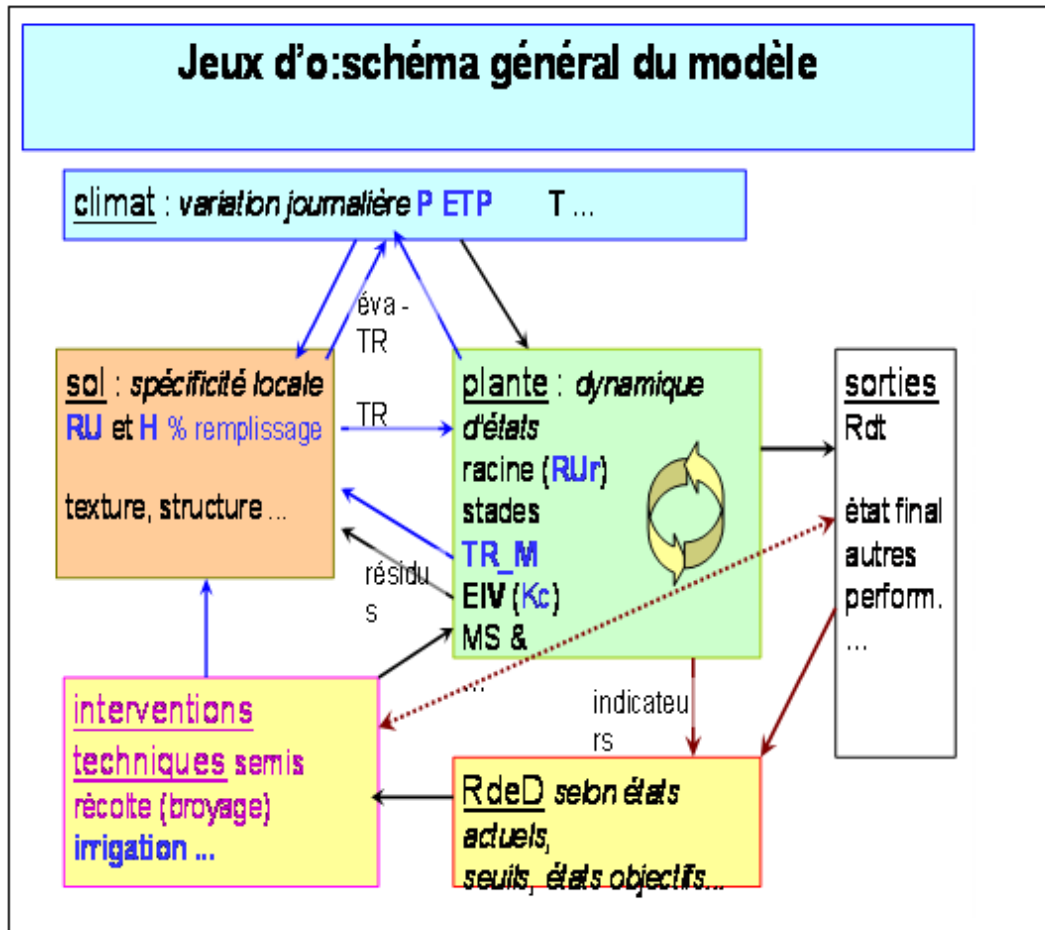
Appendix 7: Aquacrop conceptual model



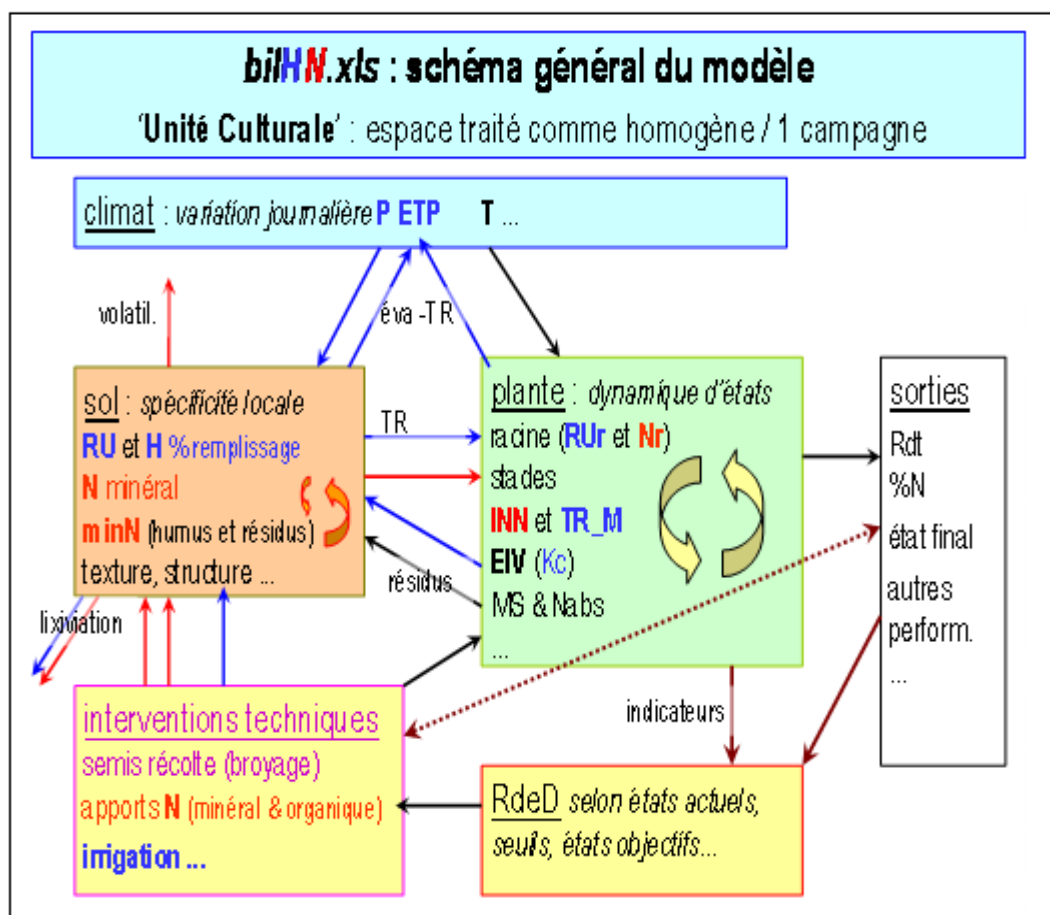
Source : Raes D., Steduto P., Hsiao T-C., and Fereres E., 2011. Calculation procedures Aquacrop Model.

Chart of *AquaCrop* indicating the main components of the soil–plant–atmosphere continuum and the parameters driving phenology, canopy cover, transpiration, biomass production, and final yield. [I, irrigation; T_n , minimum air temperature; T_x , maximum air temperature; ETo , reference vapotranspiration; E , soil evaporation; Tr , canopy transpiration; g_s , stomatal conductance; WP, water productivity; HI, harvest index; CO_2 , atmospheric carbon dioxide concentration; (1), (2), (3), (4), water stress response functions for leaf expansion, senescence, stomatal conductance and harvest index, respectively]. Continuous lines indicate direct links between variables and processes. Dashed lines indicate feedbacks. See section 1.2 for a more extensive description.

Appendix 8: Model conceptuel de Jeux d'O



Appendix 9: Model conceptuel de BILHN



Source : Nolot J-M., INRA Toulouse.

Appendix 10: Le fonctionnement conceptuel des modules dans BILHN

