

# Prise en compte des effets du CO2 sur le calcul de l'évapotranspiration de référence

Albert Olioso, Frederic F. Huard, Lydie Guilioni

▶ **To cite this version:**

Albert Olioso, Frederic F. Huard, Lydie Guilioni. Prise en compte des effets du CO2 sur le calcul de l'évapotranspiration de référence. Climator 2010, Jun 2010, Versailles, France. hal-02757684

**HAL Id: hal-02757684**
**https://hal.inrae.fr/hal-02757684**

Submitted on 4 Jun 2020

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

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

# Actes du colloque

*17-18 juin 2010 INRA Versailles*

## Présentation des méthodes et des résultats du projet CLIMATOR

Financé par ANR

*Dans le cadre d'un partenariat scientifique associant*

Organisé par INRA ARVALIS Institut du végétal

## SOMMAIRE


Le projet CLIMATOR……4
**N. Brisson**
Comment produire un scénario de changement climatique ?..……6
**C. Pagé, L. Terray, M. Déqué**
La place de la régionalisation……...8
**M. Déqué, C. Pagé, L. Terray**
Générateur climatique WACS-Gen et désagrégation horaire……..10
**D. Allard, C. Flecher, P. Naveau**
Théorie des valeurs extrêmes et sciences du climat : une approche probabiliste……12
**P. Naveau**
Retour d'expérience sur la comparaison des modèles d'agro-écosystème……...14
**N. Brisson, J.L. Durand, P. Gate, L. Guilioni, F. Huard, R. Lardy, D. Ripoche, R. Roche, D. Allard**
Analyse des sources d'incertitudes et de variabilités……16
**D. Allard, N. Brisson**
Anticipation des stades phénologiques, raccourcissement des phases et conséquences calendaires……18
**P. Gate, N. Brisson**
Confort hydrique et restitution d'eau aux nappes……...20
**B. Itier**
Stockage et déstockage de carbone dans les sols……22
**J. Sierra**
Analyse des effets du changement climatique sur les interactions eau x azote pour un système prairial……24
**J.L. Durand, F. Bernard, N. Brisson, D Ripoche, M. Déqué**
Analyse des effets du changement climatique au sein des pathosystèmes du blé……..26
**M.O. Bancal, D. Gouache, R. Roche, N. Gagnaire**
Grandes tendances de l'évolution du rendement des cultures avec le changement climatique……28
**R. Roche**
Le climat du XXI° siècle, hypothèse de travail du projet……30
**C. Pagé, L. Terray, M. Déqué**
Changement climatique et cultures de blé et de colza : l'essentiel des impacts……...32
**M.O. Bancal, N. Brisson, P. Gate**
Changement climatique et cultures de maïs et sorgho grains : l'essentiel des impacts……..34
**N. Brisson**
Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts……..36
**J.L. Durand, F. Bernard, R. Lardy, A.I. Graux**
Changement climatique et vigne : l'essentiel des impacts……38
**P. Piéri, E. Lebon**
Conséquences des modifications futures du climat sur la forêt en France……40
**A. Bosc, V. Badeau, N. Breda**
Quelques impacts du changement climatique autour du semis des cultures annuelles :
faisabilité, réussite et calage du cycle……42
**D. Gouache**
Changement climatique et irrigation……44
**F. Levrault**
Evolution des traitements fongicides sous impact du changement climatique
appréhendée à travers quelques cas d'études ……46

**D. Gouache, P. Pieri, R. Roche, M.O. Bancal**

Impacts du changement climatique sur les systèmes d'élevage et les grandes cultures :
résultats du programme ACTA 2007-2009……..48
**J.C. Moreau , S. Poisson, P. Gate, B. Lacroix, J. Lorgeou ,F. Ruget**
Géoclimatologie ou déplacement des cultures……52
**E. Lebon, V. Badeau**
Quelques exemples régionaux en métropole……..54
**F. Levrault, N. Brisson**
Un cas d'étude sous les tropiques : la Guadeloupe……...56
**J. Sierra**
Atouts et vulnérabilités des cultures face au changement climatique……58
**F. Levrault**
Eléments sur le changement climatique et la culture du tournesol en France……..60
**N. Brisson, L. Guilioni**
Le Cours en Ligne du projet CLIMATOR……62
**J. Roger-Estrade, C. Angers, F. Huard, D. Chambert**
Prise en compte de l'effet de l'élévation de la concentration en CO2
sur la production photosynthétique dans les modèles utilisés……..……64
**R. Roche**
Prise en compte du CO2 dans le calcul de l'évapotranspiration de référence……..66
**A. Olioso, F. Huard, L. Guilioni**
Utilisation d'indicateurs phénoclimatiques simples pour évaluer des pistes d'adaptation
de la culture du blé aux stress thermiques lors du remplissage dans le contexte du changement climatique ……68
**D. Gouache, P. Gate**
Quelle agriculture dans CLIMATOR ?.....70
**F. Huard**
Le WEB-CLIMATOR : système d'information de gestion des sorties de simulation du projet……72
**D. Delannoy, D. Ripoche, F. Huard**

# Le projet CLIMATOR

**N. Brisson**
INRA, Agroclim, Avignon,France (brisson@avignon.inra.fr)

## Introduction

Le projet de recherche CLIMATOR (2007-2010) a été financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), dans le cadre du programme Vulnérabilité, Milieux et Climat (VMC). Pendant 3 ans, 17 équipes de 7 instituts et organismes ont travaillé ensemble sur le projet CLIMATOR, associant ainsi des disciplines variées : climatologie, agronomie, écophysiologie, bioclimatologie, science du sol pour des objectifs divers : recherche, développement, enseignement. Cependant, la mise en place d'un cadre méthodologique commun a permis une gestion optimale de cette diversité.

CLIMATOR vise à fournir des méthodes et des résultats sur l'impact du changement climatique sur des systèmes cultivés variés, à l'échelle de la parcelle, et dans des climats contrastés français. CLIMATOR concerne des systèmes annuels (monocultures et rotations de blé, tournesol, maïs, sorgho, colza principalement) à divers niveaux d'intrants (sec et irrigué, conventionnel et biologique) et des systèmes pérennes (prairies, forêt, banane, canne à sucre et vigne).

L'approche territoriale s'appuie sur 13 sites représentatifs des climats français (Avignon, Bordeaux, Clermont-Ferrand (Theix), Colmar, Dijon, Mirecourt, Mons, Lusignan, Rennes, St Etienne, Toulouse, Versailles, et la Guadeloupe) pour lesquels des séries climatiques trentenaires (1970-2000) sont disponibles.

Le travail réalisé dans CLIMATOR repose sur une analyse d'impacts possibles selon diverses hypothèses pour le climat futur. Il s'agit d'un exercice de modélisation à vocation prospective qui ne peut, en aucun cas, être considéré comme prévisionnel. L'objectif est de traduire les hypothèses climatiques en impacts chiffrés pour distinguer les effets positifs, négatifs ou non significatifs qu'induisent ces hypothèses sur l'agriculture et la forêt françaises, dans leur dimension uniquement biotechnique.

## Méthodes de travail

Les résultats produits sont le fruit du croisement de modèles climatologiques et de modèles agronomiques, déclinés sur deux périodes d'intérêt : le futur proche (2020-2049), et le futur lointain (2070-2099) en référence à une période de passé récent (1970-1999). Les modèles climatologiques produisent les variables climatiques qui sont les variables d'entrée de modèles agronomiques simulant le fonctionnement des cultures dans ces conditions. Les variables de sorties des modèles agronomiques concernent d'une part la production (rendement, date de récolte, besoins d'intrants,...) et d'autre part l'environnement (restitution d'eau aux aquifères, stockage de matière organique,...).

Un premier intérêt de CLIMATOR est d'offrir des résultats accompagnés des variations liées aux incertitudes des modèles et à la variabilité du milieu (sols) et des choix techniques des agriculteurs (variétés, modes de conduite). Pour ce faire, CLIMATOR combine de façon raisonnée:

- trois scénarios IPCC[1] SRES [2] : A1B, A2, B1 qui correspondent à des trajectoires socio-économiques différentes aboutissant à des concentrations en $CO_2$ dans l'atmosphère en 2100 de respectivement 720, 820 and 550 ppm,
- cinq modèles climatiques dont le modèle français ARPEGE et 4 autres modèles de l'IPCC : Terray et al., 2010
- trois méthodes de régionalisation du climat (quantile-quantile, types de temps, anomalies : Terray et al., 2010) ;
- deux ou trois modèles agronomiques par système de cultures (Brisson, 2010);
- deux ou trois variétés ou cépages par espèce cultivée (Huard, 2010) ;
- trois types de sol (variant par leur réserve utile, teneur en matière organique, profondeur, pierrosité, ... : Huard, 2010) ;
- des modes de conduite en termes d'irrigation ou de densité de plantation : Huard, 2010.

[1] IPCC : International Panel for Climate Change
[2] SRES : Special Report on Emission Scenarios

Sont analysées : les évolutions en tendance des variables d'intérêt ainsi que les sources d'incertitude et de variabilité (Allard et Brisson, 2010). De plus, chacun des thèmes a fait l'objet de recherche de relations diagnostiques simples entre variables d'intérêt et variables climatiques, l'objectif étant de proposer des outils pour déduire rapidement les principales conséquences agro-environnementales de nouveaux scénarios climatiques (par exemple Gouache et al., 2010).

## Organisation du projet

Dans le projet CLIMATOR, nous avons adopté une organisation de travail destinée à faciliter le transfert des résultats hors sphère scientifique, et en particulier au milieu agricole (au sens large). Pour cela les résultats sont ventilés en trois rubriques : les thèmes, les cultures et les régions.

Les thèmes abordés représentent des sujets transversaux sur lesquels le changement climatique peut provoquer des modifications sensibles. Ils sont traités avec les outils disponibles dans le projet et les systèmes choisis. Par conséquent, il s'agit d'éléments d'information à la lumière des résultats du projet, sans prétendre à l'exhaustivité sur les divers thèmes abordés. Ces thèmes sont les suivants :

- timing : étude de l'anticipation des stades phénologiques, du raccourcissement des phases et de leurs conséquences
- eau : étude de l'évolution des conditions de confort hydrique des plantes et de l'alimentation en eau des aquifères.
- santé des plantes : étude probatoire sur l'évolution du risque épidémique, de la nuisibilité et des traitements pour quelques patho-systèmes.
- matière organique : étude de l'évolution du stockage de carbone dans les sols.
- rendement : étude de synthèse sur l'évolution attendue des rendements

Les cultures et systèmes de cultures analysées ont été choisis pour leur représentativité et leur spécificité de comportement vis-à-vis du changement climatique. Il s'agit des cultures d'hiver (blé, colza), de printemps (maïs, sorgho, tournesol), des cultures irriguées (maïs, vigne), des cultures pluviales (toutes sauf le maïs), des pérennes herbacées (prairie de graminées), des pérennes ligneux caduques (vigne et feuillus) et sempervirents (conifères). Des éléments d'information sont également apportés sur un système d'agriculture biologique. Une synthèse pour l'ensemble des cultures est réalisée sur les atouts et les vulnérabilités engendrés par le changement climatique.

Bien que le projet n'intègre pas sensu stricto d'approche spatialisée du changement climatique, la variété des sites et des climats analysés nous ont permis de proposer des éléments de réflexion sur des grandes zones du territoire français. Le territoire a été découpé en 6 zones auxquelles s'ajoute la zone caraïbe représentée par le Guadeloupe. Ces 6 zones, qui sont des ensembles de régions administratives, sont représentées par un à trois sites. Pour chacune d'elles, le devenir des cultures emblématiques actuelles est analysé et sont envisagées quelques opportunités de développement d'autres cultures. De plus une étude synthétique en termes de géoclimatologie est proposée, qui analyse le maintien des espèces dans leurs zones actuelles de production et les déplacements possibles des zones actuelles de production.

## Diffusion des résultats du projet

Au-delà de leur présentation dans des publications scientifiques, les résultats du projet sont diffusés sous la forme du présent Livre Vert destiné au milieu agricole au sens large (responsables agricoles et forestiers, OPA, administrations, collectivités, enseignement agricole) et d'un cours en ligne destiné à l'enseignement (http://www.avignon.inra.fr/cours_en_ligne_climator/).

## Références bibliographiques


Allard, D. ; Brisson, N. 2010. Analyse des sources d'incertitude et de variabilités. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 51-62.

Brisson, N. 2010. Description des modèles agronomiques et forestiers et mise en œuvre. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 41-50.

Gouache, D. ; Roche, R., Pieri, P., Bancal, M.O. 2010. Evolution de quelques pathosystèmes sur le blé et la vigne. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 113-126.

Huard, F. 2010. Quelle agriculture dans CLIMATOR ? Choix des sites, dessystèmes agricoles et forestiers et des sols. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 33-40.

Terray, L. ; Pagé, C. ; Déqué, M. ; Flecher, C., 2010. L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 19-32.

# Comment produire un scénario de changement climatique ?

**C. Pagé[1*], L. Terray[1], M. Déqué[2]**
[1] CERFACS, URA-1875, Toulouse, France
2 Météo-France CNRM-GAME, Toulouse, France
*Auteur correspondant : christian.page@cerfacs.fr

## Introduction

L'objectif du projet CLIMATOR est de modéliser l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur les agro-écosystèmes en France métropolitaine et en Guadeloupe. Le principe général d'une étude d'impact du changement climatique repose sur deux étapes: la première est la production des données climatiques du futur (appelées aussi projections ou scénarii) simulées par un ensemble de modèles climatiques globaux de grande échelle en fonction de plusieurs scénarii d'émissions anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols) pour le 21ème siècle. La deuxième étape, indispensable avant l'utilisation de ces données climatiques pour des études d'impact, est celle de leur régionalisation : on parle aussi de désagrégation ou de descente d'échelle. Nous nous concentrons ici sur la première étape, c'est-à-dire la production d'un scénario de changement climatique à l'échelle globale.

## Le système climatique global simulé par des modèles physiques

Les modèles climatiques globaux sont fondés sur des lois physiques représentées par des équations mathématiques résolues au moyen d'une grille tridimensionnelle couvrant l'ensemble du globe. Pour simuler le climat, il faut représenter dans des sous-modèles les principaux éléments du système climatique (atmosphère, océan, glace, etc.) ainsi que les processus qui se manifestent dans ces divers éléments et entre eux. Les modèles du climat mondial où les éléments atmosphère, océan et glace sont couplés sont connus sous le nom de modèles de la circulation générale couplés atmosphère-océan-glace de mer (MCGOA).

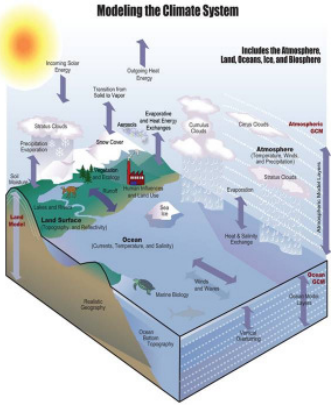



*Figure 1 : Système climatique http://www.ogc.doc.gov/ogc/legreg/testimon/109s/Karl0720.htm*

Dès le début de la modélisation climatique couplée (la fin des années 1980), l'impact d'un accroissement du taux de dioxyde de carbone et des autres gaz à effet de serre a été étudié. A partir de 1990, le GIEC a proposé des scénarios de concentration des différents gaz à effet de serre (GES) pour le siècle prochain. Les principaux scénarios de concentrations GES utilisés pour le dernier rapport du GIEC (2007) sont les suivants :

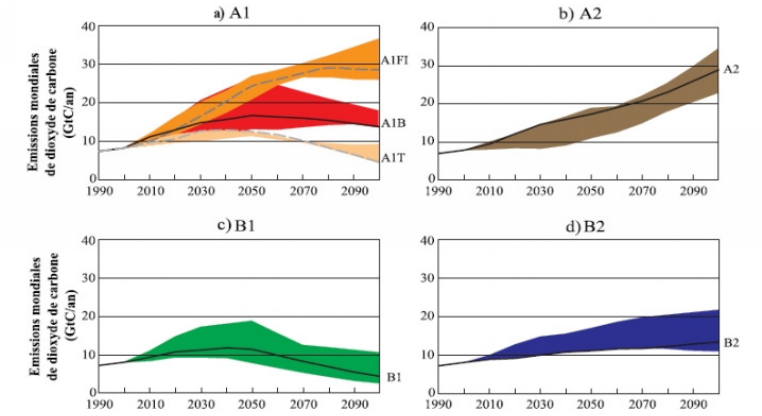



*Figure 2 : Principaux scénarios d'émissions de GES du GIEC 2007*

Les centres de recherche disposant de gros moyens de calcul ont calculé l'évolution des paramètres climatiques sur cette période, ainsi que sur une période de référence (typiquement les 50 ou 100 dernières années) pour laquelle on prescrit les changements observés des GES depuis l'époque préindustrielle. C'est une des source des incertitudes sur les scénarios climatiques. Pour le dernier rapport du GIEC en 2007, 23 modèles climatiques couplés ont produit des scénarios. Ceci permet d'évaluer l'incertitude structurelle des modèles.

Il faut noter que ces modèles couplés demandent de longues intégrations (500-1000 ans, simulation de contrôle) avec forçage des GES constant (valeurs préindustrielles) pour la mise à l'équilibre de la composante océanique lente et la quantification de la variabilité climatique interne. Ils utilisent un découpage de la surface terrestre en mailles de 200-300 km de côté environ.

Cet ensemble de simulations climatiques par les 23 modèles couplés des différents centres mondiaux du climat sont disponibles pour les différents scénarios GES du GIEC. Les résultats présentés dans le dernier rapport du GIEC (2007) suggèrent de fortes évolutions climatiques et un réchauffement important sur l'Europe et sur la région des Caraïbes au cours du 21ème siècle. A titre d'exemple et selon le scénario du GIEC d'émission des gaz à effet de serre A1B, le réchauffement moyen en 2050 sur la France serait de l'ordre de 2 ºC avec une incertitude de ± 0,6 ºC déterminée par les résultats de plusieurs modèles climatiques (et correspondant aux quantiles 10 et 90% de la distribution des modèles climatiques) et avec une plus forte augmentation des températures estivales, en particulier sur le sud de la France (Figure 1).

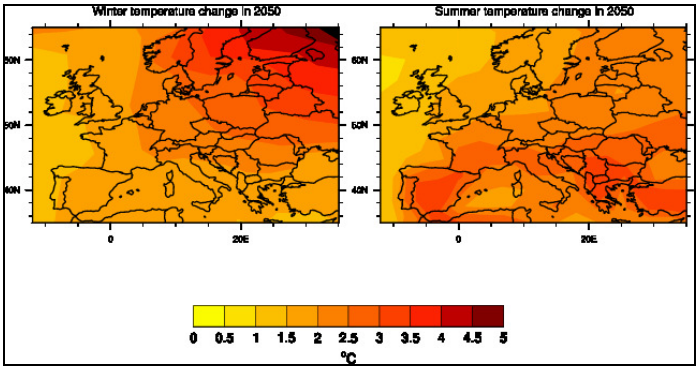



*Figure 3 : Anomalies de température en Europe pour le climat de 2050 telles que simulées par le multi-modèle du GIEC (21 modèles) et suivant le scénario A1B.*

Ces résultats, qui sont des moyennes spatiale et temporelle, donnent un ordre de grandeur des changements suggérés par les modèles climatiques globaux (ces derniers simulent l'évolution couplée de l'océan et de l'atmosphère soumis à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre et autres composants chimiques).

# La place de la régionalisation

**M. Déqué[1], C. Pagé[2], L. Terray[2]**

[1] Météo-France CNRM-GAME, Toulouse, France
[2] CERFACS, URA-1875, Toulouse, France
*Auteur correspondant : deque@meteo.fr

## Introduction

Le climat ne connaît pas de frontières et on ne peut pas modéliser l'atmosphère au-dessus de la France sans tenir compte de la calotte antarctique. De plus, la perturbation du climat par les gaz à effet de serre est globale: la concentration en dioxyde de carbone en atmosphère libre est à peu près la même à Avignon et à Auckland. C'est pourquoi les modèles qui veulent représenter le changement climatique en utilisant les lois de la mécanique, de la thermodynamique, et du transfert radiatif doivent couvrir le globe. Il faut également prendre en compte toutes les composantes du système: l'atmosphère, l'océan, la banquise, voire les glaciers, les aérosols et les cycles biogéochimiques. Il en résulte des outils particulièrement lourds et complexes que l'explosion des moyens de calcul lourds dans la décennie 1980-90 a permis de voir naître, et qui ont bénéficié des progrès significatifs des moyens de calcul des deux décennies suivantes. Hélas nous ne sommes plus à l'époque où on gagne un facteur 8 en vitesse de calcul tous les 4 ans, et un facteur 8 ne correspond qu'à un doublement de la résolution horizontale et temporelle, toutes choses égales par ailleurs. C'est pourquoi les modélisateurs se restreignent dans les exercices du GIEC à une résolution d'environs 300 km (Figure 1a), ce qui est notoirement insuffisant pour représenter la variabilité spatiale du climat français. Dans les études d'impact ou d'adaptation, on doit donc recourir à une approche complémentaire que l'on nomme régionalisation (ou descente d'échelle/downscaling).

## La descente d'échelle dynamique

Comme on dispose grâce aux scénarios globaux de toutes les composantes du climat, on peut d'abord faire l'hypothèse que la composante lente du système (océan, cryosphère, composition chimique) est peu modulée par les forçages de petite échelle (typiquement le relief non résolu par les modèles globaux). On se concentre alors sur la composante atmosphérique. Les simulations peuvent être plus courtes (30 ans au lieu de 200 ans) et la mise à l'équilibre du modèle prend un à deux ans au lieu de plusieurs siècles. On peut ensuite jouer sur la résolution horizontale pour améliorer le forçage par le relief. La technique la plus couramment employée est la méthode des modèles emboîtés (Giorgi, 1990). Elle consiste à ne modéliser que la région d'intérêt et à relaxer ses frontières vers les valeurs du modèle global. Une autre technique plus coûteuse en calcul mais plus simple à mettre en oeuvre consiste à augmenter la résolution dans la région d'intérêt et la laisser telle quelle loin de cette région (Déqué et Piedelievre, 1995). La figure 1b montre ce que donne sur la France le relief du modèle global Arpege utilisé dans Climator. La résolution est de 50 km sur la France contre 300 km dans le Pacifique tropical. On peut espérer représenter grossièrement ainsi les climats océaniques, tempérés et de montagne sur notre pays

## La descente d'échelle statistique

Ce raffinement n'est pas suffisant parce que le climat des modèles ne correspond pas exactement au climat observé. A l'échelle planétaire, les différences sont peu visibles. Mais pour une station donnée, le biais peut être rédhibitoire dès lors que les données atmosphériques sont utilisées en entrée d'un modèle d'impact. En outre on dispose en France d'un réseau d'observations météorologiques dont la maille est environ 30 km en plaine et 10 km en montagne. Le système d'analyse Safran permet de reconstituer au pas horaire et sur une grille de pas 8 km un certain nombre de variables directement comparables à des sorties de modèle (figure 1c). Cependant dans Climator nous nous sommes limités à 12 stations et nous avons employé quatre méthodes de descente d'échelle statistique.

- La première (ANO) consiste simplement à calculer la différence entre le climat moyen futur et le climat moyen présent tels que vus par le modèle. On considère que climat futur est constitué par la somme des données quotidiennes observées et de cette différence.
- La deuxième (TT) consiste à n'utiliser que les caractéristiques quotidiennes de grande échelle du modèle. Une classification en types de temps (Boé et al., 2006) permet d'associer grande échelle et valeur locale à partir des observations. Le climat futur est alors constitué à partir de

la chronologie des types de temps du modèle, et d'un tirage de situations analogues dans les observations.

- La troisième (QQ) est une généralisation de la méthode de correction de biais. On suppose que le modèle possède sa propre échelle de variation et on l'associe à l'échelle des variations observées en appariant les quantiles de la distribution (Déqué 2007). On construit ainsi une fonction de correction empirique que l'on applique aux sorties du modèle pour le climat futur. Dans Climator, cette méthode (comme la méthode TT) a été améliorée par rapport à la méthode originale.
- La quatrième (WACS-Gen) consiste en un générateur stochastique qui crée des séries quotidiennes par tirages dans une loi multivariée ajustée sur les observations et perturbée pour tenir compte du changement de climat de grande échelle.

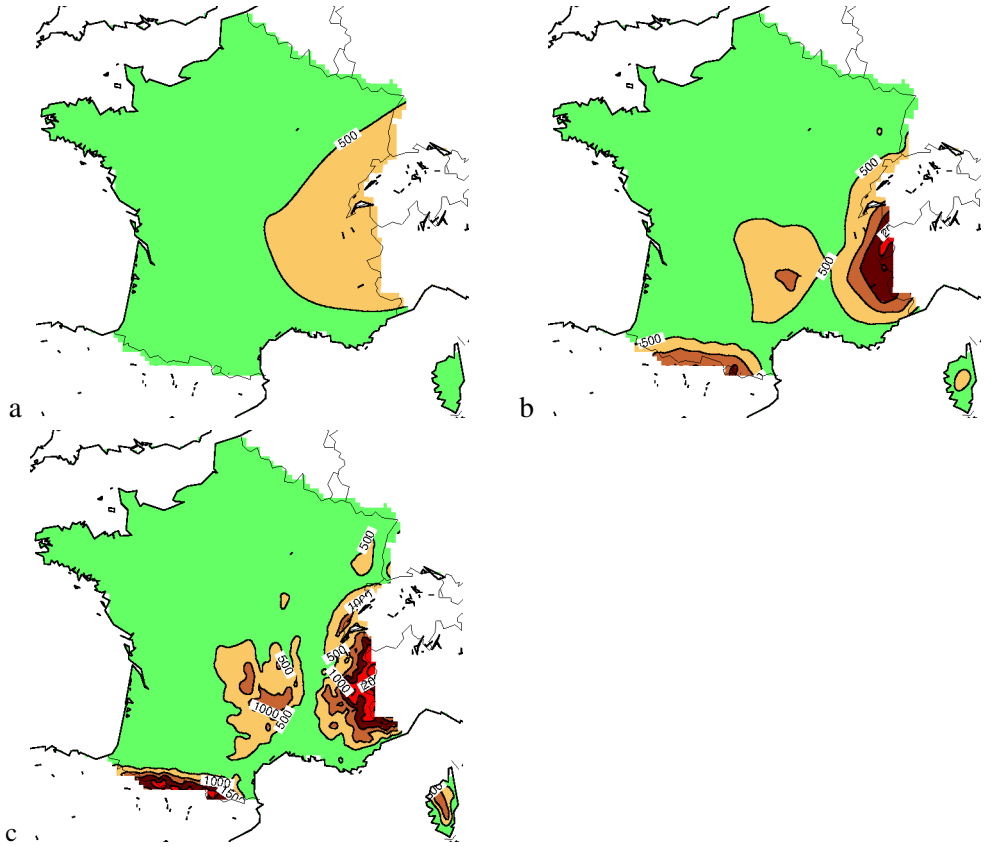



*Figure 1: Le relief de la France vu par les modèles du GIEC (a), le modèle Arpege étiré (b) et les analyses Safran (c); intervalle 500 m*

## Références


Boé J., L. Terray, F. Habets and E. Martin, 2006: A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling J. Geophys. Res., 111, D23106.

M. Déqué and J.Ph. Piedelievre, 1995. High resolution climate simulation over Europe. Climate Dynamics,11,321-339

Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change, 57, 16-26.

Giorgi, F., 1990: Simulation of regional climate using a limited area model nested in a general circulation model. J. Climate, 3, 941-943.

# Générateur climatique WACS-Gen et désagrégation horaire

**D. Allard[1], C. Flecher[1,2], P. Naveau[2]**

[1] INRA, UR Biostatitique, Avignon, France
[2] CNRS, LSCE, Gif-sur-Yvette, France
*Auteur correspondant : allard@avignon.inra.fr

## Introduction : nécessité de la régionalisation

Le principe général d'une étude d'impact du changement climatique repose sur deux étapes: la première est la production des données climatiques du futur (appelées aussi projections) simulées par un ensemble de modèles climatiques globaux de grande échelle (avec des mailles entre 150 et 300 kilomètres) en fonction de plusieurs scénarii d'émissions anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols) pour le 21ème siècle. Les données climatiques brutes produites par ces modèles ne sont pas suffisantes pour conduire une étude d'impact à échelle fine sur le territoire étudié et une étape supplémentaire est nécessaire : la régionalisation des données climatiques, également appelé descente d'échelle. Il s'agit de raffiner spatialement les données climatiques en essayant de prendre en compte les hétérogénéités spatiales non ou mal résolues par les modèles climatiques globaux (relief, trait de côte, usage des sols). Il s'agit aussi de corriger les distributions spatio-temporelles des variables climatiques d'intérêt de leurs défauts statistiques les plus pénalisants. Dans le cadre de ce projet, trois méthodes de régionalisation très différentes ont été mises en œuvre. Elles appartiennent aux deux grandes familles des techniques de désagrégation, statistique et dynamique. L'approche dynamique, non abordée ici, repose sur l'utilisation de modèles climatiques régionaux à résolution spatiale plus fine, et donc plus réaliste, que celle des modèles climatiques globaux (avec des mailles entre 25 et 50 kilomètres). L'approche statistique se décompose de deux étapes : tout d'abord l'apprentissage d'une fonction de transfert entre une ou plusieurs variables climatiques observées ou réanalysées de grande échelle (typiquement les données de circulation atmosphérique) et les variables observées (par exemple température et précipitation) aux échelles locales ; puis l'application de cette fonction de transfert aux variables de grande échelle issues des projections climatiques pour générer des projections climatiques à échelle fine. Les méthodes de désagrégation statistique supposent une relative invariance de la liaison entre grande échelle et échelle locale, qui est une propriété intrinsèque de l'atmosphère. Il faut également souligner que ces méthodes ne sont pas uniquement des méthodes de désagrégation mais qu'elles ont toutes une fonction de correction des projections climatiques.

## Le générateur stochastique de temps WACS-Gen

Nous avons aussi développé dans le cadre du projet CLIMATOR un générateur stochastique de temps, WACS-Gen, qui a pu être utilisé dans l'étude des incertitudes climatiques (Allard et Brisson, 2010). On s'intéresse ici à la simulation de cinq variables climatiques (températures minimales et maximales, rayonnement global, précipitation et vitesse du vent) avec un pas de temps journalier. Le générateur WACS-Gen (Flécher *et al.*, 2010) permet de simuler de nouvelles chroniques des mêmes variables dont les propriétés statistiques sont similaires à celles de la chronique d'origine. Le générateur de temps est construit autour de deux notions principales :

1. il définit des états de temps qui généralisent la classification dichotomique jour de pluie versus jour sans pluie des autres générateurs et pouvant être compris comme des régimes de temps locaux, et non plus synoptiques comme dans les méthodes présentées dans Boé (2007) ; les états de temps évoluent selon une chaîne de Markov dont les probabilités de transition sont estimées sur des chroniques locales.
2. Conditionnellement aux états de temps, le vecteur des cinq variables d'intérêt est tiré aléatoirement selon une distribution particulière, les closed-skew normal distributions. Cette classe de distribution permet de prendre en compte l'asymétrie des variables et le contexte multivarié. Elle permet aussi de modéliser l'ensemble des corrélations entre variables, y compris avec l'intensité de précipitation. Le mélange de ces distributions définies conditionnellement aux états de temps permet entre autre la prise en compte de liens non-linaires entre les variables climatiques.

Dans le contexte de la désagrégation spatiale des variables climatiques de la « grande échelle » vers l'échelle de la parcelle un ensemble de méthodes de correction des paramètres ont été définies selon

deux grands principes et concernent les paramètres quantitatifs et dynamiques du modèle (par opposition aux paramètres structuraux tels que les structures de distributions et les corrélations) :

1. la modification des paramètres de localisation et d'échelle reposent sur des principes de conservation de rang et de corrections de biais ;
2. la modification des paramètres du processus stochastique sous-jacent de la chronique temporelle des états de temps appliquant des principes de recherche de motifs de successions de types de temps, à l'échelle de la parcelle et non à l'échelle synoptique comme dans Boé (2006).

WACS-Gen est un générateur de temps stochastique, ce qui signifie que chaque série simulée sera différente car les valeurs simulées possèdent une part d'aléa, tout en reproduisant les tendances du climat (en valeurs centrales et en variabilité) et les statistiques des variables simulées : histogrammes, matrices de covariance et auto-covariances temporelles (voir Figure 1). On peut donc générer autant de séries différentes que souhaité, ce qui permet par exemple d'explorer de façon assez fine la sensibilité au climat d'une culture par une utilisation conjointe de STICS et de WACS-Gen.

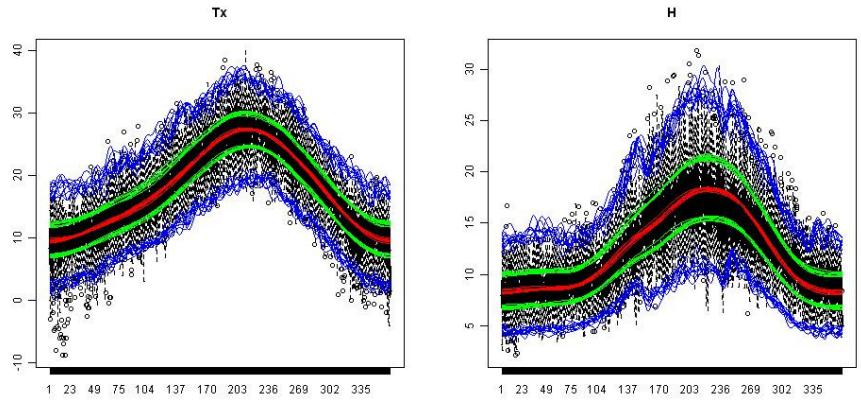



***Figure 1.*** *Température maximale (simulée) et humidité relative (reconstruite) pour le site de Toulouse, en fonction des jours Juliens. En rouge et en vert : tendance centrale et intervalle interquartile pour 10 séries de simulations ; en bleu enveloppe à 95%*

## Désagrégation horaire des pluies journalières

Certains modèles considérés dans Climator nécessitent des données de pluies selon le pas de temps horaire ; les modèles climatiques avec leur méthode de régionalisation et le simulateur stochastique de temps produisent des données au pas de temps journalier. Il est donc nécessaire de désagréger les données journalières en données horaires. Cela peut se faire sur une base physique pour les températures et le rayonnement. Pour les données de pluie, nous avons préféré une désagrégation stochastique se basant sur un modèle probabiliste. Ses paramètres ont été estimés grâce à des séries météorologiques pour lesquelles nous disposions de données horaires.

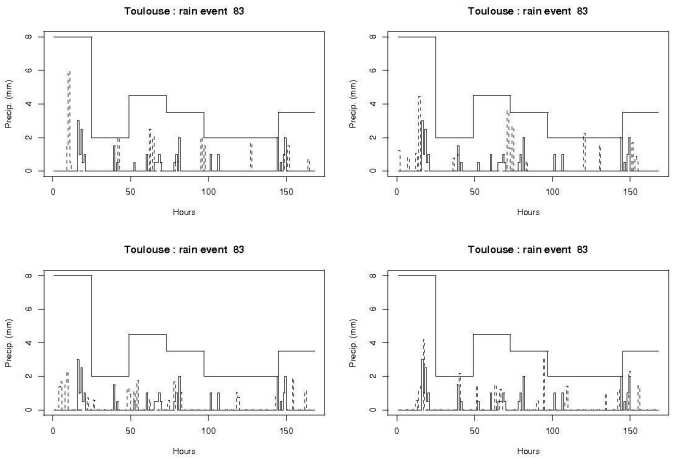



***Figure 2*** *: Désagrégation d'un événement pluvieux de 7 jours. Les valeurs mesurées sont en trait plein ; les valeurs simulées en traits pointillées. Les enveloppes sont les cumuls journaliers*


Allard, D. ; Brisson, N. 2010. Analyse des sources d'incertitude et de variabilités. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 51-62.

Flecher, C., Naveau P., Allard, D. and Brisson, N. (2010) A Stochastic Daily Weather Generator for Skewed Data, *Water Ressource Research*, doi:10.1029/2009WR008098.

Boé, J., Terray, L., Habets, F. and Martin, E. (2006) A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather-types and conditional resampling, Journal of Geophysical Research, **111**, D23106, doi:10.1029/2005JD006889.

# Théorie des valeurs extrêmes et sciences du climat : une approche probabiliste

**Philippe Naveau (naveau@lsce.ipsl.fr)**

Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement, Gif-sur-Yvette, France

## Quelques rappels théoriques sur les valeurs extrêmes

Par définition, les évènements extrêmes sont rares, mais ils se produisent et les records sont faits pour être battus. De part leur rareté et leur forte amplitude, la distribution des extrêmes est totalement différente de celle des valeurs moyennes et leur incertitude associée est naturellement plus élevée. La théorie des valeurs extrêmes (EVT en anglais) est la branche des statistiques qui décrit le comportement des plus grandes observations d'un jeu de données et son objet est d'estimer des probabilités d'événements qui n'ont pas été encore observées. L'exemple canonique en hydrologie est de calculer un niveau de retour centennale avec un échantillon qui couvre seulement une période de quelques décennies. Extrapoler doit toujours impliquer une grande prudence et nécessite des fondations mathématiques solides, en particulier pour permettre d'identifier les hypothèses et comprendre les limites de ces extrapolations. La théorie EVT a une longue histoire (Fisher and Tippett, 1928) et elle a été appliquée à une variété de problèmes financiers (Embrechts et al., 1997) et d'hydrologie (Katz et al., 2002). Son application aux études climatiques est assez récente. Ces dix dernières années, les climatologues ont commencé à tirer profit de cette théorie (e.g., Kharin et al., 2007).

Dans le cadre univarié, la pierre angulaire de la EVT est la distribution extrême généralisée (GEV en anglais) qui modélise la distribution du maximum, la plus grande valeur d'un échantillon (Coles, 2001). La justification mathématique de la GEV résulte d'un raisonnement asymptotique. à mesure que la dimension de l'échantillon augmente, la distribution du maximum se rapproche asymptotiquement d'une distribution de Fréchet, de Weibull, ou de Gumbel. Ces trois distributions peuvent être incorporées en une classe plus générale : la GEV distribution. Si la totalité de l'échantillon est disponible (et non seulement le maximum), il est possible d'améliorer l'analyse des extrêmes en travaillant sur un sous-échantillon de grandes valeurs, c'est-à-dire en imposant un seuil et en étudiant les crêtes au-dessus de ce seuil. Cette stratégie est aussi basée sur un raisonnement mathématique. Plus précisement, la distribution asymptotique des grandes valeurs au-dessus d'un seuil est appelée la 'Generalized Pareto Distribution' (GPD).

## Extrêmes et climat

Il existe actuellement un fort intérêt scientifique pour le domaine de l'analyse des extrêmes climatiques, parce qu'ils témoignent de certaines non-linéarités importantes et leurs conséquences économiques et sociales sur l'activité humaine sont énormes. Notre compréhension du comportement moyen du climat et de sa variabilité s'est beaucoup améliorée pendant ces dernières décennies. Par contre, il est toujours difficile de comprendre les événements climatiques extrêmes, et encore plus dur de les prévoir puisqu'ils sont rares et suivent des lois statistiques différentes de celles des moyennes. Nous détaillons plusieurs études de cas, pour montrer que cette théorie peut fournir une base statistique solide, particulièrement pour évaluer les incertitudes qui sont associées à toute analyse d'événements extrêmes dans le cadre de recherche climatique.

La section suivante présente rapidement les concepts d'un de ces cas. Nous illustrons à l'aide d'un article (Cooley et al., 2007), comment la distribution GPD peut servir de socle à des calculs de niveau de retour extrême. La variable d'intérêt est la précipitation journalière enregistrée dans la région du Colorado pendant la période 1948-2001. D'un point de vue méthodologique, nous avons opté pour un modèle Bayesien hiérarchique qui permet d'intégrer de manière élégante une composante spatiale sur les paramètres de la GPD. La figure ci-dessous illustre le type de résultats que nous avons obtenu avec un modèle bayesien hiérarchique.

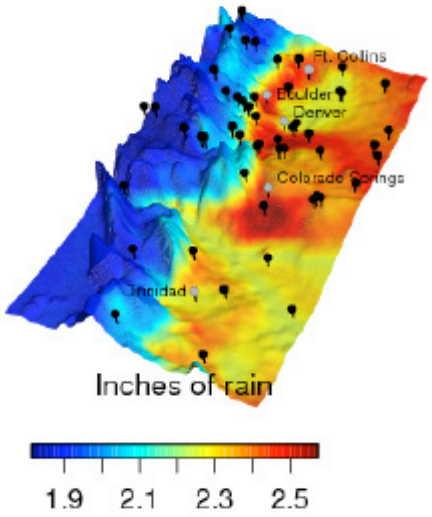



*Figure 1 : Un exemple de carte de niveau de retour de précipitations (Colorado), voir Cooley et al. (2007).*

Remerciements : ce travail a été financé par les projets : ACQWA-FP7, GIS-PEPER et ANR-MOPERA.

## Références bibliographiques

Coles, S. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values.

Cooley, D., Naveau, P., and Poncet, P. (2006). Statistics for dependent data, chapter Variograms for spatial max-stable random fields. Lecture Notes In Statistics. Springer STATDEP 2005 scientific
committee.

Cooley, D., Nychka, D., and Naveau, P. (2007). Bayesian spatial modeling of extreme precipitation return levels. Journal of The American Statistical Association, 102 :824–840.

Embrechts, P., Kl¨uppelberg, C., and Mikosch, T. (1997). Modelling Extremal Events for Insurance and Finance (Applications of Mathematics). Springer, Berlin, 1. a., 3. korr. nachdr. 2001 edition.

Fisher, R. and Tippett, L. (1928). Limiting forms of the frequency distribution in the largest particle size and smallest member of a sample. Proc. Camb. Phil. Soc.

Katz, R., Parlange, M., and Naveau, P. (2002). Extremes in hydrology. Advances in Water Resources, 25 :1287–1304.

Kharin, V. V., Zwiers, F. W., Zhang, X., and Hegerl, G. C. (2007). Changes in temperature and precipitation extremes in the ipcc ensemble of global coupled model simulations. J. Clim.,
20 :1419–1444.

Naveau, P., Guillou, A., Cooley, D., and Diebolt, J. (2009). Modeling pairwise dependence of maxima in space. Biometrika, 96(1) :1–17.

# Retour d'expérience sur la comparaison des modèles d'agro-écosystème

**N. Brisson[1*], J.L. Durand[1], P. Gate[2], L. Guilioni[3], F. Huard[1], R. Lardy[1], D. Ripoche[1], R. Roche[1], D. Allard[1]**

[1] INRA, France
[2] ARVALIS-Institut-du-Végétal, France
[3]SUPAGRO, Montpellier, France
*Auteur correspondant : brisson@avignon.inra.fr

## Introduction

L'objectif de cette communication est de proposer à la communauté des modélisateurs un retour d'expérience en matière d'utilisation parallèle de plusieurs modèles supposés reproduire la même réalité agricole. Des couples (ou triplets) de modèles ont été sélectionnés à cet effet (Tableau 1).

| culture | Modèles comparables | Variables |
|---|---|---|
| blé | CERES, PANORAMIX, STICS | Production, phénologie |
| blé | CERES, STICS | Eau, azote |
| tournesol | SUNFLO, STICS | Production, phénologie, eau |
| prairie | PASIM, STICS | Production, eau, azote |
| vigne | BHV, STICS | Phénologie, eau |
| forêt | GRAECO, BILJOU | Eau |
| carbone sol | CENTURY, STICS | MO |

***Tableau 1** : Modèles utilisés dans CLIMATOR et comparaisons possibles*

Notre idée première était de cerner ainsi l'erreur épistémique (qui correspond à la connaissance imparfaite que nous avons des systèmes étudiés), que nos modèles agronomiques engendraient sur les résultats finaux. Confrontée à la dure réalité de la modélisation cette première idée s'est sensiblement modifiée….

## Conditions de simulation pour comparer les modèles

### *Les entrées*

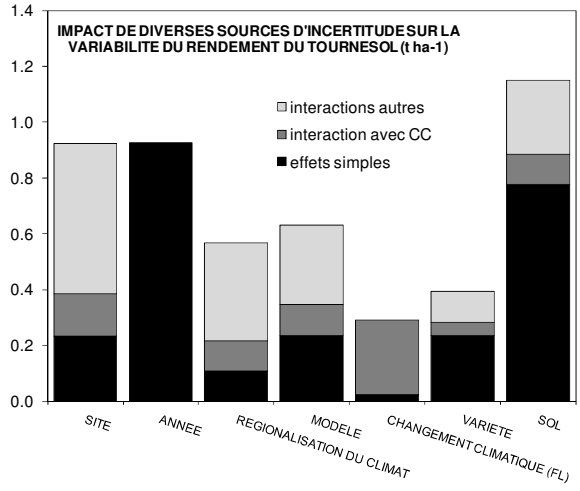
Bien que représentant un même système, les modèles n'admettent pas rigoureusement les mêmes variables et paramètres d'entrée. Un minutieux travail a donc été nécessaire pour se doter de fonctions permettant la mise en adéquation des divers jeux de paramètres. En ce qui concerne les sols, issus de la base de données de profils de sols d'INFOSOL, nous avons, par exemple, utilisé les fonctions de Wöesten pour les paramètres hydrodynamiques. En dérivant les humidités caractéristiques aux potentiels requis, les deux types de modèles (réservoir et loi de Darcy) ont pu être en phase. Les variétés ont été caractérisées par la durée de leur phase en temps thermique (ou vernalo-photothermique pour les cultures d'hiver), leur rendement potentiel et les relations entre composantes du rendement. Au sujet du climat, un jeu de relations analytiques et statistiques a été développé afin de passer du pas de temps journalier au pas de temps horaire. L'évapotranspiration de référence a été calculée selon la formule de Penman-Monteith. Enfin les pratiques (semis, densité de plantation, irrigation, fertilisation, dates de coupe) ont été homogénéisées (Huard, 2010).

### *Les processus*

Si l'on peut admettre que les modèles diffèrent dans la mise en équation des processus, la prise en compte des processus en interaction avec le climat est indispensable. Il s'agit de la phénologie (pilotée par la température), du bilan hydrique en continu, de l'influence du $CO_2$ (sur la photosynthèse et la transpiration) et de la prise en compte des accidents physiologiques liées aux températures élevées (échaudage des céréales en particulier). Afin de mettre tous les modèles en adéquation du point e vue des processus, de nouvelles fonctions ont été introduites (cas du $CO_2$ dans CERES et PANORAMIX: cf Roche et Olioso dans les actes du colloque ou de l'échaudage dans CERES) ou modifiées (cas de l'évaporation du sol pour tenir compte de la phase hivernale dans SUNFLO).

## Que dire de l'incertitude épistémique ?

La figure 1 est caractéristique de nos résultats. Elle montre que l'incertitude engendrée par les modèles (ici STICS et SUNFLO) est d'un ordre de grandeur comparable à la variabilité entre méthodes de régionalisation (autres source d'incertitude épistémique de nature climatique). Elle est le plus souvent inférieure aux sources de variabilité majeures que sont les sites et les sols, et inférieure également à la variabilité interannuelle. Ce constat est plutôt rassurant et montrent que les modèles agronomiques sont convergents en terme d'ordre de grandeur. Cependant, dans l'exemple du Tournesol dans le Sud de la France (Fig. 1), l'erreur liée aux modèles est supérieure aux effets du changement climatique, et ce en forte interaction avec d'autres sources de variabilité (sol, variété en particulier). Même si cela est moins vrai lorsque l'ensemble des sites est pris en compte (à cause de




l'effet « tout ou rien » du changement climatique sur la culture du Tournesol pour les sites septentrionaux), ces résultats nous ont incités à considérer les modèles indépendamment les uns des autres et à en analyser les comportements différentiels.

***Figure 1** : Estimation du poids relatif des diverses sources d'incertitudes et de variabilité sur le rendement du Tournesol. 3 sites (Toulouse, Bordeaux, Avignon), 2 modèles (STICS et SUNFLO), 2 variétés, 3 méthodes de régionalisation, 2 périodes représentant le temps et donc le changement climatique (PR et FL), 3 sols.*

## Meilleure connaissance de nos modèles

L'examen minutieux des modèles montre qu'ils diffèrent surtout dans l'estimation des contraintes abiotiques (eau, azote) et leur impact sur la croissance et le rendement. Il en résulte que, selon les conditions pédoclimatiques, la réponse à la question : « les modèles agronomiques donnent-t-ils des réponses semblables ? » sera, sans transition, optimiste ou pessimiste. Ainsi, nous avons noté que le modèle STICS était beaucoup plus sensible au stress hydrique que les modèles CERES et PANORAMIX (pour le blé) et SUNFLO (pour le tournesol) : sur des sols à réserve utile confortable ces modèles convergent (rendements semblables) alors que sur des sols à faible réserve utile, les résultats issus de STICS sont systématiquement inférieurs. Par ailleurs, STICS prenant en compte l'excès d'eau et son impact sur la croissance, il donne également de faibles rendements en blé sur les sols profonds des sites à forte pluviométrie (Bordeaux par exemple).

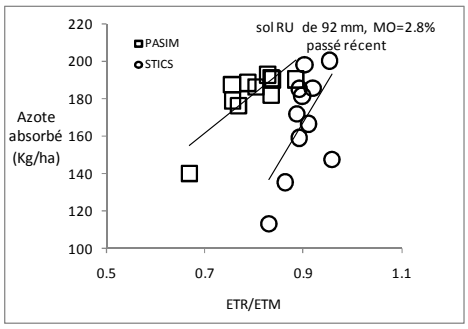



***Figure 2 :** Azote absorbé par une prairie de Fétuque en fonction de son confort hydrique (ETR/ETM) pour STICS et PASIM. PR, régionalisation TT, sol de 92mm de RU*

Dans le cas de STICS et PASIM, deux modèles simulant un couvert prairial, la différence est ailleurs et sans doute plus subtile. En effet les deux modèles convergent sur un sol à RU modeste et divergent sur un sol à forte RU, en termes de rendement et d'azote absorbée alors que leurs comportements hydriques sont comparables. PASIM répond beaucoup moins à l'azote que ne le fait STICS, de sorte que même dans des conditions hydriques favorables la croissance du couvert est limitée par l'azote. En d'autres termes, la simulation des interactions eau-azote est différente, comme le montre la Figure 2 (cf. Durand et al. dans les actes du colloque). Or les deux modèles sont de conception très différente. PASIM est un modèle centré sur le bilan de carbone : indice foliaire calculé à partir d'une allocation aux parties foliaires et d'un SLA, biomasse racinaire issue d'une allocation aux racines, et bilan géochimique du sol piloté par le carbone (CENTURY). STICS est un modèle plus « découplé » (moins de rétroaction entre le bilan de carbone et la croissance des capteurs) où feuilles et racines sont d'abord générées en fonction de la température, de l'eau et de l'azote, et la géochimie du sol est pilotée par l'azote. Ce découplage entraine une plus grande réactivité aux facteurs du milieu.

Les divergences mentionnées ci-dessus, liées aux contraintes abiotiques et donc aux situations pédoclimatiques, entrainent un comportement différent des modèles en termes de variabilité aussi bien temporelle que spatiale et expliquent la Figure 1.

## Références bibliographiques

Huard, F. 2010. Quelle agriculture dans CLIMATOR ? Choix des sites, des systèmes agricoles et forestiers et des sols. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : "Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces, Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 33-40.

# Analyse des sources d'incertitudes et de variabilités

**D. Allard[1*], N. Brisson[2],**
[1] INRA, UR Biostatitique, Avignon, France
[2] INRA, Agroclim, Avignon,France
*Auteur correspondant : allard@avignon.inra.fr

## Introduction

Lorsque nous cherchons à quantifier les effets du changement climatique sur les agro-systèmes, nous sommes rapidement confrontés à de nombreuses sources d'incertitudes et de variabilités, liées au climat futur, aux systèmes agronomiques, à leur représentation par un modèle, au nombre et à la localisation géographique des sites étudiés, au sol et à des choix techniques (date de semis, irrigation, …). Ces sources de variabilités n'ont pas toutes le même statut. Il est donc utile de distinguer incertitudes et variabilités.

En conformité avec d'autres travaux sur les impacts du changement climatique, nous avons appelé incertitudes ce qui ne peut être déterminé de façon sûre par nos connaissances actuelles. Certaines sont irréductibles, comme les incertitudes sur les scénarios de concentration des gaz à effet de serre (scénarios SRES). D'autres sont liées à une connaissance insuffisante ; elles sont présentes dans les modèles climatiques, les méthodes de régionalisation et les modèles de culture utilisés pour l'étude d'impact.

A côté de ces incertitudes existent des sources de variabilités, qui sont soit subies (variabilité inter-annuelle, variabilité des sols et des sites étudiés) ou qui au contraire constituent des choix possibles pour la conduite de l'agriculture (choix de variétés, itinéraires techniques,…). Quel que soit leur statut, incertitudes et variabilités doivent être explorées autant que possible. Dans le travail présenté ici, les incertitudes d'origine socio-économique, pourtant très importantes, non pas pu être prises en compte; les aspects liés aux pratiques ne sont considérés que dans leurs déterminants biophysiques.

Trois méthodes ont été retenues pour explorer et quantifier les incertitudes et sources de variabilité pour deux périodes de temps (futur proche [FP] : 2030-2049 : futur lointain [FL] : 2070-2099). L'analyse en boxplot (Figure 1) permet une comparaison visuelle de la valeur centrale, de la variabilité et des valeurs extrêmes lorsque l'on fait varier les modalités. Cette représentation est complétée par une analyse statistique des effets (Tableau 1), avec leur significativité et par une hiérarchisation des sources de variabilité, y compris l'effet résiduel de la variabilité interannuelle (Figure 2).

## Quelques résultats

*Incertitude climatique*

En ce qui concerne l'ensemble des composantes de l'incertitude climatique explorée en Figure 1, l'analyse montre, sur les deux sites de Colmar et Toulouse, que les différents scénarios SRES et les différentes méthodes de régionalisation présentent une variabilité comparable pour le FP. Pour le FL, en revanche, l'effet du au choix du scénario domine largement les effets dus à la méthode de régionalisation.

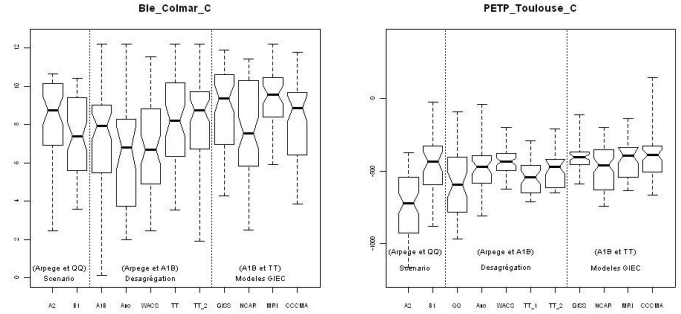



***Figure 1** : boxplots du rendement de blé tendre , issu de STICS pour Colmar (gauche) et du bilan hydrique climatique P-$ET_0$ pour Toulouse (droite), pour la période Futur Lointain.*

*Impact du changement climatique sur le rendement, vu à travers les sites et les cultures*

L'analyse des effets du changement climatique décomposée par site (Tableau 2) montre qu'un effet jugé significatif globalement (sites et cultures) peut cacher des évolutions localement contrastées ou localement non significatives et qu'il n'est pas raisonnable de parler d'un impact généralisé sur l'ensemble du territoire et pour l'ensemble des cultures. Le poids de l'incertitude liée aux modèles est important mais on observe, le plus souvent, des tendances évolutives de même sens avec des sensibilités différentes au changement climatique, en particulier en termes de variabilité.

Tableau 1 : différence des rendements moyens entre les périodes futures (FP et FL) et le passé récent (PR) pour 12 sites et 8 cultures. **Gras** : p<0.01 ; italique : p<0.05 ; droit p<0.10 ; ~~barré~~ : non significatif.

| | Blé | Maïs | Colza | Tournesol | Sorgho | Vigne | Pin | Fétuque |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Avignon** | ~~0,047~~ | **-0,998** | ~~-0,356~~ | ~~0,254~~ | ~~0,142~~ | **-0,330** | **-0,19** | ~~-0,64~~ |
| **Bordeaux** | ~~0,656~~ | **-0,901** | ~~0,029~~ | ~~0,085~~ | **-0,766** | *0,152* | **-0,18** | ~~-0,25~~ |
| **Clermont-Theix** | ~~0,110~~ | **2,324** | **1,436** | *0,592* | ~~0,215~~ | ~~0,135~~ | **-0,14** | **0,88** |
| **Colmar** | *1,058* | **-0,810** | **0,669** | ~~-0,315~~ | ~~-0,292~~ | **0,560** | **-0,34** | -0,59 |
| **Dijon** | ~~0,853~~ | *-0,304* | *0,646* | ~~0,073~~ | ~~0,212~~ | **0,679** | **-0,26** | ~~-0,15~~ |
| **Lusignan** | ~~0,307~~ | **-0,636** | ~~0,226~~ | ~~0,113~~ | -0,639 | **0,443** | **-0,41** | **-0,81** |
| **Mirecourt** | **1,886** | **4,255** | **1,400** | **2,706** | **5,728** | **3,603** | **0,17** | *0,61* |
| **Mons** | *1,053* | **3,221** | ~~0,108~~ | **1,914** | **4,136** | **2,747** | **-0,23** | ~~-0,41~~ |
| **Rennes** | ~~-0,149~~ | ~~0,161~~ | ~~0,059~~ | **1,013** | **2,161** | **1,544** | **-0,11** | *-0,68* |
| **St Etienne** | **2,430** | **-1,186** | **0,969** | ~~-0,155~~ | ~~-0,314~~ | 0,270 | **-0,38** | *-1,00* |
| **Toulouse** | 1,284 | **-0,973** | ~~0,002~~ | ~~0,049~~ | -0,728 | **-0,455** | **-0,42** | *-0,65* |
| **Versailles** | **0,877** | **1,300** | ~~0,347~~ | **1,370** | **2,560** | **1,850** | **-0,06** | ~~-0,22~~ |
| **Tous** | **0,868** | **0,454** | **0,461** | **0,642** | **1,035** | **0,933** | **-0,21** | **-0,330** |

*Hiérarchisation des facteurs de variabilités et moyens d'action pour l'agriculture*

Au contraire des incertitudes, que pour l'essentiel on subit, certaines sources de variabilité peuvent constituer des marges de manœuvre pour l'agriculture, par exemple par un déplacement de certaines cultures, des choix variétaux adaptés ou des choix d'itinéraires techniques. Les moyens dont dispose l'agriculteur (choix de sol, de variété, de dates de semis) apparaissent, dans un classement qui varie selon le modèle considéré comme des moyens pouvant modifier l'effet du changement climatique sur le rendement du blé. Cependant les effets de la variabilité interannuelle du climat et de la variabilité géographique restent, et de loin, les premiers déterminants de la variabilité de la production de blé.

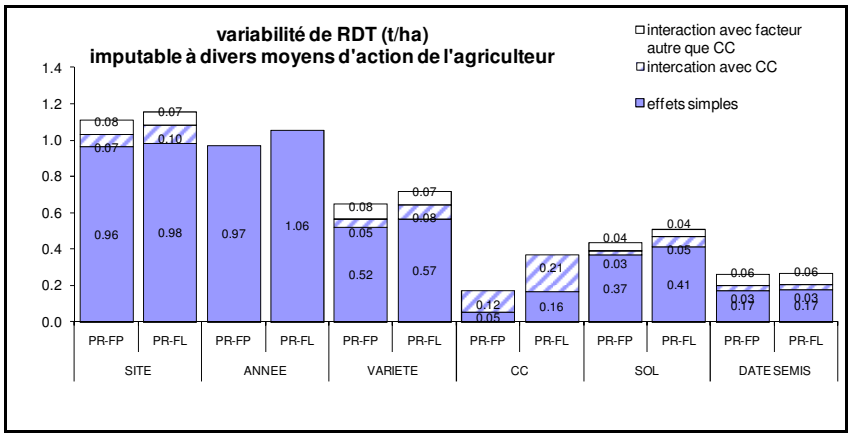



***Figure 2** : analyse de la variance pour le rendement de blé simulé avec PANORAMIX. Pour chaque facteur, en bleu uni la part de variance correspondant à l'effet simple ; en bleu hachuré, la part de l'interaction avec la période (CC) ; en transparence, la part de l'interaction avec d'autres facteurs que la période. Le CC a été considéré séparément pour l'horizon proche (FP) et l'horizon lointain (FL).*

# Anticipation des stades phénologiques, raccourcissement des phases et conséquences calendaires

**P. Gate[1*] et N. Brisson[2]**
ARVALIS-Institut-du-Végétal Paris, France
INRA, Agroclim, Avignon, France (brisson@avignon.inra.fr)
*Auteur correspondant : p.gate@arvalisinstitutduvegetal.fr

## Introduction

L'étude a porté sur 3 grands types d'espèces : des espèces d'hiver semées à l'automne, (le blé et le colza), des espèces de printemps (le maïs, le tournesol et le sorgho) et des espèces pérennes comme la vigne. Quelles que soient ces espèces, la température constitue le principal moteur de la vitesse du développement mais son rôle est modulé différemment en fonction de certaines spécificités.

Pour les espèces d'hiver, la température peut être freinée par l'action des jours courts et de la vernalisation qui se déroule plus lentement quand la température est trop faible ou trop élevée. Pour la vigne, on peut mentionner le phénomène de dormance qui peut se traduire également par un allongement de la période végétative. Ces trois types d'espèces se distinguent également par un positionnement calendaire différent de leurs cycles et par ailleurs, l'offre thermique dépend de la situation géographique.

Ces éléments sont importants car l'anticipation dépendra à la fois du réchauffement estimé, de sa répartition selon les saisons, et aussi de l'état initial. Pour analyser ces comportements, nous avons retenu 3 stades clefs : la floraison, la récolte et la durée entre ces deux stades.

## L'anticipation des stades phénologiques : principal impact du changement climatique

Quels que soient les sites, les cultures, les modèles agronomiques et les méthodes de régionalisation, l'anticipation des stades phénologiques est significative : c'est donc un résultat majeur de notre étude.

Ce sont les cultures d'hiver vernalisables et photosensibles (blé et colza) qui subissent l'anticipation la plus modeste avec pour la récolte 8 jours pour le futur proche (FP) et de 16 pour le futur lointain (FL). A l'opposé on trouve les cultures de printemps, avec au premier rang, le maïs subit la plus forte anticipation (de l'ordre de 25 jours en FP et 41 jours en FL), puis la vigne. En tendance générale, on note que l'anticipation sera d'autant moins prononcée que le site est initialement chaud. Nous concluons par ailleurs que les cultures d'hiver subissent essentiellement une anticipation de la floraison. En revanche la phase de remplissage pour les cultures de printemps subit une réduction sensible, potentiellement préjudiciable au rendement, de l'ordre de 10 à 20 jours pour le maïs et de 8 jours pour le tournesol, en FP.

L'effet exercé par les variétés sur l'anticipation de la floraison s'avère marginal pour le blé, et les écarts restent également faibles pour les espèces de printemps. Concernant la maturité, les résultats mettent en évidence des différences variétales plus prononcées pour les espèces semées au printemps et la vigne, les variétés tardives anticipant davantage (par exemple, pour le tournesol, écarts de 10 jours entre Prodisol, précoce et Mélody, tardive). A contrario, pour les cultures d'hiver, on note la tendance inverse, avec une amplitude plus modérée. Cette distinction de comportement peut s'expliquer par le fait qu'une variété tardive, semée au printemps, rencontre dans le futur un plus grand nombre de jours avec des températures élevées. Dans le cas du blé, les variétés tardives ont des freins dus à la durée du jour et à la vernalisation plus prononcés. Quelles que soient les espèces, les modèles et les situations géographiques, la méthode de régionalisation quantile-quantile donne systématiquement un niveau d'anticipation plus faible. C'est une source d'incertitude non négligeable, la plupart du temps plus importante que la différence entre modèles.

## Le réchauffement : moteur de l'anticipation

Nous avons exprimé l'anticipation des stades en fonction de l'élévation moyenne de la température annuelle, calculée par site et par méthode de régionalisation. La bonne qualité des ajustements ($r^2$ > 0.75) autorise une utilisation de ces références pour estimer de manière simple l'ordre de grandeur de

l'anticipation en fonction du réchauffement moyen annuel. La synthèse entre les modèles, les méthodes de régionalisation et les variétés donne les ordres de grandeur du tableau 1 pour les anticipations de floraison et de récolte.

| culture | Δ floraison en j/°C | Δ récolte en j/°C |
|---|---|---|
| **Blé** | 5 | 6 |
| **Maïs** | 5 | 15 |
| **Tournesol** | 4 | 9 |
| **Vigne** | 8 | 10 |

***Tableau 1** : ordres de grandeur des anticipations pour la floraison et la récolte en fonction du réchauffement annuel (moyenne de l'ensemble des résultats du projet pour différentes espèces).*

## Les conséquences physiologiques de l'anticipation sur le confort hydrique

La précocité variétale intervient significativement sur l'évolution du confort hydrique. Si aujourd'hui l'enjeu de la précocité variétale est faible, il deviendra de plus en plus important au fil du temps, avec dans le cas du blé, des écarts de confort hydrique de l'ordre de 0.12 dans le FP et de 0.15 dans le FL, y compris en sol profond.

## Adaptation par calage du cycle

C'est sur le blé et le tournesol que nous avons réalisé cette étude prospective en faisant varier les dates de semis et en analysant l'évolution des risques climatiques sur des phases sensibles (phénorisques) engendrés.

Pour le blé, le risque de gel hivernal de gel d'apex diminuent partout (sauf en altitude) pour devenir dès le FL inférieur à 2 années sur 10 y compris en semis très précoce. Pour le tournesol, l'occurrence des températures sub-optimales à des stades sensibles augmentent pour le FP, ce qui constitue un frein à la mise en place de stratégie d'esquive via des semis et des variétés plus précoces.

Pour le blé et le tournesol, la fréquence de températures supra-optimales en fin de cycle (floraison et au cours du remplissage) s'accroît très fortement en dépit de l'anticipation des stades : le risque augmente de l'ordre 15 à 30% dans le FP et de l'ordre de 40-50% dans le FL pour le blé et un peu plus pour le tournesol.

Les jours disponibles pour les opérations de récolte ont été estimés en utilisant le simulateur OTELO pour les espèces d'hiver (choix du blé) et de printemps (choix du maïs). Les jours disponibles vont augmenter pour les deux espèces, ce qui constitue un bénéfice significatif surtout pour le maïs, dont la fréquence actuelle de jours disponibles est parfois limitante. S'agissant des opérations de semis, on conclut à de plus grandes possibilités de chantiers pour le blé en semis précoces. Toutefois, les conditions trop sèches dans le FL pourraient gêner la germination. Pour le maïs, le fait de semer plus tôt, ne posera pas de problème de jours disponibles dans le FL, mais peut en poser davantage dans le FP, pour les semis les plus précoces, dans les sites du Nord de la France.

## Ce qu'il faut retenir

L'anticipation est significative quelles que soient les espèces avec un gradient qui dépend du positionnement calendaire du cycle de la culture. Elle est donc moins prononcée sur le blé et le colza que sur le maïs, le tournesol et la vigne. Pour ces dernières, à l'anticipation de la floraison s'ajoute un raccourcissement significatif de la phase de remplissage, potentiellement préjudiciable au rendement. Il est possible de fournir des ordres de grandeur de l'anticipation des stades en fonction du réchauffement annuel prédit, ce qui permet d'appréhender la différence entre tous les scénarios à notre disposition. En dépit de l'avancée des stades, certains risques augmenteront quelles que soient les espèces. C'est notamment le cas du stress hydrique, et du risque de températures supra-optimales post floraison. Le risque de basses températures tend à diminuer pour le blé mais subsiste pour le tournesol, ne permettant pas d'assurer la réussite de stratégies d'esquive. Le recours à des semis plus précoces sera possible pour les cultures de printemps mais se heurtera pour les cultures d'hiver aux problèmes de sécheresse du sol, qui pénalisent l'implantation. Les possibilités d'esquive apparaissent plus efficaces en jouant sur la précocité variétale que sur les dates de semis, en particulier pour les risques d'échaudage.

## Confort hydrique et restitution d'eau aux nappes

**B. Itier**
INRA, EGC, Thiverval-Grignon,France (itier@grignon.inra.fr)

### Introduction

Le changement climatique se traduira non seulement par une augmentation de température mais également par un changement de pluviométrie. Sur le plan hydrique, il y aura donc changement de l'offre (précipitations) mais aussi de la demande (évapotranspiration potentielle) sous l'effet des changements de température et nébulosité. Le modèle ARPEGE régionalisé prévoit une baisse de pluviométrie sur l'ensemble du territoire français (en accord avec l'ensemble des 20 modèles du GIEC), laquelle affectera principalement l'ouest et surtout le sud-ouest. L'agriculture (et plus généralement l'espace rural) est doublement concernée par la ressource en eau : Elle en dépend au travers du confort hydrique des plantes et elle a une influence sur elle au travers de sa consommation d'une ressource en partage avec d'autres acteurs de la société. C'est cette double relation et son évolution que le projet CLIMATOR s'est attaché à analyser.

### Incidence du changement climatique sur la disponibilité de l'eau pour les cultures

Le confort hydrique, représenté par ETR/ETM, décroitra (cf. Fig. 1 pour la Forêt) sur l'ensemble des couverts renseignés (Brisson, 2010 dans Brisson et Levrault, 2010). Pour la vigne, cette décroissance sera plus forte au nord qu'au sud où elle est déjà stressée. Pour les cultures d'hiver bénéficiant pleinement de l'esquive liée au décalage phénologique (Gate et Brisson, 2010 dans Brisson et Levrault, 2010), elle sera moins forte que pour les cultures de printemps dont la phase de remplissage sera ramenée aux périodes les plus chaudes de l'année

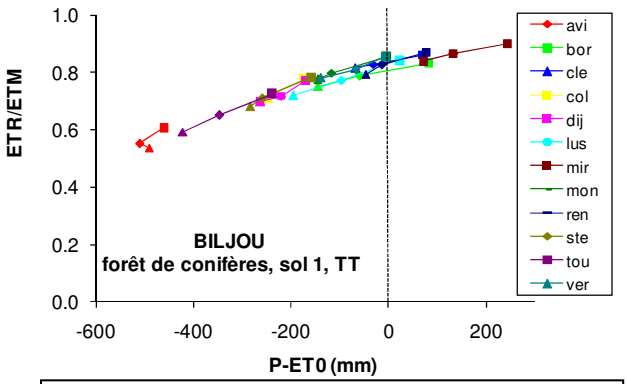



*Figure 1 : Evolution avec BILJOU du rapport ETR/ETM pour les conifères en fonction de l'indice agroclimatique (P-ET0 : ■ passé récent, ♦ futur proche, ▲ futur lointain)*

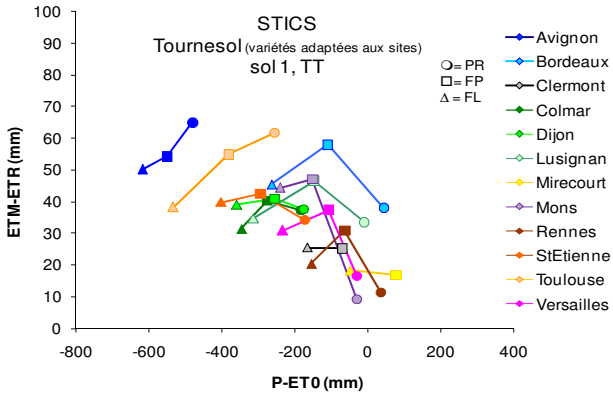



*Figure 2 : Evolution de la différence ETM-ETR Tournesol (STICS) en fonction de l'indice agroclimatique P-ET0 : ■ passé récent, ♦ futur proche, ▲ futur lointain*

Le déficit hydrique (ETM-ETR), représentatif d'un besoin d'irrigation potentiel, augmentera dans un premier temps en raison de l'augmentation de ETo (cf. Fig. 2) pour revenir dans le futur lointain à des valeurs proches des valeurs actuelles. C'est très certainement au raccourcissement du cycle phénologique que l'on doit cet effet qui tamponnera partiellement la tension sur la ressource en eau d'irrigation (Levrault et al., 2010 dans Brisson et Levrault, 2010)

### Incidence du changement climatique sur la ressource en eau : analyse de différents systèmes de culture

Les différents systèmes de cultures et les végétations naturelles ont chacun un comportement particulier en matière de restitution d'eau au milieu ( Drainage + Ruissellement –Irrigation). La Fig. 3 illustre, pour le passé récent, les différences de recharges des aquifères sous systèmes pluvial et irrigué (maïs), cultures ou végétations pérennes et annuelles, cultures de printemps (tournesol) et d'hiver (blé). L'évolution dans le temps de la restitution au milieu a été approchée de 2 façons :

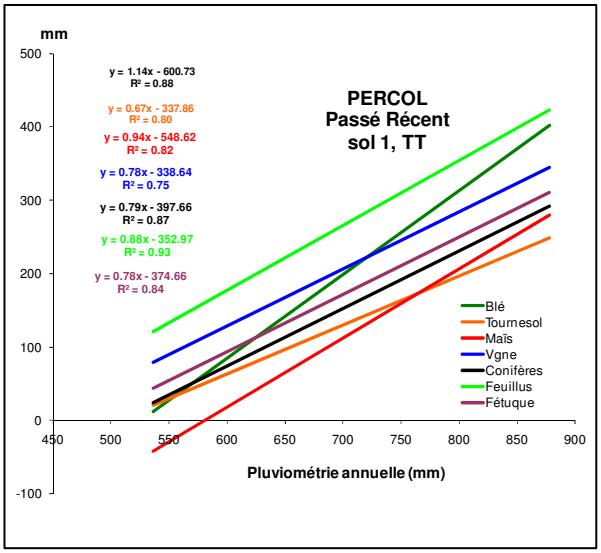



*Figure 3 : Régressions linéaires entre la recharge des aquifères (PERCOL) et la pluviométrie annuelle établies pour différents systèmes de culture ou végétations naturelles dans le passé récent à partir des 12 sites.*

- soit en comparant, système par système, la relation recharge – pluviométrie pour les trois périodes étudiées (1971-2000, 2021-2050, 2071-2100) (cf. Fig. 4)
- soit en établissant, système par système, la relation entre baisse de pluviométrie (ΔP) et baisse de recharge (Δ Percol), où Δ se réfère au passé récent. (cf. Fig 5)

Pour un système donné, l'évolution temporelle de la recharge en fonction de la pluviométrie est très voisine de l'évolution spatiale obtenue pour le passé récent. C'est ce qu'indique la Fig. 4 pour le tournesol par comparaison à la régression le concernant en Fig. 3. Ceci amène à conclure que la baisse de recharge sera plus forte pour les systèmes aujourd'hui plus vertueux comme les cultures d'hiver. C'est ce que confirme la Fig. 5 où l'on compare baisse de la recharge et baisse de pluviométrie pour blé et tournesol. Les cultures de printemps en pluvial ne seront pas pour autant la panacée dans la mesure où elles souffriront davantage de la sécheresse. Notons par ailleurs que la baisse de recharge sera au moins des 2/3 de celle de pluviométrie, ce qui posera problème dans certains bassins versants.

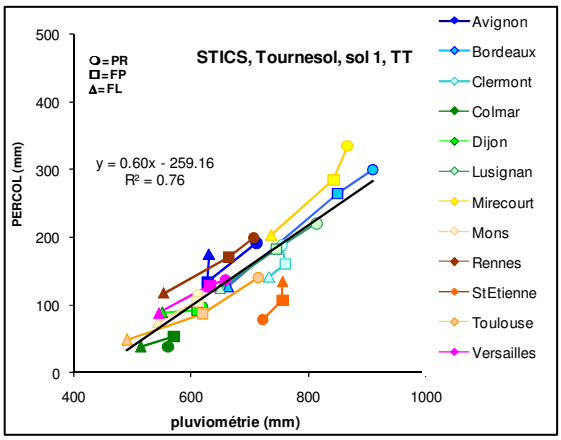



*Figure 4 : Evolution de la recharge des aquifères (Percol) en fonction de la pluie, en différents lieux, pour le tournesol avec Stics (● passé récent, ■ futur proche, ▲ futur lointain)*

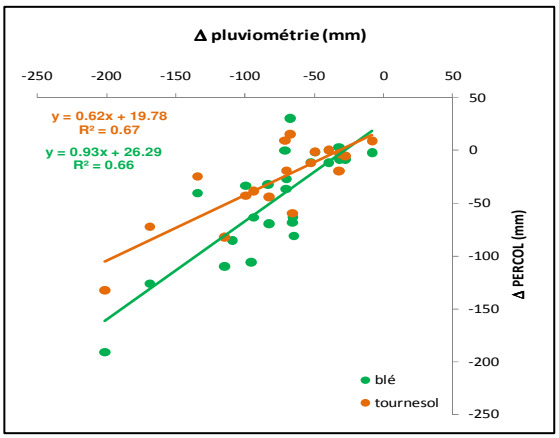



*Figure 5 : Baisse de la recharge des aquifères en fonction de la baisse de pluviométrie pour le tournesol (orange) et le blé (vert).*

Les résultats présentés dépendent peu des méthodes de régionalisation et des modèles de culture utilisés, quel que soit le système de culture. Notons, toutefois, que la variabilité interannuelle qui reste prépondérante peut masquer ces évolutions à long terme. Les simulations permettent de retrouver, demain comme aujourd'hui, l'influence des sols (à sol pauvre, confort hydrique moins satisfaisant et restitution au milieu supérieure), des variétés (à variété précoce meilleur confort hydrique) et des pratiques (à couvert plus dense, confort hydrique moins satisfaisant et restitution au milieu plus faible). L'ensemble permet de nourrir la problématique régionale au travers des dangers et des opportunités (cf. fiches régionales dans Brisson et Levrault, 2010) qui dépendent des facteurs hydriques et thermiques.

## Référence bibliographique

Brisson, N., Levrault, F. (Eds). 2010 Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces: Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 318pp.

# Stockage et déstockage de carbone dans les sols

**J. Sierra**
INRA, UR ASTRO, Petit-Bourg, Guadeloupe, France
sierra@antilles.inra.fr

## Introduction

La matière organique du sol (MO) contient entre 50 et 60% de carbone (C). Parmi ses fonctions, la MO contribue à conserver la structure et la porosité du sol (effet sur l'ancrage des plantes, le stockage et la disponibilité de l'eau, l'aération et le risque d'érosion), à stimuler l'activité biologique et à préserver la biodiversité du sol, à fournir des nutriments à la plante (azote, phosphore, soufre, etc.), et à retenir certains micropolluants (effet sur la qualité de l'eau). Des variations de la teneur en MO, à cause d'un changement d'occupation des terres ou sous l'impact du changement climatique (CC), affectent toutes les fonctions agro-environnementales citées ci-dessus et, par conséquent, la qualité physique, chimique et biologique du sol dans son ensemble.

Actuellement il y a de fortes controverses sur l'impact du CC sur la MO du sol, et cela concerne toutes les échelles spatiales analysées : de la parcelle à l'échelle planétaire. Au-delà de celles liées aux incertitudes sur l'évolution du climat, une partie des controverses sont issues de l'utilisation des modèles qui différent largement sur l'importance relative des mécanismes et des facteurs impliqués dans le cycle du C dans le sol (p.ex. rôle du CC sur la végétation et les entrées de C dans le sol, rôle du CC sur les processus physico-chimiques induisant une protection de la MO). Une autre source de controverses résulte de la méconnaissance de la réponse des microorganismes du sol au CC (p.ex. adaptation thermique et aux périodes de desséchement-réhumectation du sol). Ce type de phénomène pourrait nuancer, ou au contraire exacerber, l'impact du CC.

Dans Climator nous avons analysé l'effet du CC sur la MO en tenant compte des impacts simultanés sur les entrées et les sorties du bilan de carbone. Pour ce faire, nous nous sommes intéressés particulièrement à la variation de restitutions organiques, notamment les résidus de récolte et la litière, et nous avons élaboré et testé une hypothèse sur l'adaptation thermique des microorganismes du sol. Dans ce papier nous présentons une brève synthèse des principaux résultats obtenus, lesquels sont décrits et discutés davantage dans le poster et dans le chapitre correspondant du Livre Vert. Le protocole des simulations est également décrit dans le poster qui accompagne ce papier.

## Déterminants de la variation de la teneur en MO sous l'impact du CC

Nous avons analysé l'effet des quatre facteurs sur la variation de la teneur en MO du sol :
- le système de culture (SdC), représentant l'impact de l'occupation du sol et des itinéraires techniques appliqués,
- le site, composante géographique qui représente l'effet de la combinaison des variables climatiques dans un lieu donné,
- la période, qui tient compte de la variation du CC dans le temps,
- le sol, dans notre cas ce facteur reflète des variations de profondeur et de teneur en MO initiale (voir poster).

L'effet «année» de la Figure 1 correspond à la variation résiduelle non expliquée par les autres facteurs. Les interactions entre facteurs représentent presque 60% de la variabilité totale de la teneur en MO (Figure 1), ce qui est largement supérieur à leur effet sur les variables «plante» (cf. Fiche Rendement) et sur d'autres variables «sol» (cf. Fiche Eau). Ces résultats confirment que l'impact du CC sur la MO est un phénomène complexe qui ne peut être décrit comme une simple addition des effets individuels sur les composantes de l'agro-système. Cela implique aussi que l'effet d'un facteur donné (p.ex. effet «site») ne peut être cerné complètement sans connaître le statut des autres variables (p.ex. effet «site» pour quel SdC ?).

Parmi les facteurs étudiés, le SdC apparait comme celui qui a le plus grand impact sur la MO (Figure 1). La Figure 2 présente quelques exemples des systèmes contrastés choisis pour la lisibilité de leurs effets. Une partie des différences de stockage de C entre les systèmes est expliquée par les variations du niveau des restitutions via les résidus et la litière (p.ex. les restitutions sont supérieures pour la prairie et la rotation BIO par rapport aux monocultures). En revanche, les différences entre les

monocultures sont associées principalement à un taux de minéralisation plus fort, notamment en été, chez le maïs irrigué.

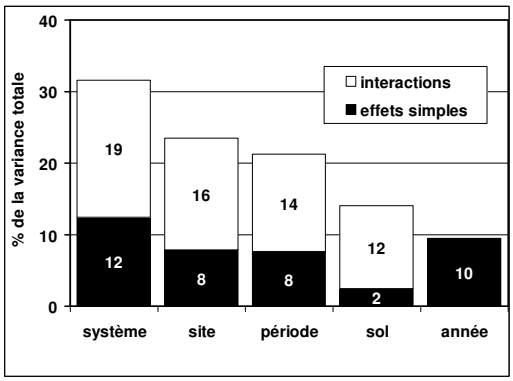



*Figure 1 : Sources de variabilité de la teneur en MO. Les valeurs représentent le pourcentage de la variabilité totale.*

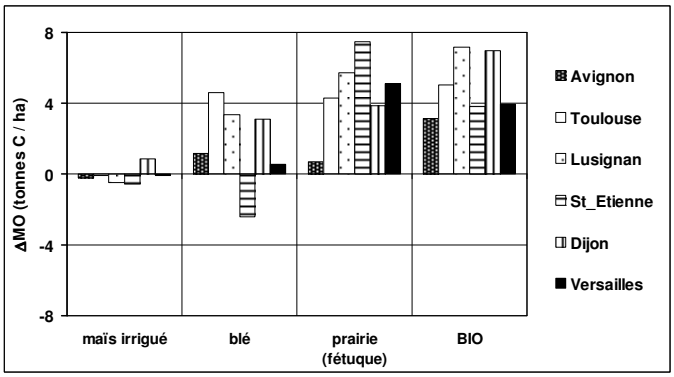



*Figure 2 : Variation de la teneur en MO pour les différents systèmes de culture et sites. BIO = rotation blé tendre/fétuque/fétuque/pois.*

L'effet «site» reflète une certaine stabilité de la réponse moyenne au CC. Par exemple, Dijon est toujours parmi les sites les plus stockants et l'inverse a été observé pour Avignon. D'ailleurs, l'effet «année» est relativement faible ce qui indique que la variation de la teneur en MO est peu sensible aux variations climatiques interannuelles.

La réponse des graminées fourragères au CC mérite une attention particulière compte tenu de son effet, en monoculture et en rotation (Figure 2), sur la capacité stockante du sol. Il est question notamment de l'effet du CC (stress hydrique, $CO_2$) sur la sénescence de la biomasse aérienne.
La réponse des graminées fourragères au CC mérite une attention particulière compte tenu de son effet, en monoculture et en rotation (Figure 2), sur la capacité stockante du sol. Il est question notamment de l'effet du CC (stress hydrique, $CO_2$) sur la sénescence de la biomasse aérienne.

## L'effet de l'adaptation des microorganismes

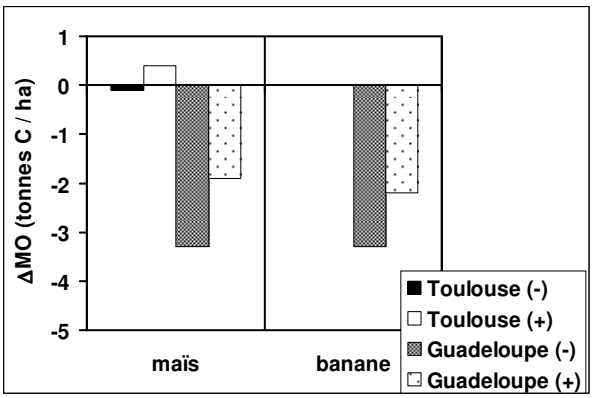



*Figure 3 : Effet de l'adaptation thermique des microorganismes du sol sur la variation de la teneur en MO pour les deux systèmes et les deux sites testés.*
*(-) sans adaptation, (+) avec adaptation*

Le test sur l'adaptation thermique des microorganismes du sol a démontré que ce mécanisme peut jouer un rôle non négligeable en réduisant les pertes de C par minéralisation dans les systèmes déstockants des milieux tropicaux : réduction des pertes de 38% (Figure 3). Par ailleurs, pour le maïs à Toulouse, la prise en compte de l'adaptation a fait varier son comportement, qui est passé d'un léger déstockage à un léger stockage. Il apparaît donc que l'adaptation des microorganismes pourrait fonctionner en atténuant le déstockage et en accentuant le stockage dans les différents SdC.

## Références bibliographiques

Sierra, J., Brisson, N., Ripoche, D., Déqué, M., 2010. Modelling the impact of thermal adaptation of soil microorganisms and crop system on the dynamics of organic matter in a tropical soil under a climate change scenario. Submitted.

# Analyse des effets du changement climatique sur les interactions eau x azote pour un système prairial.

**JL. Durand[1], F Bernard[1], N Brisson[2], D Ripoche[2], M. Déqué [3].**
[1] INRA URP3F BP6 86600 Lusignan, France
[2] INRA, AgroClim, Domaine St Paul, Site AgroParc, 84914 Avignon Cedex, France
3 Météo France CNRM, EAC, 31157 Toulouse
*Auteur correspondant : jean-louis.durand@lusignan.inra.fr

## Introduction

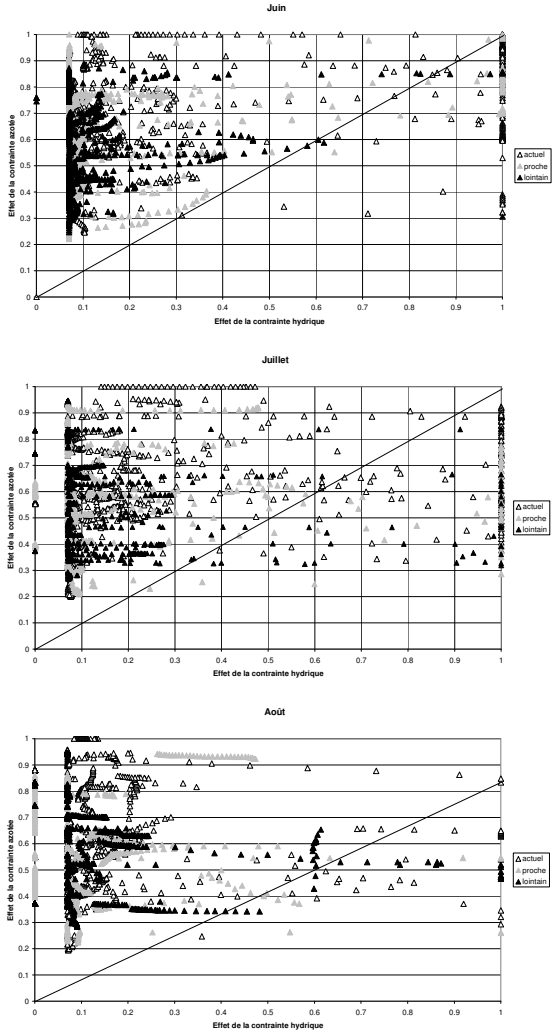



*Figure 1. co-occurrence des effets de la contrainte hydrique et de la contrainte azotée sur la croissance de l'indice foliaire de la fétuque dans les périodes actuelles (1970-2000), proche (2020-2050) et lointaine (2070-2100) pour les mois de juin, juillet, août à Avignon. Chaque point correspond à une journée. En juin, la plupart des journées sont dans fortement ou non limitants. En juillet, davantage de journées se trouve en situation intermédiaire et en août, la plupart des journées présentent des limitations hydriques sévères. Dans tous les cas, le nombre de journées au voisinage de la médiane est faible et donc l'erreur sur les simulations est rare. Si les tendances liées au changement climatiques se marquent par le déplacement des points vers des contraintes hydriques plus fortes, l'erreur reste très donc limitée quelle que soit la période considérée.*

Le changement climatique considéré dans le projet climator est défini comme les projections d'un ensemble de variables de forçages (la teneur en $CO_2$ de l'air, la température, les précipitations et le rayonnement), selon des simulations fournies par les partenaires météorologistes. Toutes ces variables ont des effets directs ou indirects sur les cycles de l'eau et de l'azote (Gonzalez *et al.* 2010). Bien que les deux modèles STICS et PASIM utilisés dans *climator* pour simuler le fonctionnement prairial intègrent des formalismes permettant de calculer les effluents azotés dans les phases liquides et gazeuses, il s'agit ici de se focaliser sur certaines conséquences généralement peu analysées du changement climatique, du fait de la modification de la distribution des prélèvements d'eau et d'azote dans le sol. Les phénomènes en cause étant assez génériques, on s'appuiera uniquement sur les résultats de STICS pour illustrer cet aspect. Brièvement, l'extraction d'eau se fait horizon par horizon et dépend de façon conjointe de la densité racinaire, du profil d'humidité du sol et de la transpiration qui elle-même dépend de la demande climatique et de la teneur en eau relative du sol. Le flux d'azote vers la rhizosphère est décomposé en flux de diffusion et de convection pour chaque horizon considéré. La quantité d'azote absorbée est finalement le minimum entre l'offre et la demande en azote, définie par la teneur en azote critique. Parallèlement, la contrainte hydrique modifie également la croissance. La croissance racinaire est déterminée par les conditions édaphiques (température humidité, anoxie etc…) selon des paramètres de sensibilités spécifiques.

## II. Méthodes et protocole de simulation

De tous les scénarios envisagés par le GIEC, on ne considère ici que le scénario A1B. Les évolutions climatiques qui en résulteraient sont calculées par le modèle ARPEGE. Diverses méthodes de régionalisation (passage du GCM à la série climatique d'une station, utilisable dans STICS) peuvent ensuite être appliquées. Nous n'utiliserons ici que les données produites par l'une d'entre elle (Déqué 2007), qui donne les variables climatiques nécessaires sur la période de 1950 à 2100. La culture que nous considérerons est paramétrée pour deux espèces (fétuque élevée et ray-grass anglais), avec un enracinement potentiellement très profond ou plus superficiel

sensible ou non à l'anoxie et plus ou moins sensible à la sécheresse. Selon l'espèce, la sénescence foliaire est plus ou moins accrue par la sécheresse. La prairie est semée en septembre (à la même date chaque fois) pour 5 ans. Elle est fauchée quatre fois à dates fixes si au moment prévu la biomasse est supérieure à une tonne par hectare et la biomasse laissée sur le terrain est de 1 tonne (pour un indice foliaire de 0.5). La coupe de printemps est suivie d'un apport d'azote de 80 kg d'azote (amonitrate) par hectare et les autres de 40. La dernière année, un semis est pratiqué précédé d'un labour. Afin de lisser les effets liés à l'année d'implantation, 5 cycles décalés d'un an de simulation de cent cinquante années de culture ont été effectués, la première implantation ayant lieu en 1950, 1951, 1952, 1953 ou 1954.

## III. Résultats et discussion

STICS calcule que le déficit hydrique s'intensifiant en tendance, la profondeur d'extraction d'eau moyenne devrait également augmenter puisque celle-ci dépend notamment de l'enracinement, qui en effet pourrait conquérir des horizons relativement plus profonds, mais aussi de l'humidité du sol, tendanciellement plus faible en surface. Pour l'ensemble des sites et des espèces la variabilité inter annuelle est le plus souvent nettement supérieure à la tendance calculée sur 150 ans. Tout cela varie sensiblement selon les stations étudiées. Certains sites présentent une tendance à une réduction de la profondeur d'extraction de l'azote minéral et donc à une « dilution » de la solution au voisinage des racines. Si la croissance aérienne n'est pas directement réduite en proportion, alors on peut voir apparaître un déficit de nutrition azoté croissant. En réalité et assez souvent, la tendance est plutôt à une stabilité de l'INN avec une augmentation légère des rendements et donc une baisse de la teneur en azote du fourrage. Il est notable que les deux espèces étudiées dans *climator* pour leur différence de profondeur d'enracinement notamment marquent différemment cette tendance. Les conséquences de la dégradation des états hydrique et azoté sur la production calculées avec STICS ou PASIM dépendent du facteur le plus limitant. Or dans la réalité, les effets des deux contraintes se multiplient (Onillon *et al* 1995). L'erreur de calcul ici induite est elle un obstacle sérieux et doit elle s'amplifier dans les conditions futures ? On constate au contraire que cette prise en compte erronée de l'interaction eau azote n'a d'effet important sur le résultat final que si les effets des deux contraintes simultanées sont équivalents et proche de 50 % de réduction (Gonzalez, 2010.) Dans l'exemple de la figure 1 (Avignon en sol superficiel) ces situations intermédiaires où l'erreur peut en effet atteindre 25 % du rendement sont assez rares et ne se manifestent un peu plus souvent qu'au mois de juillet.

## Conclusion.

Les modèles de simulation sont particulièrement adaptés à l'étude des changements climatiques et suffisamment robustes du fait de leur relative simplicité, tout en intégrant l'ensemble des phénomènes répondant au climat, pour ce qui concerne les parties aériennes et le bilan hydrique. Mais au–delà des incertitudes de ces conclusions qui tiennent à la grande incertitude sur les variables climatiques d'une part et à la possibilité d'adapter les itinéraires techniques (à commencer par la fertilisation azotée), la grande inconnue de cette approche reste la dynamique d'azote dans le sol. En premier lieu, le flux entrant de matière organique avec le renouvellement des racines (sous le double effet de l'augmentation de la productivité primaire et de la stimulation vraisemblable de l'allocation aux racines) et la dynamique de la minéralisation répondront potentiellement au changement climatique. Les modèles sont actuellement assez grossièrement paramétrés sur ce chapitre. Il serait important de remédier à cela d'autant que si l'enracinement s'approfondit, alors les capacités de stockage de carbone des prairies pourraient évoluer. En second lieu, la minéralisation et la réponse des microorganismes pourraient tempérer ou amplifier les changements induits par l'évolution du climat. Il conviendrait donc en particulier de repenser la compartimentation du sol et les limites de l'activité des microorganismes dans les diverses couches de sol.

### Références.

Déqué, M., 2007: Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change, 57, 16-26.

Gonzalez Dugo V., Durand JL., Gastal F(2010) Water deficits and nitrogen nutrition by crops: a review. Agronomy for Sustainable Developments. DOI: 10.1051/agro/2009059.

Onillon B., Durand J.L., Gastal F., Tournebize R., 1995. Drought effects on growth and partitioning in a tall fescue sward grown at different nitrogen rates. Eur. J. Agron., 4(1), 91-99.

# Analyse des effets du changement climatique au sein des pathosystèmes du blé

**M.O. Bancal[1], D. Gouache[2], R. Roche[1], N. Gagnaire[1]**
[1]UMR AgroParisTech - INRA Environnement et Grandes Cultures, Thiverval-Grignon, France
[2]Arvalis Institut du Végétal, Guyancourt, France

## Introduction

Les variations climatiques interannuelles sont à l'origine de la grande diversité du développement et des impacts de bioaggresseurs sur les principales espèces cultivées ; les évolutions en moyenne et en variabilité du climat sous l'effet du changement climatique pourraient donc très certainement se traduire par une profonde modification de répartition géographique des principaux bioaggresseurs et de leurs impacts.

Chez le blé, principalement deux maladies foliaires du fait de leur fréquence et de leur sévérité peuvent aboutir à des pertes de rendement très importantes, de l'ordre de 40% : la septoriose, provoquée par *Mycosphaerella graminicola*, champignon phytopathogène hémibiotrophe, dispersé principalement par la pluie et favorisé par des températures fraiches (Topt=~15°C) et des conditions d'infection lâches et la rouille brune, provoquée par *Puccinia tritici*, champignon phytopathogène obligatoire biotrophe, dispersé sur de longues distances par le vent et favorisé par des températures chaudes (Topt=~20°C) et des durées d'humectation courtes (~6h). Comme conséquence de ces différences biologiques, leur aire de répartition est complémentaire, à savoir l'Europe du Nord pour la septoriose et l'Europe méditerranéenne pour la rouille brune. Cette dernière est donc particulièrement dommageable sur le blé dur. Le lien étroit entre développement épidémique et climat fait que le cycle de ces champignons est essentiellement décrit par des variables climatiques, tant pour l'infection (fréquence de jours infectieux) que la sévérité (% de surface malade), qui servent à déclencher les traitements.

Pour analyser les effets du changement climatique sur la nuisibilité de la septoriose et la rouille brune du blé d'hiver, deux modèles complémentaires se focalisant sur les phases cruciales du développement épidémique ont été utilisés: le modèle blé – septoriose rend compte de la phase de multiplication hivernale de l'inoculum ainsi que des effets température et de de pluviométrie, couplé avec l'émergence des feuilles pour l'infection et l'apparition des symptômes sur ces dernières ; dans le cas de la rouille brune, l'inoculum primaire est considéré comme non limitant et l'infection – fonction de la température et de la durée d'humectation– et le développement épidémique sur les dernières feuilles est couplé de manière dynamique à un modèle de culture (CERES) qui rend compte des effets du changement climatique sur la mise en place des surfaces foliaires et donc des sites infectieux (Roche et al, 2008). Le modèle blé-septoriose aboutit à des pertes de surface vertes (en %), corrélées à des pertes de rendement alors que le modèle blé-rouille donne directement des pertes absolues de rendement. Les effets du changement climatique sont montrés sur le développement épidémique et la nuisibilité de la septoriose et la rouille, ainsi que sur la température et la durée d'humectation (L'Homme et Jimenez, 1992), principal déterminant de l'infection.

## Méthodes et protocole de simulation

Parmi les scénarios utilisés dans CLIMATOR, le scénario SRES A1B avec la méthode de régionalisation des Types de Temps est utilisé pour simuler l'infection et la sévérité de la septoriose et la rouille ; les différentes méthodes de régionalisation de ce scénario permettent de couvrir l'essentiel de l'incertitude climatique, en particulier la variabilité dans le futur, cruciale pour le développement des champignons. Les simulations sont faites par défaut avec une variété précoce (type Soissons), totalement sensible aux deux maladies, semée le 10 Octobre et menée à pratiques prescrites.

## Résultats

Dans le cas des deux maladies, on constate une diminution de la sévérité de la maladie avec le CC (figure 1b) ; elle est bien reliée dans le cas de la septoriose à une diminution des pluies hivernales et printanières, ce qui bien relié à la diminution moyenne de la durée d'humectation (figure 2) printanière. Manifestement les conditions d'infection sont suffisamment défavorables pour contrer l'augmentation prévue de la pression d'inoculum primaire avec la diminution des gels hivernaux (Figure 1a).

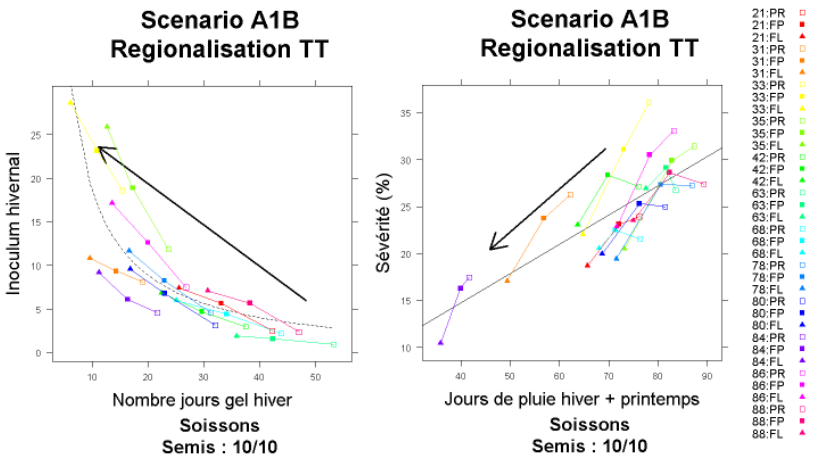



**Figure 1** : *Evolution de l'inoculum pendant l'hiver en fonction du nombre de jours de gel (à gauche) et de la sévérité de la septoriose en fonction du nombre de jours de pluie en hiver et au printemps (à droite). Les flèches indiquent l'évolution tendancielle avec le changement climatique. Méthode de régionalisation : TT*

On constate un retard dans les dates et stades de réalisation de l'infection, ce qui se traduit par une baisse de sévérité dans le FP et le FL. Une stagnation ou une baisse de sévérité est également observée dans le cas de la rouille brune, excepté pour le site de montagne et celui d'Avignon : elle se traduit bien par une stagnation ou baisse de nuisibilité (figure 3) qui est faiblement reliée aux variables climatiques saisonnières (P et T, $r^2<0.2$). Par contre la baisse de nuisibilité de la rouille avec le changement climatique semble bien corrélée à celle du confort hydrique de la plante. Cela souligne l'importance de prendre en compte les interactions dynamiques plante pathogène climat pour rendre compte des évolutions épidémique et de leur nuisibilité à moyen terme. Enfin, ces résultats sont également sensibles à la variabilité générée entre sites par les différents scénarios et méthodes de régionalisation en particulier dans le cas des pluies, composante importante de la durée d'humectation.

Durées d'humectation en h

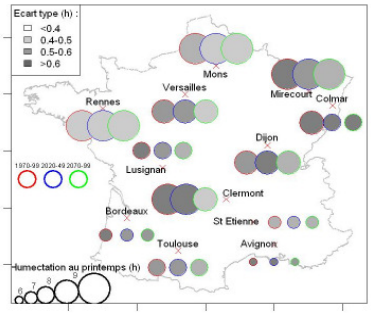



Figure 2 : Evolution de la durée d'humectation printanière en heures

Pertes de rendement (t ha$^{-1}$)

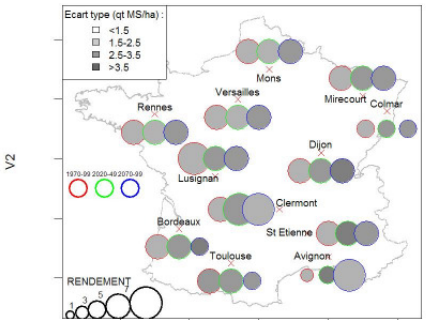



***Figure 3** : Pertes de rendement causées par la rouille brune (t ha $^{-1}$)*

## Limites et perspectives

Si en tendance, on constate une baisse de nuisibilité chez l'ensemble des pathosystèmes étudiés dans Climator, les indicateurs expliquant la réponse au changement climatique dépendent du pathosystème. Les résultats sont très sensibles au site local et au scénario utilisé pour les simulations. Enfin, certains effets directs connus pour être importants dans les processus épidémiques ne sont pas intégrés dans les modèles utilisés : les effets du CO2 par exemple sur le cycle des pathogènes (Garrett et al, 2006), ou encore les vitesses d'adaptation relatives de la plante et des populations de pathogène à de nouvelles conditions climatiques, alors que ces dernières peuvent être rapides. Par contre, cette étude montre qu'il est important de bien prendre en compte les modifications de développement et de croissance de la plante pour appréhender l'évolution de la nuisibilité.

## Bibliographie

Garrett K. A., Dendy S. P., Frank E. E., Rouse M. N. , Travers S. E., 2006. Climate Change Effects on Plant Disease: Genomes to Ecosystems.Annual Review of Phytopathology, 44: 489-509

Gouache D., Couleaud G. 2009. Le positionnement des traitements fongicides : enjeu pour la septoriose et intérêt du modèle "Septolis". AFPP. 9ème CIMA – Tours, France

Lhomme JP, Jimenez F. 1992. Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standard meteorological observations.Agricultural and Forest Meteorology 62, 263-274.

Roche, R, Bancal, MO, Gagnaire, N, Huber, L, 2008. Potential impact of climate change on brown wheat rust : a preliminary study based on biophysical modelling of infection events and plant-pathogen interactions. Aspects of Applied Biology. "Climate Change conference" 12-13 Novembre 2008.

# Grandes tendances de l'évolution du rendement des cultures avec le changement climatique.

**R. Roche**
INRA, EGC, Grignon,France (roche@grignon.inra.fr)

## Introduction

Pour la plupart des cultures, le produit récolté (ou rendement) se forme, après la floraison, pendant la période finale (ou quasi finale) du cycle : cas des cultures où l'organe récolté résulte de phénomènes de reproduction sexuée. Quand l'organe récolté est de nature végétative (prairie, forêt), le produit récolté se forme pendant la totalité du cycle. Mais, même dans le premier cas, le nombre d'organes récoltés dépend du fonctionnement pré-foral de la culture de sorte que le rendement est le résultat de tous les processus qui se sont déroulés tout au long du cycle. A ce titre, sa détermination est particulièrement complexe car soumise à de nombreuses interactions.

## Effets des principaux marqueurs du changement climatique

Dans le cadre du changement climatique, quel que soit le scénario envisagé, il est prévu que les teneurs en $CO_2$ atmosphérique continuent à augmenter (cf Pagé et al., dans ces actes), ce qui devrait favoriser les processus de photosynthèse. Par ailleurs, à demande évaporative de l'atmosphère égale, les besoins en eau des cultures en C3 devraient diminuer car l'augmentation du $CO_2$ provoque, dans leur cas, une diminution de l'ouverture stomatique (effet anti transpirant).
En liaison probablement avec la diminution de la pluviométrie, on note une légère évolution à la hausse (particulièrement nette en été) du rayonnement, autre facteur majeur des processus de photosynthèse. Au niveau de la plante, cette évolution est à raisonner avec les décalages calendaires des cycles sous la dépendance de la température (cf Gate et Brisson dans ces actes).
Actuellement, avec les systèmes de culture à fort niveau d'intrants, majoritairement pratiqués en France, les conditions d'alimentation hydrique sont le premier facteur de variation du rendement, que ce soit d'une région à l'autre (quand la culture est faisable) ou d'une année à l'autre. Or, les projections climatiques annoncent une baisse de la pluviométrie (en particulier en été) qui devrait agir dans le sens d'une intensification des stress hydriques (cf Itier dans ces actes), pouvant entraîner de façon concomitante des stress azotés par blocage de la minéralisation de la matière organique du sol (cf Sierra dans ces actes), mauvaise disponibilité des engrais azotés dans le sol, etc.).

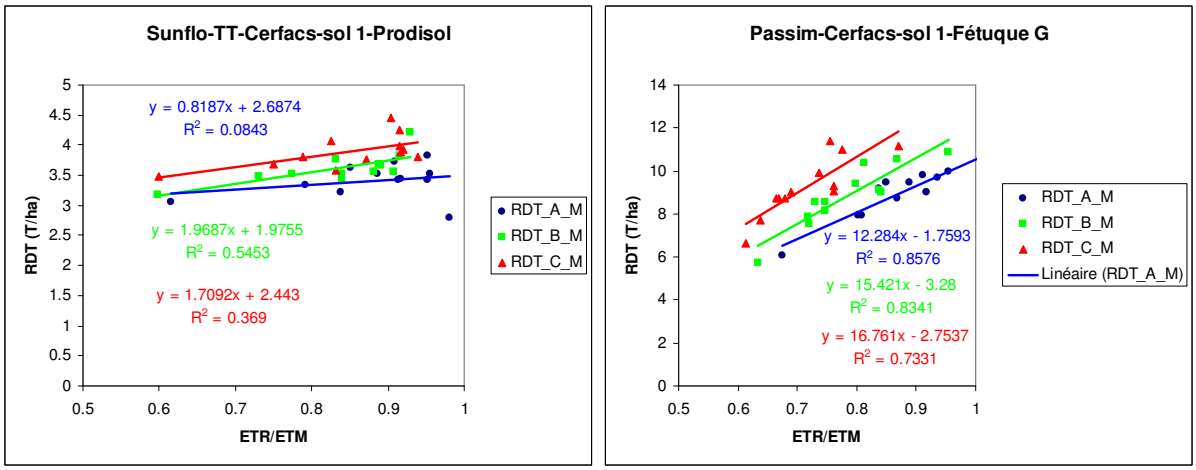



***Figure 1*** *: Rendement en fonction de ETR/ETM pour le tournesol (à gauche) et le fétuque (à droite).*

C'est ce que l'on retrouve dans les 2 graphes ci-dessus (Figure 1), avec un décalage vers la gauche des points en futur lointain : en effet, plus le ratio ETR/ETM est faible, plus le stress est fort.
D'une manière générale, les cultures pérennes, ici représentées par la fétuque, semblent plus réactives au stress hydrique que les annuelles, même quand il s'agit comme ici d'une culture estivale – tournesol - ne pouvant pratiquer l'esquive. Il faut cependant tenir compte des différences de niveaux de rendement : ramenés à une même base 100, les différences de pente s'atténuent en effet beaucoup. Dans tous les cas, on constate qu'à confort hydrique équivalent, les niveaux de rendement sont toujours plus élevés dans le futur que dans le passé proche : c'est l'effet positif du $CO_2$ dont

l'ampleur parvient à contrebalancer complètement l'effet délétère de la dégradation du confort hydrique dans la plupart des cas.
Enfin, on ne peut négliger non plus le rôle de la température qui est le facteur le plus médiatisé du changement climatique. Il y a en effet convergence des avis d'experts et des modèles climatiques pour évoquer un réchauffement. Cela signifie que le cycle des cultures va s'accélérer, ce qui aura des conséquences en termes de précocité des stades et/ou de durée des phases. Cela peut permettre une meilleure adaptation de certaines cultures aux conditions du nord de la France, mais à l'opposé cela peut gêner des cultures sensibles aux fortes températures en fin de cycle. Le raccourcissement des phases du cycle signifie aussi moins de temps pour accumuler le rayonnement et fixer le $CO_2$, et donc moins de croissance.

## Diversité des cultures et variabilité selon les sites

**Futur Lointain: C**

| | Blé | MI | Colza | Tour. | Sorgho | Vigne | Pin | Fet |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Av | ~~0.358~~ | **-1.498** | ~~0.226~~ | ~~0.556~~ | ~~0.197~~ | ~~-0.089~~ | **-0.44** | *0.89* |
| Bo | *0.909* | **-1.540** | ~~-0.369~~ | *0.420* | 0.561 | ~~0.163~~ | **-0.46** | ~~0.36~~ |
| Cl | ~~0.244~~ | **8.228** | **1.727** | **3.895** | **6.291** | **4.104** | **-0.45** | **1.53** |
| Co | *1.698* | **-1.280** | **0.886** | ~~0.050~~ | ~~0.532~~ | **0.842** | **-0.49** | **0.96** |
| Di | *1.496* | **-0.760** | **0.952** | ~~0.148~~ | 0.673 | **0.726** | **-0.60** | **1.27** |
| Lu | ~~0.140~~ | **-1.107** | *0.821* | ~~0.349~~ | ~~0.513~~ | **0.481** | **-0.84** | ~~0.12~~ |
| Mi | 1.303 | **3.449** | **2.519** | **3.177** | **5.715** | **4.220** | **-0.06** | **0.79** |
| Mo | *0.974* | **2.503** | ~~-0.122~~ | **2.204** | **4.671** | **3.187** | **-0.52** | ~~0.23~~ |
| Re | ~~-0.305~~ | ~~-0.224~~ | ~~0.562~~ | **1.576** | **4.001** | **1.880** | **-0.30** | ~~-0.10~~ |
| St | **2.643** | **-1.558** | **1.507** | ~~-0.001~~ | ~~-0.168~~ | 0.270 | **-0.66** | ~~-0.06~~ |
| To | *1.472* | **-1.846** | ~~0.241~~ | ~~-0.284~~ | -1.169 | **-0.448** | **-0.91** | ~~0.17~~ |
| Ve | *0.841* | **0.854** | ~~0.278~~ | **1.583** | **3.802** | **2.276** | **-0.29** | ~~-0.02~~ |
| Tous sites | **0.98** | **0.44** | **2.39** | **1.14** | **2.13** | **1.47** | **-0.50** | **0.51** |

***Figure 2** : Interactions cultures / sites pour la variable rendement en futur lointain. Les degrés de significativité s'échelonnent de NS à 10% (barré) à *** (significatif à 1% en gras).*

Un essai de typologie des cultures fait apparaître un comportement différencié selon leurs principales caractéristiques écophysiologiques. Ainsi, les cultures qui semblent le mieux tirer parti des effets attendus du changement climatique appartiennent plutôt au type C3 avec un cycle hivernal (l'élaboration du rendement au printemps apparaît moins pénalisée qu'en été), ou à l'opposé présentent actuellement des déficits de chaleurs dans beaucoup de régions : c'est le cas de cultures estivales exigentes en température comme le sorgho et la vigne qui voit leur aire de culture possible s'étendre vers les terres du nord de la France aux forts potentiels de rendement, mais aussi de cultures hivernales comme le colza qui bénéficie alors de la moindre occurrence des jours de gel.
Du point de vue des régions, le sud-ouest semble particulièrement touché dans ses principales productions (maïs, pin).

## Limites et perspectives

Les limites de cette étude résident principalement dans l'absence de modulation des pratiques selon les conditions et l'absence de leur adaptation en fonction des évolutions prévisibles. Tenter de raisonner par exemple l'optimisation de la fertilisation azotée dans le cadre du changement climatique pourrait constituer une suite très originale à ces travaux. De même, la prise la prise en compte de phénomènes très ponctuels ou d'accidents extrêmes pendant des phases particulièrement sensibles n'a pas pu être envisagée par manque de références et de recul sur la question, et on pourrait également envisager la prise en compte d'autres éléments atmosphériques influents, comme l'ozone.

## Références bibliographiques


Bonhomme R., Drouet J.L., Améglio T, 1996. Introduction à la modélisation du fonctionnement physiologique d'un couvert. *In : Actes de l'Ecole Chercheurs INRA en Bioclimatologie, Tome I : De la plante au couvert végétal*, Cruizat P., Lagouade J.P. (eds), 647-667.

Brisson N., Delécolle R., 1991. Développement et modèles de simulation de cultures. *Agronomie,* 12 ; 253-263.

# Le climat du XXI° siècle, hypothèse de travail du projet

**C. Pagé[1*], L. Terray[1], M. Déqué[2]**
[1] CERFACS, URA-1875, Toulouse, France
2 Météo-France CNRM-GAME, Toulouse, France
*Auteur correspondant : christian.page@cerfacs.fr

## Introduction

L'objectif du projet CLIMATOR est de modéliser l'impact du changement climatique d'origine anthropique sur les agro-écosystèmes en France métropolitaine et en Guadeloupe.

## Le système climatique global simulé par des modèles physiques

Les résultats présentés dans le dernier rapport du GIEC (2007) suggèrent de fortes évolutions climatiques et un réchauffement important sur l'Europe et sur la région des Caraïbes au cours du 21ème siècle. A titre d'exemple et selon le scénario du GIEC d'émission des gaz à effet de serre A1B, le réchauffement moyen en 2050 sur la France serait de l'ordre de 2 ºC avec une incertitude de ± 0,6 ºC déterminée par les résultats de plusieurs modèles climatiques et avec une plus forte augmentation des températures estivales, en particulier sur le sud de la France (Figure 1).

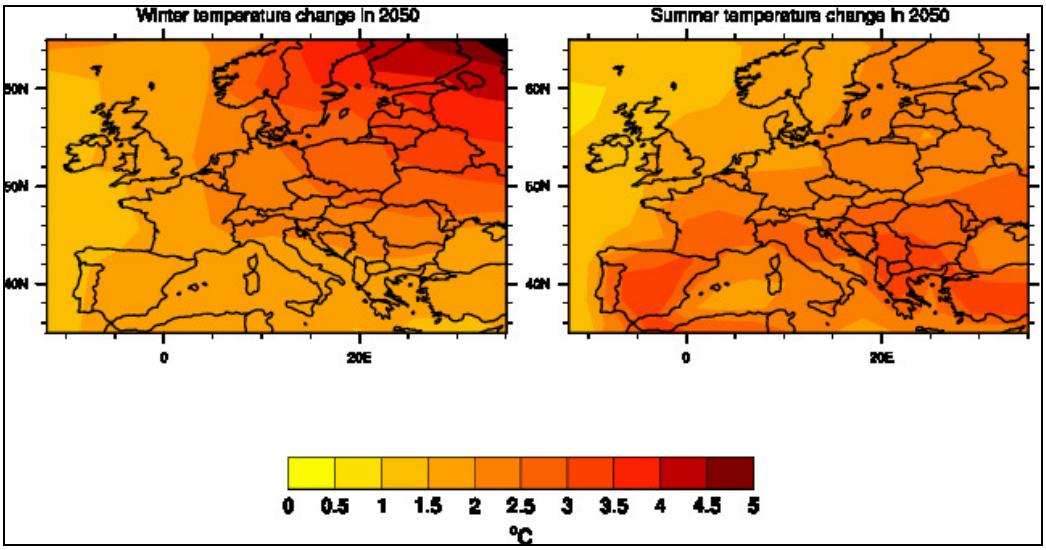



*Figure 1 : Anomalies de température en Europe pour le climat de 2050 telles que simulées par le multi-modèle du GIEC (21 modèles) et suivant le scénario A1B.*

## Les projections climatiques

Les projections climatiques vont être présentées pour quatre indicateurs climatiques et pour nos deux périodes d'intérêt (futur proche (FP) et lointain (FL)), en comparaison avec la période temps présent 1971-2000. Nous ne présentons ici qu'un seul scénario du modèle ARPEGE régionalisé par la méthode de types de temps (TT) en sachant que dans CLIMATOR, plusieurs scénarii ont été traités afin d'évaluer les incertitudes. Les indices présentés ici ne le sont donc qu'à titre indicatif.

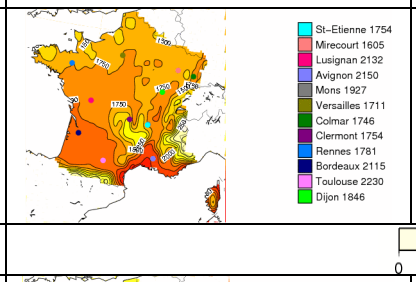
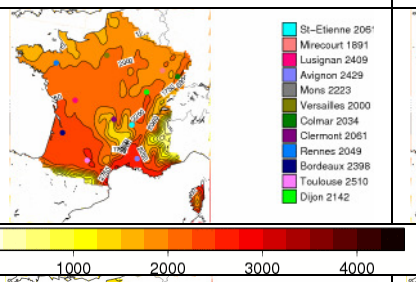
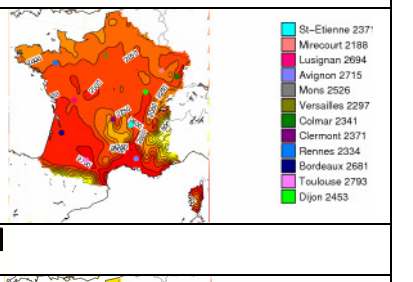
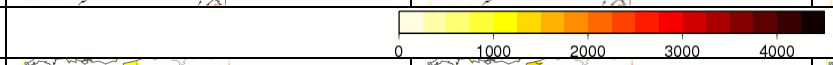
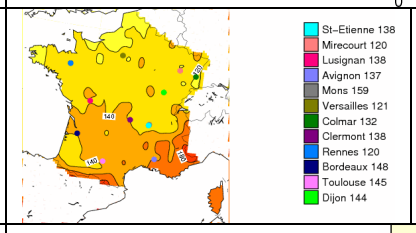
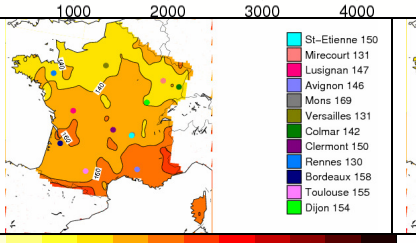
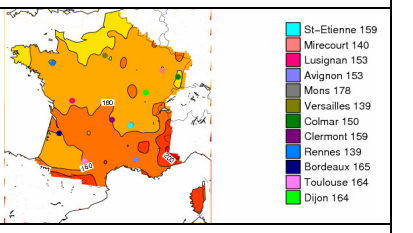
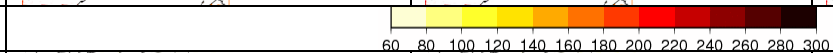
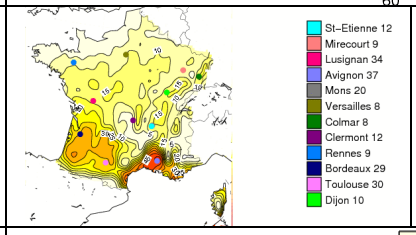
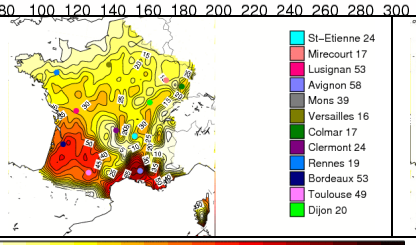
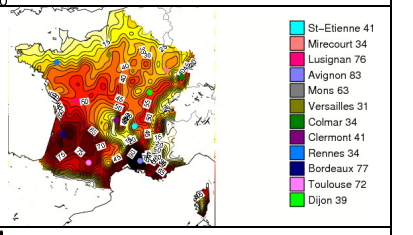
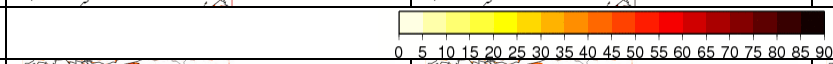
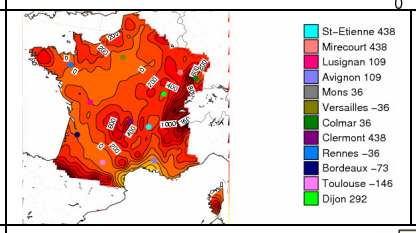
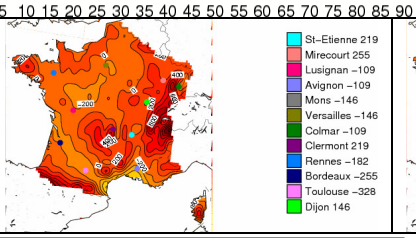
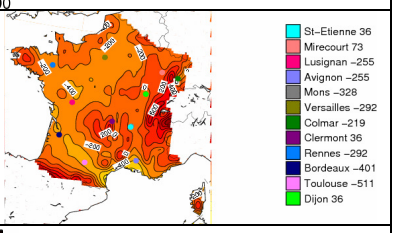
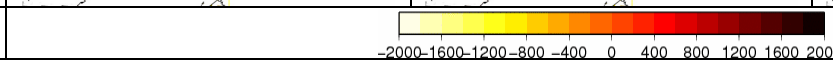
| Scénario ARPEGE régionalisé par la méthode TT | 1971-2000 | 2021-2050 | 2071-2100 |
|---|---|---|---|
| Cumul des températures en base 6 de mai à septembre en degrés Celsius |  |  |  |
| |  | | |
| Rayonnement Global ($W/m^2$) |  |  |  |
| |  | | |
| Nombre de jours échaudant (>25C) au printemps (avril-mai-juin) |  |  |  |
| |  | | |
| Précipitations moins l'ET0 en moyenne annuelle (mm/an) |  |  |  |
| |  | | |

*Figure 2 : Indicateurs climatiques CLIMATOR. Les figures ont été lissées spatialement pour permettre une meilleure visibilité.*

La figure 2 montre un accroissement important du nombre de jours échaudants au printemps dans le futur, avec plusieurs régions au sud-ouest et au sud-est présentant des jours échaudants en continu sur toute la période printanière. Le déficit P-ET0 est fortement accentué, avec presque toutes les stations présentant un déficit annuel. Au niveau du rayonnement global, il est fortement augmenté en rapport avec la diminution des précipitations et de la couverture nuageuse. Enfin, le cumul des températures montrent un accroissement significatif dès le futur proche.

# Changement climatique et cultures de blé et de colza : l'essentiel des impacts

**M.O.Bancal[1], N. Brisson[2], P. Gate[3]**
[1]UMR AgroParisTech - INRA Environnement et Grandes Cultures, Thiverval-Grignon, France
[2]INRA Agroclim, Avignon, France
[3]Arvalis Institut du Végétal, Guyancourt, France

## Introduction

En France, le blé est la première production végétale (plus de 17% de la SAU) avec des rendements moyens de 7 $tha^{-1}$ et la moitié de ses surfaces se situent dans le Centre Nord. La culture du colza arrive au 4$^{ème}$ rang après le blé, pour une même aire de culture, et a des rendements moyens de 3 $tha^{-1}$.
Dans leur contexte de production actuelle, ce sont deux cultures majeures dans les rotations de grandes cultures. Toutes deux de cycle long et libérant le sol tôt dans l'été, elles ont en commun des débouchés se partageant entre alimentation humaine, alimentation animale et débouchés industriels (biocarburants) ; dans le cas du colza, le débouché biocarburants utilise environ 60% des surfaces en 2008 et tend à concurrencer la part alimentaire. Enfin, leur cycle long permet une forte croissance et les rend exigeantes en intrants, mais aussi vulnérables à de nombreuses contraintes biotiques. En contrepartie, le positionnement calendaire de leur cycle (hiver-printemps) leur permet d'éviter les stress hydriques estivaux.

## Méthodes et protocole de simulation

La culture de blé tendre a été étudiée dans le cadre d'une monoculture avec les 3 modèles de culture CERES, STICS et PANORAMIX et de plusieurs systèmes de cultures avec le modèle STICS dont un système à base de céréales irriguées (MBCB) et deux systèmes à bas intrants (TBSB et BIO). Le colza est simulé par STICS dans le cadre de la rotation MBCB. Des variétés à cycle court (Colza=Olphi et Blé=Soissons) et cycle long (Colza=Pollen et Blé=Arminda) ont été semées le 28/08 et 10/09 pour le colza et le blé respectivement sur l'ensemble des 12 sites avec plusieurs sol (RU= 104, 193 et 218 mm, ce dernier étant hydromorphe) Les résultats présentés dans ce papier sont issus du modèle ARPEGE (scénario SRES A1B) régionalisé par plusieurs méthodes qui génère l'essentiel de l'incertitude climatique.

## Impacts sur la productivité

En moyenne, la production de blé d'hiver est appelée à augmenter légèrement. Cette augmentation est de l'ordre de 0.7 et 1.2 $tha^{-1}$ dans le futur proche (FP) et le futur lointain (FL) en moyenne pour la variété précoce. Elle concerne essentiellement la partie Est du pays et ne touche pas le site du Sud Est (Avignon) et peu ceux de la façade atlantique (Rennes, Lusignan, Bordeaux). On retrouve la même tendance mais atténuée dans la cas de la variété tardive. Cette amélioration des rendements est liée, généralement, à une augmentation du nombre de grains par m² qui compense la dégradation des conditions de remplissage du grain. Pour le colza, on retrouve cette même tendance à l'augmentation des rendements, de 0.5 et 0.8 $tha^{-1}$ pour le FP et FL respectivement, principalement observée sur la façade Est comme dans le cas du Blé. Pour ces deux cultures, la diminution des gels hivernaux dans les aires de culture à hivers froids est la principale cause de l'augmentation observée des rendements ; à l'inverse, les zones traditionnelles de ces cultures voient leurs rendements en blé et colza stagner.

## Impacts sur la phénologie

L'augmentation des températures provoque une anticipation importante de la floraison, comparable pour les deux cultures de l'ordre de 6 à 10 jours dans le FP et de 12 à 20 jours dans le FL selon les sites et les méthodes de régionalisation climatique. Si ces tendances sont les mêmes pour tous les sites, les décalages sont généralement plus importants pour les sites nord que pour les sites sud. Notons que pour les cultures d'hiver, comme le blé et le colza, l'effet « anticipation » est plus important que l'effet « raccourcissement du remplissage», ce qui modère la pénalisation du rendement. Dans le cas du blé, la diminution de la phase de montaison s'accompagne d'une amélioration des conditions de croissance : plus de rayonnement est intercepté et conduit à l'amélioration du NG $m^{-2}$ ; par contre, malgré l'anticipation des stades, la période de remplissage des grains se déroule dans des conditions d'augmentation de stress thermique (augmentation de l'échaudage physiologique des grains) et hydrique.

Dans le cas du colza, des retards importants de levées sont prévues dans le FP et le FL, en raison de l'assèchement anticipé du lit de semence avec le changement climatique. Ces mauvaises conditions d'implantation et de croissance végétative, qui se trouve raccourcie,pourraient conduire à des baisses importantes d'absorption d'azote jouant sur la qualité des récoltes.

## Impacts sur le confort hydrique du blé et du colza

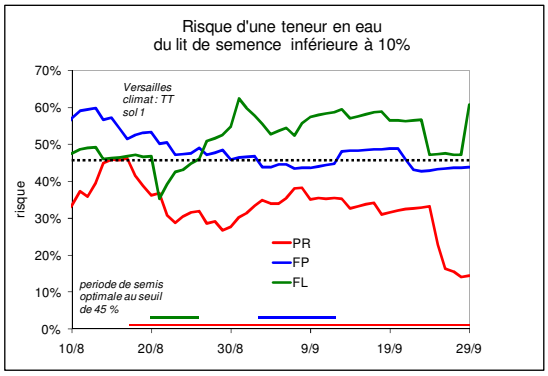



***Figure 1:*** *Risque de sécheresse du lit de semence (10 premiers cm) par période sur la base d'un seuil de 10% de teneur en eau pondérale.*

Chez le colza, c'est l'humidité du lit de semence qui devient le facteur limitant dès le FP et de manière cruciale dans le FL. Les risques de mauvaises implantations ayant pour conséquence une montaison tronquée se traduisant par des baisses de nombre de grains peuvent résulter des cinétiques d'humidité du lit de semence (Fig. 1). Les ré humectations du lit de semence à l'automne devenant de plus en plus tardives, les semis seront retardés, aboutissant probablement à une augmentation de risque de gels. Par contre, l'anticipation de la floraison associée à la faible durée du remplissage des graines a pour conséquence le maintien du confort hydrique du colza pendant ce remplissage.

Au contraire du colza, le blé, un peu plus tardif, est appelé à souffrir d'avantage du stress hydrique pendant le remplissage des grains mais aussi la montaison. Cependant, la dégradation du confort hydrique et thermique du blé dans le FP et FL est largement compensée par l'augmentation des teneurs en $CO_2$ de l'air, évitant la diminution des rendements..

## Adaptations envisageables

Dans le cas du blé comme dans celui du colza, les variétés précoces ou à cycle sont mieux adaptées au changement climatique. L'anticipation de leur cycle leur permet de limiter les riques de stress tardifs (échaudage en particulier) apparaissant en cours de remplissage pour les variétés à cycle long ou tardives. Pour le blé, ces différences restent néanmoins faibles, de 5 à 10% pour l'ensemble des sites. Dans les deux cas, les semis précoces permettent d'esquiver les conditions défavorables de la montaison ou de la fin du cycle. Chez le blé, les semis précoces (20 Septembre) permettent un gain de rendement de 5 à 25% selon les sites par rapport aux semis les plus tardifs (1$^{er}$ décembre) : on constate en particulier un risque croissant de déficit hydrique pendant la montaison avec les semis plus tardifs, jouant sur le nombre de grains. Pour le colza, les semis précoces s'accompagnent d'un risque croissant de mauvaise implantation et pourra nécessiter dans le FL des irrigations au semis.

Dans le cas du blé, le poids de ces adaptations possibles a été confronté aux effets du changemnt climatique sur le rendement (Fig. 2) en utilisant deux modèles. D'une part on constate que l'incertitude liée au modèle choisi reste importante : cela souligne la nécessité d'approfondir les déterminants écophysiologiques de la réponse du blé aux stress pour mieux en rendre compte dans les modèles. D'autre part, les effets des pratiques (variété, date de semis, sol et site) sont du même ordre de grandeur que celui du changement climatique, ce qui suggère que seule une combinaison de ces pratiques pourra limiter les risques induits par le changement climatique.

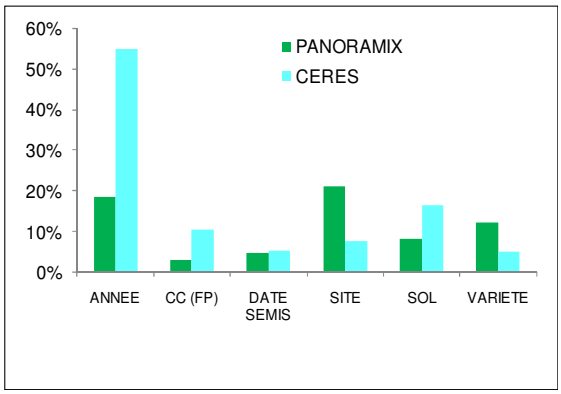



***Figure 2*** *: Proportion de la variance du rendement du blé attribuée à diverses sources de variabilité selon le modèle*

# Changement climatique et cultures de maïs et sorgho grains : l'essentiel des impacts

**N. Brisson**
INRA, Agroclim, Avignon,France (brisson@avignon.inra.fr)

## Introduction

En France le maïs est la seconde production végétale (plus de 10% de la SAU) après le blé tendre et 50% de la sole irriguée lui est consacrée. La culture du sorgho ne concerne que 0.2% de la SAU situés dans le Sud-Ouest et le Centre-Est mais possède potentiellement des atouts comparables à ceux du maïs en termes de débouchés.

Dans leur contexte de production actuelle, que reproduisons par une monoculture de maïs irriguée et une culture pluviale de sorgho en rotation, les niveaux de rendement des deux cultures sont difficilement comparables. Cependant, compte-tenu des utilisations potentielles du sorgho, un regard parallèle sur le comportement des deux cultures face au changement climatique nous a semblé intéressant pour envisager toutes les composantes de l'adaptation.

## Protocole de simulation

Dans CLIMATOR, les deux cultures sont simulées avec le modèle STICS. Le maïs est simulé dans le cadre de deux systèmes à forts intrants, une monoculture et une rotation quadriennale, toujours en irriguée à 80% de ses besoins en eau alors que le sorgho est simulé dans le cadre d'une rotation pluviale (un test d'irrigation est réalisé pour les aspects adaptatifs). Semées le 10/04 sur l'ensemble des 12 sites, plusieurs variantes ont été analysées en matière de sol (RU= 104, 193 et 218 mm, ce dernier étant hydromorphe) et de variété (Meribel et Friggo à cycle court et DKC5783 et Fulgus à cycle long). Les résultats présentés dans ce papier sont issus du modèle ARPEGE (scénario SRES A1B) régionalisé par plusieurs méthodes qui génère l'essentiel de l'incertitude climatique (Allard et Brisson, 2010).

## Impacts sur la productivité

Sans changement de variété, la production de maïs grain, dans les grandes zones actuelles de production (Sud Ouest, Poitou-Charentes, Limagne, Alsace), est appelée à diminuer malgré l'irrigation. Cette diminution de l'ordre de 0.5 à1 $tha^{-1}$ dans le futur proche (FP) pourra dépasser les 1.5 $tha^{-1}$ dans le futur lointain (FL). En revanche la marge nord de cette zone (Versailles, Rennes) n'est pas touchée par cette diminution avec même des augmentations à Versailles qui préfigurent de nouvelles zones de cultures potentielles pour le maïs grain dans des zones plus fraiches (Mirecourt, Mons, Clermont-Theix). Pour le sorgho, l'évolution à la baisse est moins marquée. Si elle reste très préjudiciable dans le sud ouest dans le FP, le FL offre des perspectives d'augmentation partout sauf à Toulouse. Comme pour le maïs, les marges actuellement trop fraiches apparaissent comme de futures zones d'accueil de la culture du sorgho. Malgré ce meilleur comportement du sorgho, le maïs irrigué garde évidemment l'avantage en termes de rendement, en particulier pour les sites à faible pluviométrie estivale comme Toulouse. Cependant nos résultats montrent que la différence entre les deux cultures diminue, ce qui rend pertinent une amélioration des conditions de culture du sorgho.

## Impacts sur la phénologie

L'augmentation des températures provoque une anticipation importante de la floraison, similaire pour les deux cultures de l'ordre de 7 à 10 jours dans le FP et de 15 à 20 jours dans le FL selon les sites et les méthodes de régionalisation climatique. Cette anticipation de la floraison induit un glissement de la phase de remplissage pendant les mois les plus chauds de l'année. Par conséquent la durée de remplissage des grains sera raccourcie provoquant la baisse de rendement du maïs irrigué.

En conséquence, le maïs en rotation avec des cultures d'hiver devient possible (sans avoir recours au séchage coûteux en énergie) dans les grandes zones de production comme en Alsace grâce à l'augmentation des températures qui permet la récolte du maïs avant le semis du blé et dans le sud-ouest aquitain grâce à la diminution des risques d'excès d'eau pour les céréales d'hiver.

## Les besoins en irrigation du maïs et le stress hydrique du sorgho

L'évolution des besoins en irrigation du maïs résultera de deux effets contradictoires. En effet, à cause de l'évolution déficitaire des bilans hydriques climatiques annuels (P-ET0) futurs, les besoins en eau additionnels seront augmentés ayant tendance à augmenter les besoins en eau d'irrigation. Cependant si les variétés restent inchangées, la période d'irrigation se trouvera considérablement raccourcie en raison du raccourcissement du cycle; ce qui aura tendance à freiner cette augmentation de l'irrigation. Ce frein ne jouera que modérément dans le FP et il faut s'attendre à une augmentation de l'irrigation de l'ordre de + 40 mm en moyenne par cycle cultural. Parallèlement, pour le sorgho, le confort hydrique de la culture va se détériorer dans le FP mais, pour les mêmes raisons que précédemment, on peut espérer, dans le FL, une amélioration sur certains sites par effet d'esquive. Nos résultats démontrent une incertitude importante sur l'ampleur de ces effets d'esquive dans le FL en fonction des méthodes de régionalisation climatique.

## Quelques pistes d'adaptation envisageables

L'avancée des semis, déjà perceptible depuis 15 ans pourra continuer, à un rythme de l'ordre de 1 jour tous les 4 ans pour le maïs, et ce quelle que soit la méthode de régionalisation choisie. Pour le sorgho, qui ne bénéficie pas d'une éventuelle irrigation starter comme le maïs, la précocité des semis dans le FL sera freinée par la sécheresse du lit de semence. Cependant, sans changer de variété, les résultats obtenus montrent que cette avancée n'aura d'influence ni sur les rendements ni sur les quantités d'eau apportées pour l'irrigation (maïs) ou sur le stress hydrique subi par la culture (sorgho). En d'autres termes les effets d'esquive attendus de l'avancée des semis ne sont pas au rendez-vous !

L'augmentation de la disponibilité thermique permet d'envisager les cultures de maïs grain et de sorgho là où elles n'étaient pas réalisables (cas de Mons, Mirecourt et même Clermont-Theix dans le FL) mais elle donne aussi la possibilité d'utiliser des variétés à cycle de plus en plus long. Cependant, dans les zones à fort déficit hydrique climatique, cet allongement de cycle provoquera une augmentation de l'irrigation et pourra remette en question ce possible allongement du cycle cultural.

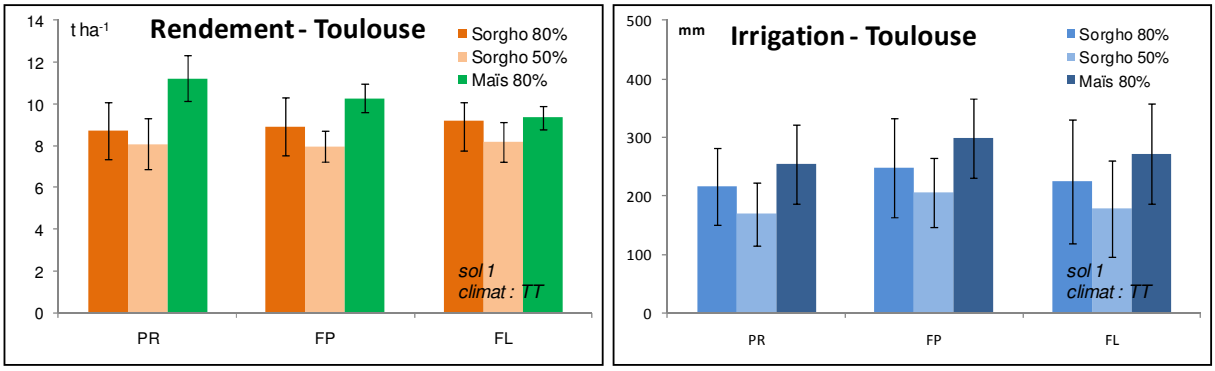



*Figure 1 : Comparaison d'une monoculture de sorgho irriguée (à 80 et 50% de ses besoins en eau) avec la monoculture de maïs en productivité et en besoin en eau. ( régionalisation TT et sol 1)*

Pour exploiter les bonnes propriétés de résistance à la sécheresse du sorgho et le rendre compétitif par rapport au maïs, on peut envisager son irrigation. Il apparaît (fig. 1) que la productivité du sorgho irrigué à 80% se rapproche progressivement de celle du maïs alors qu'il y avait de l'ordre de 2 t $ha^{-1}$ d'écart dans le PR. De plus, le sorgho, plus économe en eau utilise de l'ordre de 50 mm de moins que le maïs mais il est un peu moins régulier que le maïs. Par ailleurs, le sorgho supporte très bien le rationnement puisqu'à 50 % de ses besoins en eau la diminution de rendement est inférieure à 1 $tha^{-1}$.

Plus que pour d'autres cultures il semble important d'envisager des modifications de système de culture avec en particulier le recours systématique à des rotations, la relocalisation géographique (exploitation de l'augmentation des disponibilités thermique dans les zones Nord et Est) et édaphique (privilégier les sols à forte RU) des cultures de maïs et de sorgho.

## Références bibliographiques

Allard, D. ; Brisson, N. 2010. Analyse des sources d'incertitude et de variabilités. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 47-58.

# Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts

**J.L. Durand[1], F. Bernard[1], R. Lardy[2] et A.I. Graux[2]**
[1] INRA, URP3F, Lusignan, France
[2]INRA, UR874, Clermont-Ferrand, France
*Auteur correspondant : jean-louis.durand@lusignan.inra.fr

## Introduction

En France, les prairies constituent une formation végétale majeure avec près de 11 millions d'hectares. Outre ses fonctions de production, la prairie assure de nombreux autres services auprès de l'environnement. Le projet CLIMATOR a en particulier abordé le cas des prairies semées qui servira ici d'exemple pour évaluer les évolutions possibles sous l'impact du changement climatique. En 2007, ces prairies temporaires occupaient 2,8 millions d'hectares soit environ 10% de la SAU française.

## Méthode et Protocole de simulation

Deux modèles de simulation ont été utilisés pour calculer les variables d'intérêt : PASIM (Vuichard et al. 2007) et STICS (Brisson *et al.*, 2009), les deux permettant de modéliser de véritables séries de culture sur 150 ans, ce qui permet l'actualisation des conditions du sol et une prise en compte de l'évolution éventuelle de la biomasse d'une année à l'autre. Les détails des simulations figurent dans le tableau 1.

| | |
|---|---|
| **12 Sites** | 12 sites métropolitains représentatifs de la variabilité climatique dont un site d'altitude (Theix, 63) |
| **1 système** | 1 système : semis de la prairie le 9 septembre et exploitation par quatre fauches par an durant 5 ans (semis inclus) |
| **1 conduite** | Pas d'irrigation, 200 kg N $ha^{-1}an^{-1}$, exportation de la biomasse fauchée, hormis une biomasse résiduelle d'une tonne par ha, retournement de la prairie |
| **3 sols** | Sol 1 : 226 mm de RU, 140 cm de profondeur, texture L en surface<br>Sol 2 : 103 mm de RU, 65 cm de profondeur, texture ALS en surface<br>Sol 3 : 218 mm de RU, 215 cm de profondeur, texture LS en surface |
| **2 espèces** | Ray-Grass anglais<br>Fétuque élevée |
| **2 modèles** | STICS, PASIM |
| **1 climat** | SRES : A1B, ARPEGE, régionalisation : Types de Temps (TT) & Quantile-Quantile (QQ) |

***Tableau 1**. Définition des systèmes simulés.*

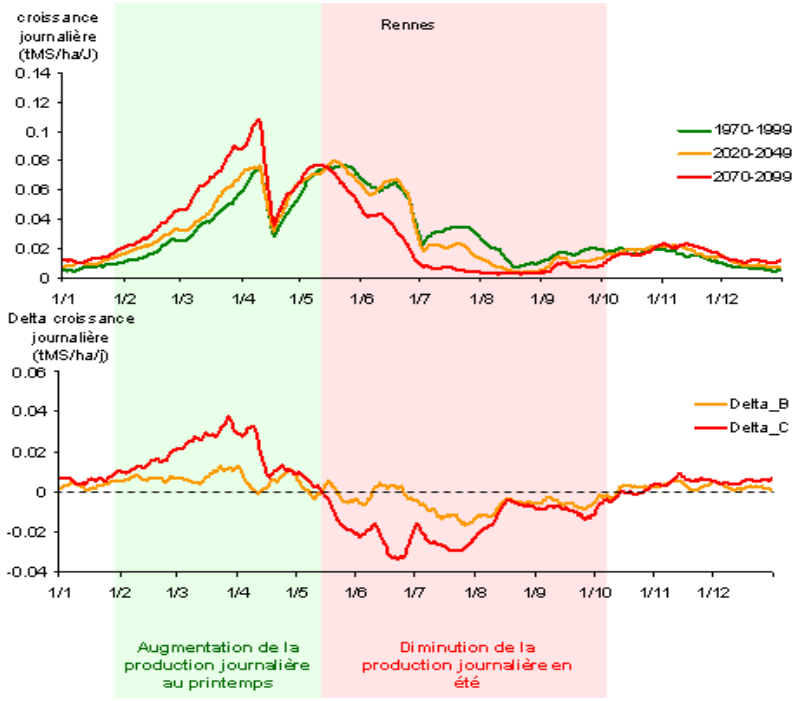
Les deux espèces abordées, fétuque élevée et ray-grass anglais, ont été choisies pour leurs propriétés différentes vis à vis de la sécheresse et des excès d'eau. En particulier, l'enracinement de la fétuque est plus profond, sa sensibilité à l'excès d'eau est bien plus faible, et sa sénescence foliaire quasiment insensible au déficit hydrique contrairement au ray-grass anglais.

Dans le cas de PASIM, la matière organique du sol a été initialisée à l'équilibre avec le climat des années 1950 et la gestion appliquée.

## Résultats

L'un des résultats majeurs de cette étude est la modification nette de la répartition de la production au cours de l'année (Figure 1). Sur l'exemple de Rennes et du scénario A1B, le changement climatique pourrait se traduire par une stimulation de la production hivernale et printanière, du fait du réchauffement et de l'augmentation de l'efficience de conversion du rayonnement solaire due à l'augmentation de la concentration de la concentration en $CO_2$. En été, la diminution du rendement journalier résulterait de l'accentuation des épisodes de sécheresse avec des effets prolongés sur l'automne. Ainsi, le changement climatique devrait accentuer le problème de surproduction d'herbe au printemps et de manque de fourrages en été En général, ces tendances aboutiraient en moyenne sur le territoire national à des accroissements, parfois assez faibles, ce qui serait conforme aux données expérimentales partielles obtenues sur RGA (Casella *et al.* 1996). Pour la fétuque, STICS calcule des rendements annuels plus élevés que PASIM et en hausse pour le futur lointain, tandis que les augmentations obtenues pour le RGA sont plus modestes et sont semblables entre les deux modèles.

***Figure 1*** *Répartition annuelle de la moyenne sur trente ans de la productivité journalière de la fétuque à Rennes sur sol superficiel, calculée avec STICS selon les données des simulations Arpège, scénario A1B, méthode Quantile-Quantile. En bas, écarts actuel-futur proche (B), ou lointain (C).*




Il résulterait également de ces hausses de production d'une part et des contraintes estivales d'autre part, une tendance à l'augmentation du déficit de nutrition azotée (Gonzalez *et al.* 2010) et un accroissement du flux de masse entre les plantes et le sol. Il est assez difficile de conclure sur une tendance précise concernant le stock de carbone dans le sol. Toutefois PASIM tend à montrer, toujours dans le cas du scénario A1B, une tendance à l'augmentation de la matière organique des sols, plus prononcée dans le cas de la méthode de régionalisation quantile-quantile que celle des types de temps. Cette évolution dépend également du type de sol considéré, les plus superficiels subissant plus durement les sécheresses estivales.

Dans ce cadre général, les diverses stations étudiées sur la France ne répondraient pas de la même façon. Dans la station d'altitude de Theix, l'accroissement de la production serait particulièrement marqué, ainsi que dans les stations du sud de la France (Toulouse et Avignon) où les déficits hydriques actuels rendent déjà la production fourragère estivale anecdotique. Dans les stations de l'ouest (Rennes, Lusignan), les effets hivernaux et estivaux tendraient à s'équilibrer. Les divergences entre les modèles sont plus élevées dans l'Est, en interaction avec l'espèce et le sol.

Les méthodes de régionalisation utilisées pour produire les séries climatiques locales induisent aussi des écarts non négligeables. Alors que les simulations à partir de la série climatique QQ prévoient dans le futur lointain une augmentation moyenne du rendement de 22% (PASIM 12%) pour la fétuque par rapport à la période actuelle, et de 19% (PASIM 10 %) pour le RGA, celles effectuées à partir de la série TT, prévoient, parallèlement à des précipitations plus faibles, une augmentation plus faible du rendement avec seulement 8% (PASIM 13%) pour la fétuque et 6% (PASIM 11%) pour le RGA.

Il reste que ces tendances ne prennent pas en compte des réponses physiologiques encore mal connues à des conditions extrêmes qui pourraient survenir au cours des décennies à venir. En particulier, les processus déterminant la mortalité des plantes à reproduction clonale sont mal représentés dans les simulations actuelles.

**Références bibliographiques**


Brisson N, Launay M, Mary B, Beaudouin N, 2009. Conceptual Basis, Formalisations and Parameterization of the Stics Crop Model. Quae ed. 304 p.

Casella, E., Soussana, J.F. and Loiseau, P. 1996. Long-term effects of $CO_2$ enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. I. Productivity and water use. *Plant and* Soil, 182, 83-99.

Gonzalez Dugo V., Durand JL., Gastal F, 2010. Water deficits and nitrogen nutrition by crops: a review. Agronomy for Sustainable Developments. DOI: 10.1051/agro/2009059.

Vuichard, N., Soussana, J.F., Viovy, N., Calanca, P., Clifton-Brown, J., Ciais, P. 2007. Simulating the greenhouse gas budget of European grasslands within a process driven approach: Model evaluation against in-situ measurements. Global Biogeochem. Cycles 21, GB1004, DOI:10.1029/2005GB002611.

# Changement climatique et vigne : l'essentiel des impacts

**P. Pieri[1*], E. Lebon[2]**

[1] INRA, UMR EGFV, ISVV, Bordeaux, France
[2] INRA, LEPSE, Montpellier, France

*Auteur correspondant : pieri@bordeaux.inra.fr

## Introduction

Le poids de la vigne dans l'économie agricole française est très important en termes de produit brut, valeur ajoutée et contribution aux exportations. Pour cette culture, la valorisation économique de la qualité est primordiale et les résultats économiques sont donc largement découplés du rendement. Or, la qualité est sensible au climat (effet millésime) et favorisée par un stress hydrique modéré. Une grande sensibilité au changement climatique (CC) est donc attendue et le passé récent le confirme : avancée de la phénologie, augmentation des concentrations en sucres, plus grande fréquence de bons ou très bons millésimes, problèmes de maturité phénolique… Par ailleurs, la production repose sur des variétés (cépages) diversifiées, adaptées au climat de la région et au type de production.

La culture de la vigne dispose de nombreux atouts ou marges de manœuvre pour réagir au changement climatique ou même pour en tirer profit. La surface foliaire généralement faible et la structure en rangs du couvert végétal contribuent à limiter la transpiration tandis que le système racinaire profond permet la valorisation de terrains « pauvres ». La vigne est donc une culture d'été mais économe en eau. En tant que plante en C3, elle est aussi réactive à l'augmentation de la concentration en $CO_2$, ce qui devrait améliorer l'efficience d'utilisation de l'eau. Le changement climatique pourrait aussi conduire à une résolution automatique des problèmes actuels de limitation de la vigueur végétative et des rendements. De même, il pourrait diminuer les risques de gel de printemps et réduire les difficultés actuelles de contrôle des maladies, et donc faciliter une réduction des intrants. Les pratiques culturales actuelles visent plutôt à élever les températures subies par les plantes : culture sur coteaux exposés, effeuillage, échauffement de la surface du sol …, elles pourraient donc être inversées. D'un point de vue global, la vigne offre une très grande capacité d'adaptation : cépage, porte-greffe, densité, enherbement, irrigation, fertilisation et autres opérations culturales sont tous des facteurs susceptibles d'adaptation et optimisation.

Les faiblesses de la culture de la vigne face au changement climatique sont liées à son cycle estival et à la sensibilité de sa phénologie aux températures, ce qui devrait induire une avancée de tous les stades phénologiques et donc une maturation dans des conditions beaucoup plus chaudes et sèches. Comme les hautes températures ont des effets négatifs connus sur la photosynthèse et sur la maturation, en particulier sur le métabolisme secondaire des polyphénols et des précurseurs d'arômes, les risques de dégradation de la qualité sont élevés.

## Protocole de simulation

Les résultats présentés proviennent de simulations couplant des données climatiques issues du modèle ARPEGE (scénario SRES A1B) régionalisé par 3 méthodes différentes et 2 modèles agronomiques (BHV et STICS). Ces simulations représentent jour après jour pendant la période 1950-2100 une vigne sur terrain horizontal, non enherbée, conduite en pluvial ou avec une irrigation complémentaire économe en eau. La variabilité explorée dans CLIMATOR concerne toutes les combinaisons possibles de 3 méthodes de régionalisation x 2 modèles agronomiques x 2 régimes hydriques (sec et irrigué) x 3 variétés (Chardonnay, Merlot, Grenache) x 2 densités (0.3 et 0.9 plante /m²) x 3 sols (RU= 73, 150 et 193 mm) x 12 sites en France. Les périodes futures proche (FP : 2020-2049) et lointain (FL : 2070-2099) sont comparées au passé récent (PR : 1970-1999).

## Impacts sur la phénologie

La phénologie étant liée aux températures cumulées, le CC se traduit par une avancée généralisée des différents stades (Fig. 1), quelle que soit la variété et quelle que soit la méthode de régionalisation. Pour les sites déjà viticoles, l'ensemble du cycle de culture serait avancé de 20 à 40 jours entre PR et FL. D'autre part, des sites où la variété ne parvenait pas à maturité deviennent aptes à la production, ou bien le deviennent avec plus de régularité, ce qui se traduit par une extension vers le nord de l'aire de culture de la variété : du point de vue climatique, Colmar, Versailles ou Rennes pourront envisager la culture du Merlot sans plus de risque qu'à Bordeaux dans la période actuelle.

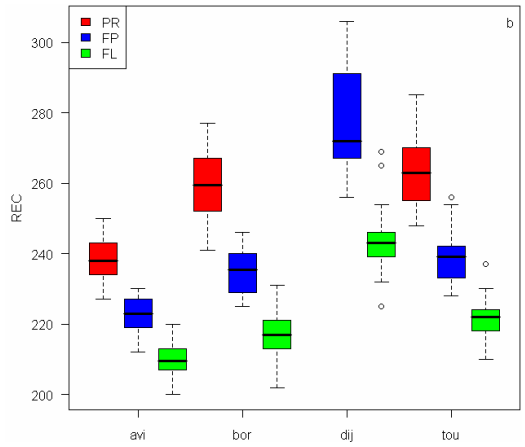



*Figure 1 : Evolution des dates de récolte simulées pour 4 sites viticoles. Cépage Merlot, climat A1B TT*

## Impacts sur le confort hydrique et la restitution d'eau au milieu

Malgré l'augmentation du déficit hydrique climatique, le confort hydrique de la vigne ne subit pas une détérioration générale : seuls les sites de Toulouse et St Etienne montrent une diminution sensible du rapport ETR/ETM. En moyenne sur 30 ans, le rapport ETR/ETM reste corrélé à l'indicateur climatique annuel de bilan hydrique, P-ET0. Cette relation générale est modulée principalement par la réserve utile du sol dont l'effet se traduit par un déplacement général du niveau de ETR/ETM. La densité de plantation intervient au second ordre, tout comme la variété, le déplacement de la période phénologique floraison – maturation n'étant pas suffisant pour modifier significativement le statut hydrique qui résulte d'une évolution à long terme et cumulative des flux hydriques. L'effet variété est d'autant moins sensible que la réserve utile du sol est plus grande et joue un rôle « tampon ». Par ailleurs, le CC se traduit par une baisse sensible de la restitution d'eau au milieu, c'est à dire aux nappes en profondeur. Cette restitution varie aussi principalement en fonction de P-ET0 et de la réserve utile du sol, la densité et la variété n'ayant pas d'influence significative.

## Impacts sur le confort thermique

Comme pressenti, l'avancée des stades phénologiques accentue l'effet du réchauffement de l'atmosphère et les températures réellement ressenties par les plantes et le raisin en cours de maturation devraient augmenter d'au moins 5°C, soit bien au-delà de l'échauffement moyen de l'atmosphère (Fig. 2) avec un impact potentiellement négatif sur la qualité du raisin, en particulier pour sa teneur en composés phénoliques. Les retards de maturité phénolique constatés ces dernières années confortent cette interprétation.

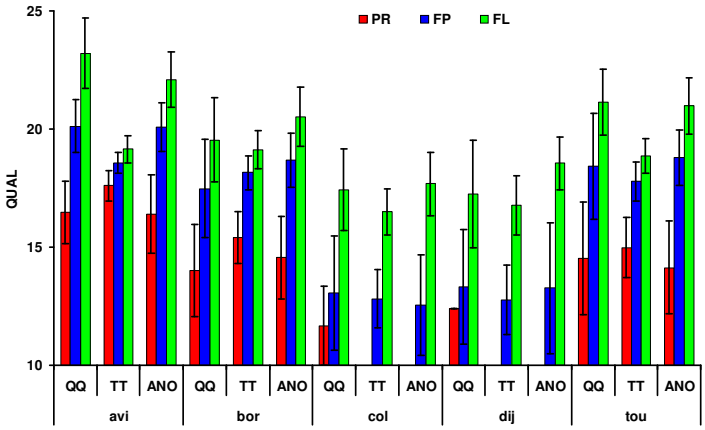



*Fig. 2 : Evolutions de la température minimale moyenne pendant la maturation (période véraison-maturité) du Merlot pour 5 sites viticoles et 3 méthodes de régionalisation.*

## Adaptation et Conclusions

L'adaptation au CC du système de culture sans délocalisation a été testée de manière encore très rudimentaire. Par exemple, les conditions de maturation évoluent de manière défavorable à la qualité, surtout pour les sites du sud, une évolution seulement provisoirement tempérée avec une variété plus tardive. Pour les effets les plus nets du CC, l'avancée de la phénologie et le changement des conditions de maturation, et en dehors d'une hypothétique adaptation du matériel génétique, il sera donc très difficile d'échapper à des impacts négatifs. Pour le fonctionnement hydrique, moins affecté par le CC, de nombreux moyens d'action sont disponibles, dont l'irrigation, à la condition *sine qua non* mais problématique que de l'eau reste disponible. Optimiser l'adaptation sera crucial pour une culture pérenne de longue durée où les coûts d'installation sont importants ; les plantations actuelles seront encore actives en 2050. A cette fin, même loins d'être exhaustifs, les résultats obtenus dans le cadre de CLIMATOR fournissent des tendances quantifiées et une première hiérarchisation des incertitudes.

## Conséquences des modifications futures du climat sur la forêt en France

**A. Bosc[1*], V. Badeau[2], N. Bréda[2]**
[1]INRA Bordeaux, UR 1263 EPHYSE, Cestas
[2]INRA Nancy, MR INRA UHP 1137 Ecologie et Ecophysiologie Forestières, Champenoux
*Auteur correspondant : alexandre.bosc@pierroton.inra.fr

Les forêts, de par leur pérennité, sont fortement impactées par les variations interannuelles du climat et ses évolutions à long terme. Les déterminants climatiques de la croissance des arbres sont étudiés depuis longtemps par analyse rétrospective, rendue possible par l'analyse des relations cernes – climat (dendroclimatologie). Pour la forêt et la filière bois, les enjeux face à un climat en évolution concernent la durabilité de la répartition des essences et de leur état sanitaire, ainsi que le maintien de la productivité ou la contribution au cycle de l'eau (restitution au milieu par drainage). Dans le cadre de CLIMATOR, l'appréhension des impacts du changement climatique sur la forêt française a été étudiée à travers un ensemble de simulations reposant sur :

- trois modèles d'analyse des impacts du climat sur les forêts avec des approches spécifiques et complémentaires : BILJOU (bilan hydrique peuplement : Granier et al., 1999), GRAECO (bilan intégré eau, carbone, croissance avec gestion sylvicole : Lousteau et Bosc, 2005), EVOLFOR (modèle de niche : Badeau et al., 2010).
- trois type de couverts : feuillus décidus, conifères à fort indice foliaire, plantation de pin maritime avec sous étage herbacé ; les modèles de niches ont été déclinés pour des espèces forestières ou des groupes chorologiques,
- cinq sols forestiers avec des réserves utiles comprises entre 100 et 230 mm,
- le climat, analysé sur 3 fenêtres temporelles (passé récent PR, futur proche FP et futur lointain FL), croise deux scénarios d'émission et trois méthodes de régionalisation. La déclinaison régionale des scénarii climatiques sur les 12 sites métropolitains du projet CLIMATOR.

La démarche mise en œuvre a permis d'analyser, de quantifier et de hiérarchiser les sources d'incertitudes et voies d'adaptation autour des impacts sur quelques variables socles comme la restitution d'eau au milieu par drainage, la consommation en eau, le confort hydrique des arbres (ou déficit en eau des sols), ou plus spécifiques comme leur productivité ou l'évolution des probabilités de présence des espèces (extension et régression des contours de niches climatiques potentielles).
La modélisation des niches climatiques potentielles a confirmé les résultats précédemment acquis, à savoir la régression de l'aire potentielle des essences montagnardes ou l'extension de l'aire des essences méditerranéennes (Figure 1).

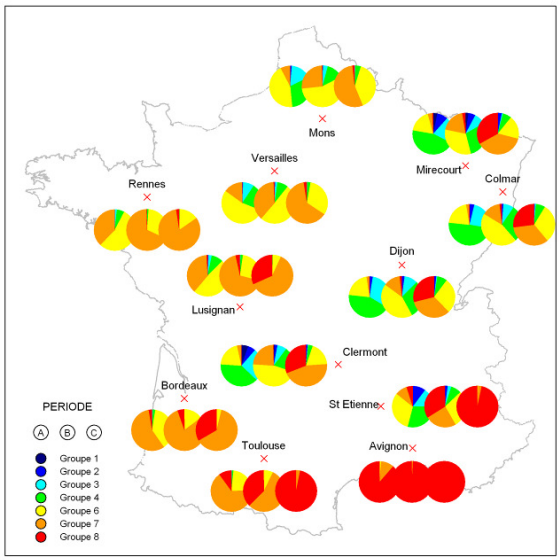



***Figure 1**. Probabilité d'occurrence de 8 groupes biogéographiques pour les 3 périodes étudiées. Scénario A1B méthode de régionalisation quantile-quantile. Groupe des essences méditerranéennes (rouge), groupe aquitain (orange), groupe nord-ouest (jaune), groupe nord-est (vert), groupes montagnards (3 niveaux de bleu).*

Cependant, l'incertitude climatique (scénario et régionalisation) est très forte et entraîne des comportements divergents aussi bien pour les essences que pour les groupes chorologiques, en particulier dans la moitié nord de la France.

Contrairement à de nombreuses cultures étudiées, les divers scénarios climatiques testés ont montré des effets adverses sur la productivité du pin maritime, quelle que soit la région étudiée, et ceci dès le futur proche ; la réduction de productivité est amplifiée au futur lointain (Figure 2).

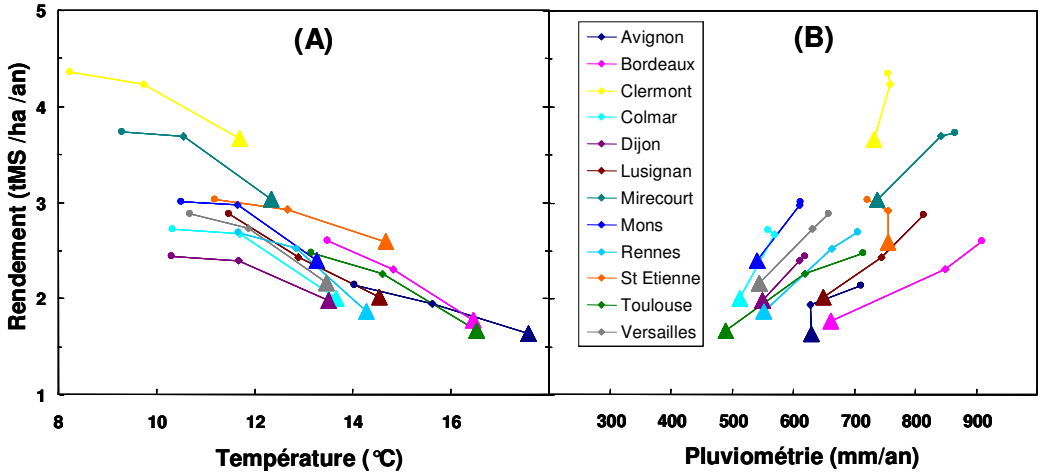



*Figure 2 : Evolution, sur les 12 sites (scénario A1B, méthode de régionalisation quantile/quantile du CNRM, Sol fersiallitique à réserve utile 100 mm), du rendement du pin maritime géré en futaie à rotation moyenne en fonction de la température annuelle moyenne (A) et de la pluviométrie annuelle moyenne (B). Pour chaque station, les trois points reliés représentent les trois périodes PR, FP et FL où FL est représenté par le triangle.*

L'analyse a montré que, sur les 12 stations testées et de manière très cohérente entre les deux modèles de bilan hydrique mis en oeuvre, l'augmentation de l'intensité et de la précocité des déficits hydriques constitue la principale contrainte sur les peuplements forestiers, non compensée par l'augmentation de température ou de teneur en $CO_2$ atmosphérique. L'analyse des sources d'incertitude climatique illustre que les divergences dans l'amplitude des impacts selon les méthodes de régionalisation sont plus importantes que le scénario d'émission retenu. Les propriétés des sols n'atténuent pas significativement l'impact de la réduction de pluviométrie. Les résultats sont discutés en terme d'options d'adaptation pour l'aménagement régional et la sylviculture visant à améliorer le confort hydrique des arbres (choix du type de couvert - décidu, sempervirent, pin – raisonné selon la réserve en eau du sol et le climat, itinéraires techniques -indice foliaire, rotation).

## Références bibliographiques


Badeau V., Dupouey J.L., Cluzeau C., Drapier J., Le Bas C., 2010. Climate change and the biogeography of French tree species: first results and perspectives. In "Forest, Carbon Cycle and Climate Change", Denis Loustau (Ed.), QUAE, ISBN 978-2-7592-0384-0, 231-252.

Granier A., Bréda N., Biron P., Viville S. (1999) A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. Ecological Modelling, 116, 269-283

Loustau, D., A. Bosc, et al. (2005). Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level. Tree Physiology 25(7): 813-823.

# Quelques impacts du changement climatique autour du semis des cultures annuelles : faisabilité, réussite et calage du cycle

**D. Gouache**
ARVALIS – Institut du végétal, Guyancourt, France (d.gouache@arvalisinstitutduvegetal.fr)

## Introduction

Pour les cultures annuelles, l'opération du semis est une opération clef pour la réussite de la culture. La qualité de l'implantation, qui impactera ensuite en cascade l'ensemble des composantes du rendement, dépend des conditions climatiques rencontrées lors de l'opération et des semaines qui suivent. Le positionnement calendaire de cette opération conditionne aussi l'ensemble du positionnement phénologique du cycle de la culture. Nous proposons ici une synthèse des différents regards qui ont été portés sur la question du semis, à la fois comme objet impacté par le réchauffement, mais aussi comme levier d'adaptation.

| Thème | Modèle(s) et référence(s) |
|---|---|
| Faisabilité du chantier | OTELO (Papy et al 1990) |
| Réussite | STICS (Brisson et al 2009) |
| Calage du cycle et esquive des stress | SUNFLO (Lecoeur et al 2010), Panoramix (Gate, 1995), CERES (Lebard 2005), STICS |

## Faisabilité des chantiers de semis

Les simulations ont porté sur le cas d'une exploitation disposant d'un matériel standard pour une exploitation céréalière de 400 hectares avec 2 Unités de Travail Annuel, en rotation maïs-blé-colza-blé. Les jours disponibles sont calculés sur une fenêtre de 20 jours à partir de règles de décision portant sur le taux de remplissage de la réserve utile de la couche travaillée et la pluviométrie des 2 à 3 jours précédant l'opération. Pour le blé, la faisabilité des chantiers de semis irait en augmentant, de l'ordre de 1 à 5 jours. La faisabilité du chantier ne serait pas un facteur limitant pour avancer les dates de semis.

Pour les semis de maïs, le changement climatique a également tendance à induire une augmentation de la faisabilité, en particulier dans le futur lointain. Cela ouvre également des possibilités de précocification des chantiers de semis, à l'exception des sites septentrionaux en futur proche, qui verraient les disponibilités sur des chantiers en mars diminuer d'un à deux jours.

## Réussite des semis

La faisabilité des chantiers ne présage pas forcément de la réussite de l'implantation et de la levée : le modèle STICS, via ses calculs du statut hydrique des couches superficielles du sol, permet de diagnostiquer des problèmes d'implantation (germination puis levée). Il permet également de proposer des dates de semis optimisant la réussite de cette phase (conditions d'humidité et de température satisfaisantes) chaque année.

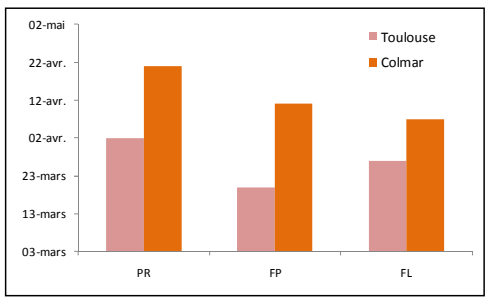



*Figure 1 : Dates de semis optimisant l'implantation du tournesol (STICS, sol 1, régionalisation TT)*

On a ainsi pu mettre en évidence que les implantations des cultures d'automne (colza et blé) comme celles de printemps (tournesol, maïs, sorgho) seront contraintes dans certains cas. Par exemple, pour le colza, l'humidité de la couche superficielle passera de 12% à 10% (FP) puis 9% (FL) à Toulouse, et deviendra plus aléatoire, avec des durées de levée pouvant augmenter, particulièrement en sols séchants. Ceci impliquerait, comme pour le blé, de retarder les semis (de 3 puis 7 jours) pour rencontrer des conditions d'implantation optimales. Pour les cultures de printemps, on remarque des possibilités d'avancée des dates de semis (Fig. 1), mais qui pourront être limitées en FL. Pour le colza comme pour les cultures de printemps, la réalisation d'irrigations « starter » pourra permettre de lever ces problèmes d'implantation : on arrive ainsi à maintenir des possibilités d'avancée des dates de semis d'un jour tous les 4 ans en maïs avec cette option.

## Calage des cycles et évolution des dates de semis

Le choix de la date de semis, combiné avec celui de la variété, détermine fortement le positionnement calendaire de l'ensemble des stades de la culture, et donc leur positionnement vis-à-vis de divers risques climatiques (températures froides ou chaudes pendant des phases sensibles, déficits hydriques). Face à l'augmentation des températures et des déficits hydriques en printemps et été, on a ainsi pu montrer que l'avancée des dates de semis pouvait être un levier d'esquive de ces stress.

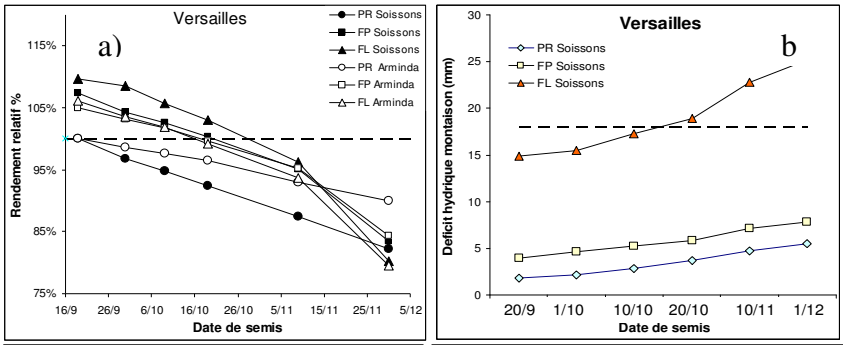



*Figure 2 : Evolution du (a) rendement relatif (% du PR) et du (b) déficit hydrique montaison du blé en fonction de la date de semis pour le site de Versailles (CERES et PANORAMIX, sol 1, climat TT)*

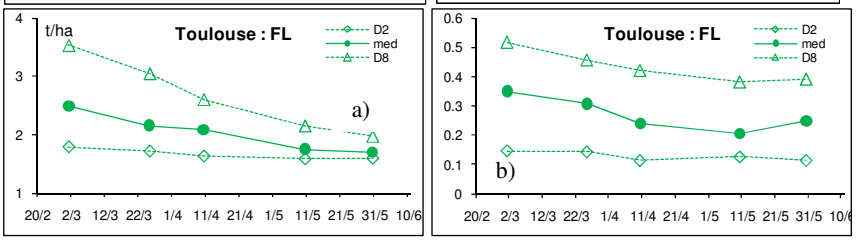



*Figure 3 : Evolution du (a) rendement et du (b) confort hydrique du tournesol (cv. Prodisol) en fonction de la date de semis pour le site de Toulouse en FL (SUNFLO, sol 2,*

Ceci a effectivement pu être mis en évidence à la fois sur blé (Fig. 2) et tournesol (Fig. 3): l'esquive des stress hydriques (et thermiques, non figurés ici) avantage le rendement des semis les plus précoces. Nos résultats montrent que ce n'est pas le cas pour le maïs irrigué : une avancée des semis ne permet pas de diminuer les quantités d'eau à apporter, ce qui est en contradiction avec une étude précédente (Lacroix et al., 2009) utilisant pourtant STICS.

## Synthèse et perspectives

L'avancée des dates de semis apparaît, au travers des travaux réalisés, comme un levier d'adaptation aux stress pour plusieurs cultures, de printemps comme d'hiver. Celle-ci apparaît faisable du point de vue des jours disponibles. Par contre, l'évolution des conditions d'implantation apparaît comme un facteur limitant potentiel de ce levier : il faudra donc trouver des compromis au cas par cas, en fonction des spécificités climatiques de chaque site mais aussi de celle de chaque espèce – leur sensibilité au stress croisée avec leur capacité de compensation de levées difficiles – et enfin de leviers d'adaptation supplémentaires (irrigation « starter »). Notons également que l'avancée des dates de semis peut avoir des impacts négatifs en matière de vulnérabilité vis-à-vis des bioagresseurs, ce qui a été montré pour 2 maladies foliaires du blé. Enfin, les évolutions de date de semis seront conditionnées par la libération des parcelles par les cultures précédentes : l'avancée des dates de récolte devrait permettre cela, ouvrant même des possibilités de nouvelles rotations.

## Références bibliographiques


Brisson, N., Launay, M., Mary, B. and Beaudoin, N., (2009). Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model, Quae (Eds), Versailles, 297 p.

Gate P, 1995. L'écophysiologie du blé. Eds ITCF/Tec&Doc Lavoisier.

Papy F., Aubry C., Mousset J., 1990. Eléments pour le choix des équipements et chantiers d'implantation des cultures en liaison avec l'organisation du travail. Les Colloques de l'INRA, 53:157-196.

Lacroix, B., Ruget, F., Lorgeou, J., Souverain, F. (2009) Impact du changement climatique sur maïs grain et maïs fourrage. Questions posées et pistes d'adaptation. In Colloque "Changement climatique : conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore" Paris 22/10/2009, 73-84.

Lebard S., 2005. Analyse et modélisation au moyen du modèle CERES de la réponse d'un couvert de blé à l'ozone. Application à l'évaluation des pertes de rendement à l'échelle régionale. Doctorat en Sciences de l'Université Paris 11, Orsay, 120 p

Lecoeur J., Poiré-Lassus R., Christophe A., Casadebaig P., Debaeke P., Vear F., Guilioni L., 2010. SUNFLO: a joint phenotyping and modelling approach to analyse and predict differences in yield potential of sunflower genotypes. Functional Plant Biology (soumis)

# Changement climatique et irrigation

**F. Levrault**
Chambre d'Agriculture Régionale Poitou-Charentes frederic.levrault@poitou-charentes.chambagri.fr

## Introduction

Composante importante de la production agricole française (1 414 000 hectares irrigués, 20 % des exploitations agricoles concernées, 5,6 % de la SAU irriguée), l'irrigation sera affectée par le changement climatique du fait des modifications attendues des précipitations, de l'évapotranspiration et des températures qui agiront sur les besoins en eau des cultures.

L'évolution des besoins en irrigation a été étudiée à pratiques agricoles fixées, notamment sur le plan des dates de semis et des variétés utilisées.

On peut distinguer le cas des cultures qui sont actuellement irriguées, de celui des cultures qui ne le sont pas mais pourraient le devenir.

## Cultures actuellement irriguées

### *Maïs*

Avec une irrigation conduite pour couvrir 80 % de l'ETM, on observe une évolution en deux temps des doses d'irrigation, à peu près similaire pour les 12 sites de métropole étudiés.

Entre le passé récent (PR) et le futur proche (FP), l'augmentation des besoins en irrigation est générale. Elle se situe autour de 40 mm par cycle cultural, ceci pour les deux méthodes de régionalisation testées : type de temps (TT) et quantile-quantile (QQ). Cette augmentation est la conséquence de l'accroissement du déficit hydrique climatique (diminution des précipitations et accroissement de l'évapotranspiration de référence), accroissement que ne compense pas suffisamment le raccourcissement du cycle cultural du maïs à cette échéance. En outre, rappelons que le maïs, espèce en C4, ne bénéficie pas de l'effet anti transpirant du CO2 rencontré chez les espèces en C3. Parallèlement à cette évolution, l'influence de la variabilité inter annuelle et du choix du sol sur les besoins en eau d'irrigation restera prépondérante.

Entre le FP et le futur lointain (FL), on constate une diminution des besoins en eau d'irrigation qui ramène ceux-ci à peine au-dessus de leur niveau dans le PR. Cette diminution, découle du raccourcissement additionnel (par rapport au FP) de la durée du cycle cultural, lui même lié à l'augmentation des températures. Chez le maïs, le mécanisme d'esquive ne se fera donc sentir qu'après le milieu du siècle. Au-delà de cette modération des besoins en eau d'irrigation dans la deuxième moitié du XXIème siècle, il ne faut pas perdre de vue que le raccourcissement important du cycle cultural, et en particulier de la phase de remplissage des grains, va affecter les rendements à la baisse, sans changement variétal.

L'avancement des cycles phénologiques se répercutera sur les calendriers d'irrigation. Sur les trois sites étudiés (Toulouse, Lusignan et Versailles), la date de démarrage avancera de quelques à une dizaine de jours entre le PR et le FL. L'accroissement des besoins journaliers en début de cycle deviendra plus bref et plus marqué. Les besoins journaliers maximaux seront identiques à Toulouse, mais plus élevés à Lusignan (+ 0,5 mm/j) et à Versailles (+ 1 mm/j). La décroissance des besoins en fin de cycle sera plus rapide dans le FL que dans le PR.

***Blé***

Dans les sols profonds, les besoins en irrigation du blé dans le FP et dans le FL restent similaires à ceux observés dans le PR, compris entre 40 et 60 mm par cycle et situés en période terminale de cycle cultural.

En revanche, sur les sols à faible RU et dans les sites du Sud (Toulouse et Avignon) et de l'Est (St-Etienne, Colmar, Dijon), on constate une augmentation continue des besoins au cours du siècle. L'absence de diminution en fin de siècle provient du fait que le raccourcissement du cycle ne s'accompagne par d'une réduction de la phase soumise au déficit hydrique. Seul le site de Toulouse fait exception avec une diminution des besoins entre le FP et le FL.

***Sorgho***

L'évolution des besoins en irrigation du sorgho est de même type que celle observée sur maïs : augmentation d'environ 20% entre le PR et le FP, suivie d'une diminution entre le FP et le FL. Le raccourcissement du cycle, notamment après le milieu du siècle, n'aura cependant pas de conséquence sur le rendement, contrairement au cas du maïs.

## Nouveaux besoins en irrigation

***La vigne***

Sur sol à faible RU et avec une conduite à 30 % de l'ETM, on constate une augmentation des besoins dans le FP puis le FL, cependant moins marquée dans la deuxième moitié du XXIème siècle en raison de l'effet anti transpirant du CO2, actif chez cette espèce en C3. Seul le site d'Avignon fait apparaître une forte diminution des besoins en irrigation entre le FP et le FL.

***Les irrigations starter***

On observe au long du XXIème siècle une tendance à la baisse de l'humidité de surface du sol (horizons 0-10 cm et 10 – 30 cm) aux périodes de semis des cultures d'hiver (par exemple août – septembre pour le colza) et des cultures de printemps (par exemple mars – avril – mai pour le tournesol ou le sorgho). Cette baisse d'humidité risque de pénaliser la germination puis la levée de ces cultures affectant ainsi la densité de peuplement. Des irrigations starter deviendront sans doute nécessaires pour garantir l'installation de ces cultures.

## La question de la ressource

Les relations établies entre percolation et précipitations (cf. Itier dans ce document) font ressortir que la baisse projetée de précipitations se répercutera en termes de baisse de recharge de nappes à concurrence des deux tiers. Les pratiques d'irrigation au cours du XXIème siècle ne pourront ignorer cette baisse de recharge. Les moyens devront être trouvés pour y faire face, que ce soit par l'adaptation des pratiques, les changements d'espèces ou la création de capacités de stockage.

## Ce qu'il faut approfondir…

L'effet de l'adaptation des pratiques (dates de semis, choix de variétés) sur les besoins en irrigation reste à étudier de façon exhaustive.
Le comportement des aquifères face au changement climatique doit être analysé, de façon à préciser la faisabilité concrète de l'irrigation, en incluant la question du stockage de l'eau.

# Evolution des traitements fongicides sous impact du changement climatique appréhendée à travers quelques cas d'études

**D. Gouache[1*], P. Pieri[2], R. Roche[3], M.O. Bancal[3]**
[1] ARVALIS – Institut du végétal, Guyancourt, France
[2] INRA, UMR EGFV, Villenave d'Ornon, France
[3] INRA-AgroParisTech, UMR Environnement et Grandes Cultures, Grignon, France
*Auteur correspondant : d.gouache@arvalisinstitutduvegetal.fr

## Introduction

Les maladies fongiques aériennes des plantes sont connues pour avoir des impacts variables sur les cultures en fonction des variations de conditions climatiques interannuelles : cela a amené de nombreuses études à se pencher sur les relations entre bioagresseurs et climat, notamment à des fins de prévision et d'ajustement en cours d'année des pratiques de contrôle phytosanitaire (Chakraborty et al., 2008). La formalisation de ces études dans des modèles de simulation offre des outils pour évaluer les impacts du changement climatique sur les épidémies fongiques et les pratiques phytosanitaires de contrôle de ces épidémies (Garrett et al., 2006).
L'étude exposée ici reprend les résultats issus des simulations de 4 modèles. 3 d'entre eux concernent des pathosystèmes spécifiques : septoriose (*Septoria tritici*) – blé tendre d'hiver, rouille brune (*Puccinia triticina*) – blé et botrytis (*Botrytis cinerea*) –vigne. Enfin, le dernier concerne une variable biophysique complexe, la durée d'humectation, à caractère déterminant dans les épidémies fongiques aériennes.

## Caractéristiques des pathosystèmes et modèles étudiés

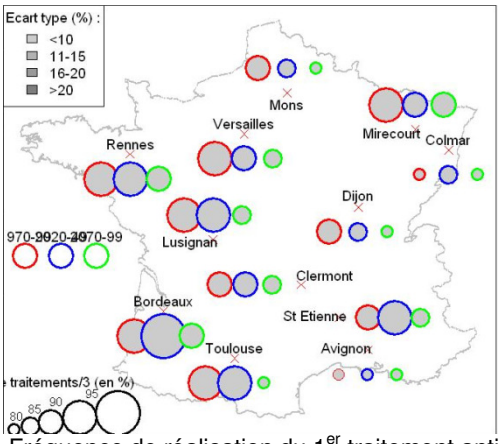
Les pathosystèmes étudiés dans ce travail répondent de manière variable aux deux déterminants climatiques clefs des épidémies que sont température et eau. Par exemple, la gamme de températures permettant la réussite des infections peut être très re-serrée ou au contraire très large. Pour l'eau, certaines maladies nécessitent seulement de l'eau libre présente sur les feuilles, alors que d'autres dépendent plus fortement des éclaboussures créées par les pluies pour se disperser.
Les modèles simulant le fonctionnement de ces pathosystèmes diffèrent également à 2 niveaux. Premièrement, ils intègrent plus ou moins fortement l'interaction entre l'hôte et le pathogène. Deuxièmement, ils intègrent plus ou moins explicitement des règles de décision sur les interventions fongicides. Ces différences majeures sont résumées dans le tableau ci-dessous.

| Degré d'intégration plante - pathogène | Phénomène étudié | Limites du modèle | Calcul des traitements fongicides | Référence |
|---|---|---|---|---|
| – ↓ + | Durée d'humectation | Variable biophysique générique | non | Lhomme et Jimenez 1992 |
| | Vigne (*cv* Merlot) Botrytis | Pas de prise en compte de l'impact du climat sur la phase hivernale | oui | Fermaud et al. 2003 |
| | Blé Septoriose | Pas de prise en compte des durées d'humectation pour les infections | oui | Gouache et Couleaud 2009 |
| | Blé Rouille brune | Pas de prise en compte de l'impact du climat sur la phase hivernale | non, mais calcul de la nuisibilité en q/ha | Roche et al. 2008 |

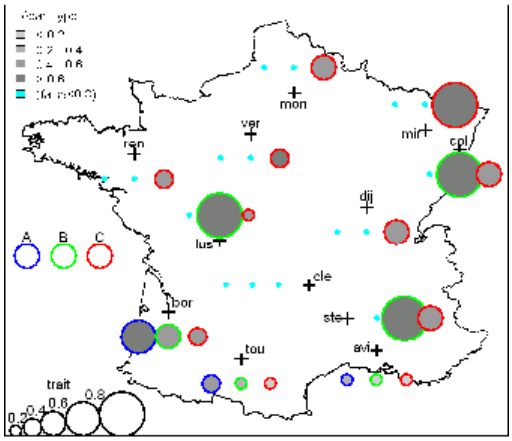
## Impacts projetés du changement climatique sur les traitements fongicides

Pour les 2 pathogènes foliaires majeurs du blé, les projections vont dans le sens d'une réduction des traitements phytosanitaires. Pour la septoriose, la fréquence de réalisation d'un traitement précoce diminue, comme le montre la carte ci-après. Sur la rouille brune, la nuisibilité (pertes de rendement en q/ha) stagne voire diminue (de 5.9 à 5.8 puis 5.1 t/ha en moyenne pour la régionalisation TT), ce qui peut se traduire en une réduction des dépenses fongicides de 20 €/ha (pour un prix du blé à 120 €/t).

Concernant la vigne, l'évolution des traitements est plus contrastée. On observe une diminution du nombre de traitements pour les sites où le Merlot est déjà cultivé, surtout sur les sites relativement humides (Bordeaux). Pour les sites nouvellement adaptés au Merlot, l'implantation sur ces nouveaux territoires se fera au prix de l'emploi d'une grande quantité d'intrants phytosanitaires.
La durée d'humectation moyenne, en heures, au printemps et en été est à la baisse, de respectivement 8.19 et 8.27 pour le passé récent, à 7.84 et 7.32 pour le futur lointain Toutefois, lorsque cette durée est recalculée en degré-jours humectés, elle apparaît au contraire légèrement à la hausse, de respectivement 2.92 et 4.58 pour le passé récent à 3.52 et 4.75 pour le futur lointain. L'augmentation des températures permettrait donc de compenser la réduction d'humidité, maintenant les conditions de réussite des infections des plantes par les pathogènes. Toutefois, ceci ne suffit pas à augmenter les risques phytosanitaires, comme le montrent les résultats sur les 3 pathosystèmes spécifiquement simulés.



Fréquence de réalisation du 1er traitement anti-septoriose (Variété Soissons semée 10/10, régionalisation TT)
**trait vigne botrytis mer cer1_a1b_ .png**



Nombre de traitements requis contre le Botrytis de la vigne (cv Merlot, méthode de régionalisation TT)

## Limites et perspectives

Les résultats produits sont limités par les hypothèses sous-jacentes aux modèles, à savoir les phénomènes non-pris en compte : on peut citer le cas de l'inoculum hivernal qui est fortement modifié suivant les conditions climatiques. Le travail sur les durées d'humectation n'intègre pas d'interaction avec l'hôte, mais reste un outil d'intérêt pour la suite : les résultats générés pourraient être couplés avec des modèles de traitements phytosanitaires sur de nombreuses espèces.
On s'est aussi penché sur les incertitudes liées aux séries climatiques. En effet, la réponse des pathogènes au climat diffère de celle des plantes par son caractère hautement non-linéaire, voire discontinue : la cohérence spatiale et temporelle des variables climatiques entre elles et leur variabilité a donc une grande importance. On a ainsi pu montrer, dans le cas des durées d'humectation, que la méthode de régionalisation avait le poids le plus important sur les résultats, tant au niveau de l'amplitude des évolutions que de la variabilité. Le choix des outils climatiques utilisés pour les études d'impact en matière de protection des cultures apparaît donc essentiel et demande à être encore approfondi (Garrett et al. 2006). Enfin, de nombreux aspects non pris en compte dans cette étude font l'objet de synthèses abouties dans Chakraborty et al. (2008) et Garrett et al. (2006).

## Références bibliographiques


Chakraborty S, Luck J, Hollaway G, Freeman A, Norton R, Garrett K A, Percy K, Hopkins A, Davis C, Karnosky D F, 2008. Impacts of Global Change on Diseases of Agricultural Crops and Forest Trees. CAB Reviews: Perspectives in Agriculture, No. 054, p 1-15.

Fermaud M., Pieri P., Mimiague F. 2003. Precursory climatic indices of Botrytis rot development in mature grapes. Proceedings in IOBC/wprs Bulletin 26(8), 63-66.

Garrett K. A.,javascript:popRef('a1') Dendy S. P.,javascript:popRef('a1') Frank E. E.,javascript:popRef('a1') Rouse M. N.javascript:popRef('a1'), Travers S. E., 2006. Climate Change Effects on Plant Disease: Genomes to Ecosystems.javascript:popRef('a1')Annual Review of Phytopathology Vol. 44: 489-509

Gouache D., Couleaud G. 2009. Le positionnement des traitements fongicides : enjeu pour la septoriose et intérêt du modèle "Septolis". AFPP. 9ème CIMA – Tours, France

Lhomme JP, Jimenez F. 1992. Estimating dew duration on banana and plantain leaves from standard meteorological observations. Agricultural and Forest Meteorology 62, 263-274.

Roche R., Bancal M.O., Gagnaire N., Huber L., 2008. Potential impact of climate change on brown wheat rust: a preliminary study based on biophysical modeling of infection events and plant-pathogen interactions. Aspects of Applied Biology 88, Effects of Climate Change on Plants: Implications for Agriculture, pp 135-142

# Impacts du changement climatique sur les systèmes d'élevage et les grandes cultures : résultats du programme ACTA 2007-2009.

**J-C. Moreau[1] , S Poisson[1], P. Gate[2], B. Lacroix[2], J Lorgeou[2] ,F Ruget[3]**
[1] Institut de l'Elevage, Service FCTA
[2]ARVALIS - Institut du Végétal
[3] INRA, UMR EMMAH, Avignon, France

Les changements climatiques et l'effet direct de l'augmentation du taux de $CO_2$ ont déjà et auront un impact significatif sur la durée des cycles de culture et l'élaboration des rendements, ainsi que sur les conditions de culture, voire leur relocalisation. Quand on évoque l'élevage on pense également à des conséquences sur la saisonnalité de la ressource en herbe, et sur les équilibres à l'échelle du système entre pâture et récolte des prairies, ou entre prairies et maïs fourrage.
Ceci justifie des travaux de prospective au sein des instituts techniques, ainsi ARVALIS - Institut du végétal et l'Institut de l'Elevage ont proposé en2006 de travailler ce sujet, avec la collaboration de l'INRA et de Météo France, dans le cadre d'un appel à projets du Ministère de l'Agriculture via le COS de l'ACTA .

Le développement du programme aura inclus in fine plusieurs étapes nécessitant chacune des mises au point méthodologiques:

- la caractérisation des changements climatiques à venir et l'exploration des changements déjà perceptibles
- la modélisation à l'échelle des cultures (maïs, prairie de graminées, luzerne, blé) avec d'une part l'estimation de l'incidence du changement climatique sur les rendements, les stades physiologiques et les besoins en eau, et d'autre part l'intégration de l'effet de l'augmentation du $CO_2$ atmosphérique
- la mobilisation d'experts pour concevoir des adaptations, agronomiques et zootechniques, avec dans certains cas une réflexion portée à l'échelle des systèmes et de leurs composantes

L'un des enjeux de ce programme étant de porter la question du changement climatique au niveau des responsables professionnels du monde agricole, et de dégager des thèmes d'études pour la Recherche et le Développement, les résultats partiels ont été discutés avec ces responsables, tout au long de l'étude.

Avec la collaboration avec Météo-France, les modèles de cultures mis au point ont tourné sur une gamme de sites couvrant les principaux contextes pédo-climatiques représentés en France métropolitaine, permettant ainsi une bonne approche des effets du changement climatique en lien avec les conditions de la production agricole. De façon à effectuer une régionalisation simple et robuste, Météo-France a mis à disposition pour l'étude les données observées sur 27 ans de 34 stations météorologiques, et les données climatiques simulées (modèle ARPEGE Climat) pour les scénarios A2 et B1 (235 mailles couvrant l'intégralité du territoire métropolitain) et trois périodes : 1970-2006, 2020-2049 (futur proche), 2070-2099 (futur lointain).

## Intérêt du programme au niveau des méthodes et des outils

### *Par rapport aux données climatiques*

Dans le cadre de notre étude, il nous est apparu important de se doter d'une représentation synthétique de l'évolution du climat. Les traitements par Analyse Factorielle Multiple Spatialisée ont permis ainsi de montrer comment les zones climatiques actuelles pourraient se déformer, ou comment de nouveaux climats pas encore présents sur le territoire national pourraient apparaitre. Cette projection territoriale des climats a servi de base à d'autres travaux comme par exemple l'étude des aléas par « saison pratique » telle que nous l'avons menée pour la prairie.

### *Par rapport aux modèles de culture*

Des adaptations du modèle STICS ont pu être conçues dans le cadre de cette étude pour étendre l'éventail possible d'utilisation du modèle dans les gammes de température élevée qui devraient apparaître dans le cours de ce siècle, par expertise s'appuyant sur des observations multirégionales datant des dernières années très chaudes. Cette étude a été l'occasion de mettre au point un paramétrage de STICS pour la simulation de la luzerne.
Parallèlement, des remises en cause des processus utilisés jusqu'à présent pour représenter les influences du climat sur le remplissage des grains des céréales (blé et maïs), ont été entreprises, afin

d'être à même de mieux représenter l'influence des futures contraintes climatiques (échaudage du blé en particulier). Ces travaux ont seulement été initiés dans le cadre de ce projet. Dans l'attente, STICS n'a pas été utilisé sur la culture du blé, mais il l'a été sur le maïs en s'appuyant sur un ajustement satisfaisant.

***A l'échelle du système ,***

La réflexion sur les conséquences du changement climatique au niveau du système de production n'a pu être menée que sur les systèmes d'élevage. Ceci a été l'occasion pour l'institut de l'Elevage d'associer une douzaine d'équipes régionales du dispositif « réseaux de références » à une réflexion de fond sur la nécessaire adaptation des systèmes et sur les voies possibles de cette adaptation.

## Quelques résultats et conclusions en grandes cultures

***Maïs fourrage et maïs grain***

Pour chacun des 31 postes météo concernés par le maïs actuellement, nous avons défini un itinéraire technique standard d'aujourd'hui représentatif en moyenne de la région considérée et un autre itinéraire de première adaptation aux conditions futures (avec semis plus précoce et emploi de variétés plus tardives), en conduite irriguée ou non selon la région et pour 3 types de sol (RU différentes).

En adaptant précocité et date de semis, le futur proche (2020 – 2049) apparaît favorable au maïs: L'anticipation des stades permettrait de positionner les cycles de manière plus profitable par rapport au rayonnement, de récolter les maïs grain à des taux d'humidité plus faibles ( économie de frais de séchage), et d'obtenir une hausse significative des rendements, en tenant compte de l'effet favorable de l'augmentation de la teneur en $CO_2$, au niveau de la production, mais surtout au niveau de la réduction des besoins en eau, effets qui sont assez discutés.

Pour le futur lointain la perspective est moins favorable malgré l'adaptation des itinéraires techniques: L'anticipation encore plus grande des stades ne pose pas de problème, mais le maintien de niveaux élevés de rendements en irrigué est sous la dépendance de la confirmation de l'effet $CO_2$ (efficience de la photosynthèse et réduction de la transpiration) et de ressources en eau permettant la satisfaction de besoins en eau plus importants. En sec, les niveaux de rendements ne se maintiennent que dans les situations favorables (sols profonds et zones où le stress hydrique ne s'accentue pas trop).

Adaptation des cycles, création de ressources en eau, développement des stratégies d'esquive (semer le plus tôt possible des variétés pas trop tardives pour éviter les stress hydriques de plein été) et sélection de génotypes adaptés aux fortes températures et au manque d'eau sont les pistes d'adaptation les plus importantes.

***Blé***

Dans un premier temps, notre travail a consisté à analyser les capacités de STICS à simuler correctement le rendement du blé en le séparant en deux composantes (nombre de grains et poids des grains). Cette première analyse a permis de proposer les bases de formalismes à modifier dans STICS, aussi bien pour le déterminisme du nombre de grains (paramétrage) que pour la définition de la taille maximale des grains et leur remplissage.

Une étude complémentaire menée avec le logiciel Panoramix a été conduite dans le but de préciser comment les risques climatiques affectant ces composantes ont évolué dans le passé, et comment ils se présenteront dans le futur, sachant que les stades épi à 1cm et épiaison seraient anticipés au rythme de 3-4 jours par pas de 20 ans en moyenne. Il apparaît ainsi qu'hormis dans quelques régions, l'anticipation des stades se révélerait insuffisante pour maintenir un niveau identique des risques relatifs aux stress finaux (épisodes de sécheresse, jours échaudants) agissant respectivement sur le nombre de grains et le poids des grains.

Ceci doit inciter à obtenir des dates d'épiaison précoces dans la plupart des régions sans toutefois semer à des dates trop précoces ce qui génèrerait d'autres risques. Il convient donc à l'avenir de concevoir des variétés nouvelles plus précoces à l'épiaison, mais néanmoins stables au stade épi à 1cm. Par ailleurs, d'autres adaptations peuvent être envisagées par rapport aux itinéraires de culture:

préparations du sol simplifiées afin de mieux conserver l'état d'humidité et de ne pas rompre les remontées capillaires possibles, recours à des cultures intermédiaires (légumineuses)…

## Production fourragère et systèmes fourragers : quelques résultats et perspectives

***Evolution de la Production nette (effet $CO_2$ inclus) et de la saisonnalité:***

Les simulations STICS avec prise en compte de l'effet du $CO_2$ modifient significativement l'effet attendu du climat futur, mais de manière contrastée selon les régions et la période (futur proche/lointain): en sol à faible réserve utile (RU) le Nord-Ouest de la France verrait d'abord un rendement inchangé, puis un rendement en baisse, tandis que dans une zone allant du Sud-Ouest au Jura le rendement serait d'abord à la hausse, puis à la baisse. Dans le Sud-Est, il augmenterait quelle que soit la période. En sol à RU élevée, le comportement diffère, avec notamment une zone de bordure atlantique où les rendements évolueraient de manière toujours favorable, y compris dans le futur lointain et le scénario A2.

Les rendements annuels en luzerne (pour un objectif de 4 coupes) sont systématiquement augmentés, quel que soit le scénario pour presque tous les sites en sol superficiel, et de manière plus marquée en sol profond.

Le calcul d'un indicateur de faisabilité de la récolte par rapport à la pluviométrie montre qu'excepté en Pays de Loire, en Champagne et dans le Massif Central, les conditions de réalisation de fauches précoces seraient détériorées dans le futur proche, pour devenir en moyenne plus favorables dans le futur lointain (A2).

Plus que le sens de l'évolution de la production à l'échelle de l'année, c'est son recalage saisonnier qui pourrait avoir des effets majeurs sur la reconfiguration des systèmes fourragers, avec

- l'apparition d'un potentiel de production hivernale non négligeable en façade Ouest du Pays,
- l'apparition d'un creux estival de production de plus en plus marqué au fur et à mesure qu'on se déplace du Nord-Est vers l'Ouest et le Sud-Ouest et que l'on se dirige vers la fin du siècle
- une date de première exploitation ou de mise à l'herbe en prairie de graminées plus précoce
- corrélativement, une pousse automnale pouvant être importante et tardive, mais relativement aléatoire et pas toujours accessible au pâturage (accroissement des problèmes de portance liés à l'excès d'eau)

***Incidences à l'échelle du système***

Dans le futur proche, en faisant abstraction des autres leviers d'évolution (règles de la PAC, coût des intrants, etc…), les adaptations au changement climatique seraient finalement de faible ampleur. Le contraste serait fort avec le futur lointain, qui serait marqué par le recul du pâturage (étés longs et secs) et la nécessité de recourir davantage aux stocks avec un besoin estival supérieur au besoin hivernal. Dans les systèmes y faisant appel, la part du maïs dans l'élaboration des stocks serait amenée à croître, en même temps qu'augmenterait la part de prairie à faucher dans les systèmes sans maïs. Dans plusieurs cas, la mise en place d'autres cultures fourragères à stocks, telles que la Luzerne ou le sorgho grain ensilé sera à envisager, et limiterait la baisse du chargement. Dans d'autres systèmes, c'est l'introduction du pâturage hivernal qui est envisagée, voire celle de cultures intermédiaires (RGI, céréales pâturées). Généralement, ces adaptations n'iront pas dans le sens de la réduction des coûts et du travail et pourront remettre en cause certaines productions (agneaux d'herbe par exemple…)

## Conclusions transversales

L'évolution des impacts du changement climatique ne sera pas linéaire, ce qui ne facilitera pas la mobilisation des sphères professionnelles: dans le futur proche, sauf pour le blé, il peut y avoir certains avantages au changement mais vers la fin du siècle cela se dégraderait pour certaines cultures, surtout dans le scénario A2.
L'importance de l'effet du $CO_2$ par rapport au signe des évolutions de rendement (dans de nombreux cas : + avec, - sans) et les incertitudes sur l'amplitude exacte des effets induits suggèrent fortement que des travaux complémentaires sont nécessaires pour préciser le comportement de certaines espèces sur tout leur cycle de culture sous l'effet conjoint d'un accroissement du taux de $CO_2$ et de plus fortes températures.

Par ailleurs, cette étude confirme que des améliorations génétiques seraient souhaitables dans la tolérance aux fortes températures et à la sécheresse du maïs ou des graminées prairiales cultivées, de même que pour le blé, en termes de calage de cycle par rapport aux évènements climatiques défavorables.

Davantage dans le champ de compétences des instituts techniques, il y a par ailleurs de nombreux travaux (observations, expérimentations, comparaisons entre zones) à mener pour mettre au point des itinéraires techniques alternatifs en grande culture ou, dans le secteur de l'élevage, pour préciser de nouveaux modes d'emploi de la prairie.

## Références bibliographiques


Gate P, Vignier L, Deudon O, Gouache D (2009) : Changement climatique : impact sur le blé en France et pistes d'adaptation, *Colloque « Changement climatique : Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore »*, Paris Octobre 2009, pp 73-84

Gate P (2009) : Les raisons du plafonnement des rendements. Perspectives Agricoles N°365 Avril 2009 pp 6-12.

Lacroix B, Ruget F, Lorgeou J, Souverain F (2009) : Impact du changement climatique sur maïs grain et maïs fourrage, questions posées et pistes d'adaptation, *Colloque « Changement climatique : Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore »*, Paris Octobre 2009, pp 73-84

Lorgeou J, Piraux F, Ruget F, Lacroix B, Renoux JP, Charcosset A (2009) : Maïs grain, une progression des rendements soutenue par le progrès génétique. Perspectives Agricoles N°355 Avril 2009 pp28-35.

Moreau J-C, Ruget F, Ferrand M, Souverain F, Poisson S, Lannuzel F, Lacroix B (2008) : Prospective autour du changement climatique : adaptation de systèmes fourragers, 15ièmes 3R, 8p

Moreau J-C (2009): Prospective à l'échelle des systèmes d'élevage herbivore, adaptations et pistes de réflexion, *Colloque « Changement climatique : Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore »*, Paris Octobre 2009, pp 113-136

Ruget, F (2009) : Impact du changement climatique sur la luzerne et la prairie, disparités régionales, *Colloque « Changement climatique : Conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore »*, Paris Octobre 2009, pp 104-111

Ruget F, Abdessemed A, Moreau J.-C (2008): Impact of global climate change scenarios on alfalfa production in France .*Congrès EGF,* Uppsala, 3p

# Géoclimatologie ou déplacement des cultures

**E. Lebon[1], V. Badeau[2]**

[1] INRA-Montpellier SupAgro, Laboratoire d'écophysiologie des plantes sous stress environnementaux, MONTPELLIER
[2] INRA-Université Nancy I, Écologie et écophysiologie forestières, CHAMPENOUX
*Auteur correspondant : eric.lebon@supagro.inra.fr

## Introduction

Le déplacement géographique des cultures constitue la stratégie « ultime » d'adaptation des systèmes de production agricoles et forestiers au changement climatique. Il pourrait répondre à des modifications majeures des potentialités agroclimatiques régionales. Son impact socio-économique et environnemental sera important mais on peut s'attendre à de fortes disparités régionales suivant le niveau de spécialisation et les caractéristiques des filières de production dominantes.

Cette communication à pour objectif de synthétiser les résultats de nos simulations relatifs à ces déplacements au travers de l'étude d'une sélection de filières représentatives de la diversité des productions végétales et de dégager quelques spécificités par grand type de production.

## *Concepts, mécanismes et variables utilisés*

L'approche retenue s'appuie sur une analyse des facteurs limitant de la production (faisabilité, rendement de la culture et/ou la qualité de la production) pour des terrains de plaine, donc sans prise en compte du relief qui peut être déterminant sur les cultures (la vigne par exemple). Au niveau thermique, l'élévation attendue de la température va engendrer une modification de la phénologie des cultures avec comme conséquences attendues une modification (i) de la durée favorable au développement de la culture, (ii) de la durée des phases de développement, (iii) des indices thermiques qui traduisent certaines spécificités physiologiques. Sur un plan hydrique, la baisse des précipitations et l'accroissement de la demande climatique seront responsable d'une augmentation de l'intensité et de la durée des stress hydriques. Ces mécanismes sont analysés au travers d'indicateurs agroclimatiques classiques exprimant les besoins thermiques, le niveau de satisfaction des besoins en eau et les conditions thermiques rencontrées pendant certaines phases critiques du cycle de la culture. Enfin l'analyse prend en compte ou non les effets directs et indirects induits par les concentrations en CO2.

## Déplacement des systèmes de culture : à quoi peut-on s'attendre ?

Une première analyse des résultats de nos simulations révèle un tableau contrasté suivant les types de productions et leur dynamique temporelle. Pour la majorité des systèmes de production, les zones de culture actuelles devraient être conservées grâce à l'utilisation de variétés permettant de repositionner le cycle végétatif et/ou l'adaptation des pratiques culturales et le choix des types de sols. En revanche pour certains systèmes tels que les cultures annuelles estivales et les cultures pérennes, la question d'un repositionnement géographique est clairement posée.

o Des systèmes dont la distribution spatiale serait *peu impactée*

Ces systèmes correspondent à des productions pour lesquelles l'élaboration des composantes du rendement a lieu pendant les intersaisons (printemps, automne), comme les cultures d'hiver (blé) ou les cultures fourragères. Les effets négatifs du changement climatique durant la période estivale sont compensés par un allongement de la durée du cycle au printemps et/ou en automne.

o Des systèmes dont la distribution spatiale serait *fortement impactée*

Cet ensemble regroupe des systèmes aussi différents que la maïsiculture, la viticulture et la production forestière pour lesquels les conditions climatiques estivales jouent un rôle déterminant dans l'élaboration du rendement, de la qualité voire même pour la pérennité de la culture (forêt).
La maïsiculture, dans sa répartition géographique actuelle, devrait être fortement impactée par le changement climatique. Celui-ci engendrerait d'une part des pertes de rendements significatives

induites par le raccourcissement du cycle végétatif et d'autre part, des besoins accrus en eau. Face à ce constat, une re-localisation de cette culture dans le Nord de la France où les conditions thermiques deviendront progressivement favorables et l'adoption de variétés à cycle long devrait permettre de maintenir voire d'augmenter les rendements, sous réserve d'une disponibilité suffisante des ressources en eau. Cette stratégie pourrait compenser l'utilisation de variétés à cycles courts moins exigeantes en eau dans le Sud-Ouest.

Pour les espèces pérennes ligneuses, comme pour les autres productions, le changement climatique se traduira par un déplacement des zones de production vers le Nord (Fig. 1). Ces systèmes sont néanmoins contraints d'une part par des facteurs indépendants de la production *stricto sensu* comme une spécialisation régionale forte (structures de production, savoir-faire, lien culturel, paysages et terroir) et le besoin de garantir des services non directement marchands (maintien de la biodiversité, régulation et purification de l'eau, protection des sols, contrôle des feux, régulation climatique régionale, récréation, etc.) d'autre part par un besoin d'anticipation plus fort que pour les cultures annuelles (rotations de ~30 ans pour la vigne, ~100 ans pour la forêt).

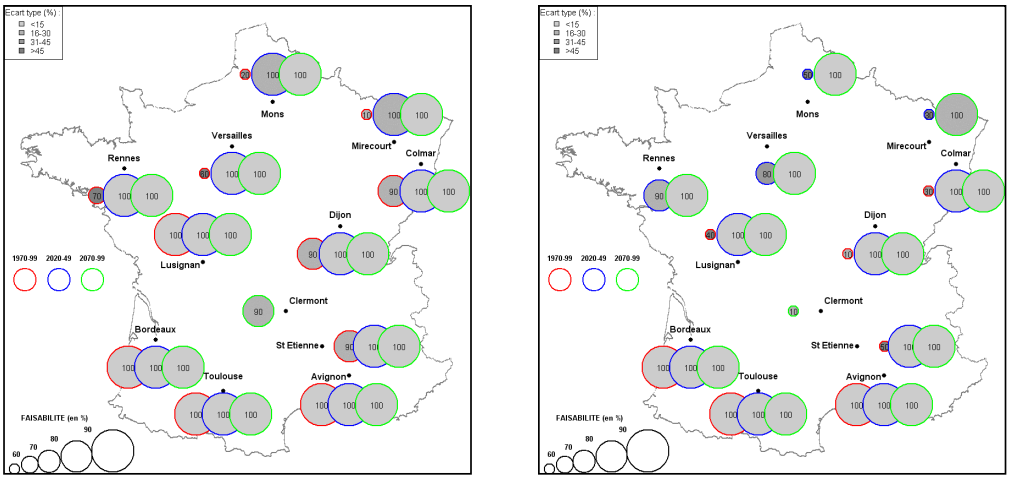



*Figure 1 : Faisabilité de la culture d'une variété précoce de vigne (cépage Chardonnay à gauche) et d'une variété méditerranéenne plus tardive (cépage Grenache noir à droite) pour les périodes 1970-1999 (rouge), 2020-2049 (bleu) et 2070-2099 (vert), modèle STICS, méthode de régionalisation par type de temps.*

## Conclusions

La meilleure plasticité des systèmes de grandes cultures devrait conduire à des paysages relativement peu modifiés sur l'ensemble du territoire excepté pour les cultures d'été irriguées comme le maïs qui devrait être probablement re-localisées en fonction des ressources en eau disponibles. La distribution des systèmes à rotation longue (vigne, forêts) pourrait-être, par contre, profondément modifiée. L'adaptation de l'encépagement et des pratiques culturales devraient permettre l'adaptation progressive de la plupart des vignobles traditionnels au prix d'une évolution majeure des caractéristiques des vins produits. Parallèlement, de nouvelles régions situées au delà de la limite de culture actuelle de la vigne pourraient devenir favorables à la production de vins de qualité. Les forêts resterons probablement des forêts car elles sont en grande majorité situées sur des terrains impropres à l'agriculture mais il n'est pas impossible que l'expansion continue des espaces forestiers depuis 1830 s'arrête, voire reparte à la baisse. La composition en essences des forêts risque par contre d'être modifiée mais dans un sens pour l'instant assez difficile à évaluer. L'utilisation d'essences allochtones ou de provenances peu ou non encore utilisées pourrait se substituer aux peuplements les plus vulnérables aux sécheresses édaphiques. Ces évolutions seront sans doute longues, graduelles et prudentes car elles ont un coût et sont peu réversibles eu égard à la durée de vie des peuplements.

## Quelques exemples régionaux en métropole

**F. Levrault[1], N. Brisson[2]**
[1]Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes, [2] INRA, Agroclim Avignon
Auteur correspondant : frederic.levrault@poitou-charentes.chambagri.fr

### Introduction

L'approche territoriale du projet CLIMATOR a permis d'avoir un éclairage sur les impacts agricoles et forestiers du changement climatique par grande zone géographique (fig. 1). Sans prétendre à l'exhaustivité spatiale ou des systèmes agricoles et forestiers, nous donnons ci-après quelques exemples des tendances de chacune des six zones géographiques métropolitaines à partir des sites (de 1 à 3) étudiés dans chacune d'elles.

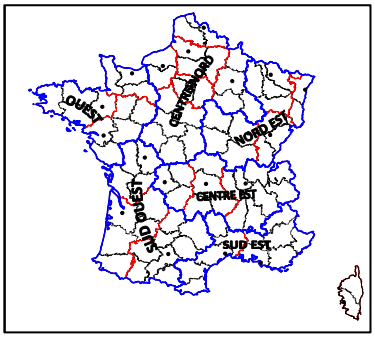



***Figure 1** : découpage du territoire en 6 zones homogènes au plan agroclimatique et s'appuyant sur le découpage régional administratif.*

### Le Centre-Nord

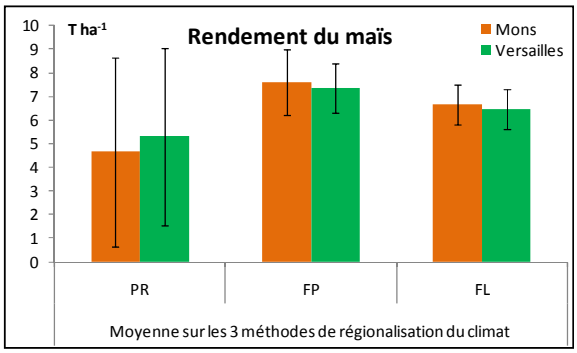



***Figure 2** : évolution des rendements de maïs grain (variété Meribel, sol à RU=226mm) entre les 3 périodes avec indication d'une variabilité intégrant l'interannuelle et la variabilité entre méthodes de régionalisation du climat.*

Les tendances seraient à l'augmentation significative du rendement du blé dans le futur proche (FP) et le futur lointain (FL) (les effets bénéfiques du $CO_2$ l'emportant sur l'augmentation des stress hydriques et thermiques), la stagnation des rendements du colza (équilibre entre facteurs favorables et défavorables), l'augmentation significative des rendements du maïs dès le FP (Fig. 2), accompagnée d'une augmentation des besoins en eau d'irrigation. De plus la viticulture deviendrait réalisable dès le milieu du siècle dans le centre et le nord de la zone pour le chardonnay et le merlot.

### Le Nord-Est

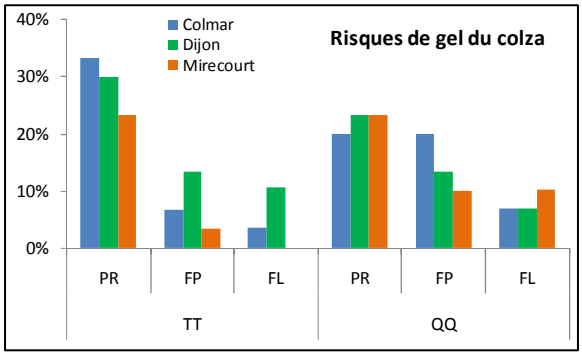



***Figure 3** : évolution des risques de gel létal du colza pour deux méthodes de régionalisation du climat.*

Au plan agroclimatique, on note, en particulier, une raréfaction des gelées automnales et hivernales, ainsi qu'une dégradation du déficit hydrique climatique annuel (baisse de 200 mm). Il se produirait une régularisation interannuelle de la production du maïs dans certains sites, et une augmentation des opportunités pour le colza liées à la diminution du risque de gel en automne et en hiver (quels que soient le site et la méthode de régionalisation du climat : cf. Fig. 3), ainsi que pour la culture du tournesol qui devient possible dans le nord de la zone. En revanche, il y aurait une diminution légère et progressive du confort hydrique des arbres.

### L'Ouest

La hausse des températures sera légèrement tamponnée par l'influence océanique, mais il y aura une dégradation du déficit hydrique climatique annuel. La productivité de la prairie se maintiendrait dans le FP et augmenterait dans le FL, accompagnée d'une différence accrue entre productions printanière et

estivale (Fig. 4). Les rendements du blé en conventionnel se maintiendraient et il y aurait un accroissement des rendements pour le blé non traité. L'augmentation du rendement du colza prédite est non significative car soumise à une forte variabilité entre années ; en revanche il y aurait un, accroissement des rendements du sorgho en sols profonds et possibilités d'emploi de variétés tardives dans le FL.

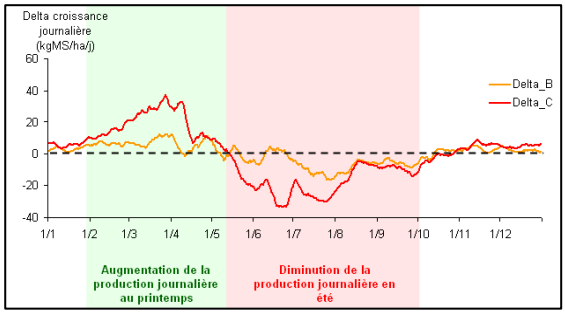



***Figure 4** : écart de production journalière (B=FP-PR, C=FL-PR en moyenne sur 30 ans) de fourrage à Rennes pour la fétuque élevée pour les trois périodes étudiées. Scénario A1B. Méthode de régionalisation QQ.*

## Le Centre-Est

Grâce à l'accroissement des températures, il faut s'attendre à une forte hausse de production de la prairie dans le FL (pouvant atteindre jusqu'à 100% avec la méthode de régionalisation QQ). Les opportunités thermiques accrues pour les cultures de sorgho (Fig. 5) et de tournesol seraient toutefois freinées par la dégradation du déficit hydrique climatique annuel, qui entrainerait également une diminution modérée du confort hydrique de la forêt, ne pénalisant pas la productivité dans le FP.

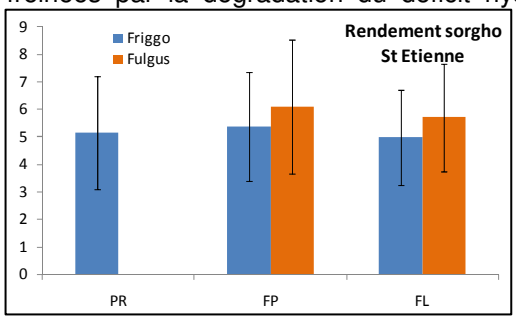
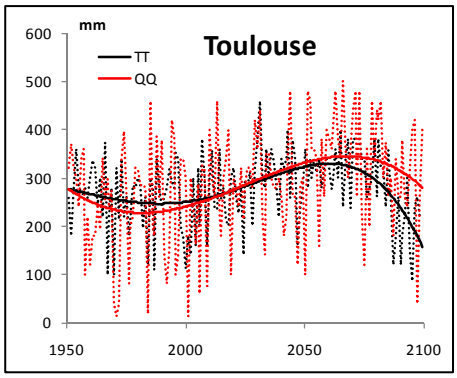



***Figure 5** : évolution du rendement du sorgho grain à Saint-Etienne pour le sol 1 de limon profond avec les variétés Friggo et Fulgus (quand elle est réalisable). La variabilité indiquée intègre l'interannuelle et la variabilité entre méthodes de régionalisation du climat.*

## Le Sud-Ouest




La baisse sévère des précipitations (baisse comprise entre 75 et 150 mm entre le PR et le FP) entrainerait le recul du rendement du maïs irrigué (cf. Fig. 6 pour l'évolution des besoins en irrigation) avec les pratiques culturales actuelles (plus marqué dans le sud de la zone), le maintien des rendements du sorgho dans le FL, peu d'évolution dans le cas du tournesol. Nos résultats indiquent une remontée vers le Nord de la zone des conditions thermiques favorables à la qualité du Merlot et une baisse des rendements du pin des Landes.

***Figure 6** : évolution des besoins en eau d'irrigation d'une monoculture de maïs à Toulouse sur un sol limoneux profond (RU=226 mm) pour les deux méthodes de régionalisation climatique TT et QQ avec un lissage polynomial d'ordre 4.*

## Le Sud-Est

Il faut s'attendre à une forte dégradation du déficit hydrique climatique annuel entrainant une légère baisse du confort hydrique de la vigne, et une légère diminution du rendement du blé en pluvial mais une augmentation en irrigué. Sous forêt, les restitutions d'eau au milieu veraient leur variabilité augmenter. Le confort hydrique et les rendements de la forêt devraient baisser. La qualité des vendanges, qui dépend de la température nocturne pendant la maturation, est appelée à diminuer (cf. fig. 7).

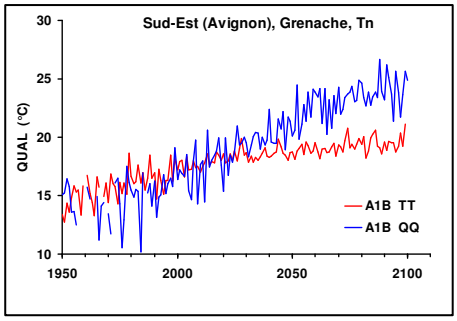



***Figure 7** : évolution de 1950 à 2100 à Avignon de des températures minimales pendant la maturation ; Scénario A1B – Méthodes de régionalisation TT et QQ - Cépage : Grenache.*

## Un cas d'étude sous les tropiques : la Guadeloupe

**J. Sierra**
INRA, UR ASTRO, Petit-Bourg, Guadeloupe, France
sierra@antilles.inra.fr

### Contexte

La Guadeloupe, comme toutes les Antilles, montre sur un petit territoire des milieux variés et extrêmement lisibles. De forts gradients de pluviométrie, associés à des variations de nébulosité qui induisent des variations de rayonnement solaire et d'évapotranspiration potentielle, déterminent des mésoclimats contrastés : du climat subhumide à saison sèche marquée à l'est de la Grande-Terre et à Marie-Galante (pluviométrie 800 mm/an) au climat perhumide sur le relief de la Basse-Terre (12000 mm/an) (Figure 1). Un large éventail de sols s'est développé en réponse à ces gradients climatiques : des vertisols calciques en Grande-Terre aux andosols sur le relief de la Basse-Terre, en passant par les ferralsols de l'est et les nitisols du sud de la Basse-Terre.




*Figure 1 : L'archipel de Guadeloupe.*

Dans le cadre du projet Climator, nous avons circonscrit l'analyse à la plaine de la Basse-Terre (nord et est de cette île), laquelle est caractérisée par un climat humide (2600 mm/an), et des ferralsols légèrement à très acides (pH 4.5 à 5.5). Cette zone intègre le deuxième bassin cannier de la Guadeloupe (vers le nord) et le principal bassin bananier (vers le sud).

Le premier objectif de notre analyse a été d'évaluer l'impact du changement climatique (CC) sur la production des deux principales monocultures d'exportation (canne et banane) et d'une culture importante dans les jardins polyculturaux à vocation familiale (maïs). Nous nous sommes aussi intéressés à l'évolution de quelques paramètres agri-environnementaux, notamment ceux qui contribuent à la fragilité actuelle des agrosystèmes et dont le risque de dégradation pourrait être exacerbé par le CC (déstockage de carbone dans le sol, qualité de l'eau).

### Le climat et le protocole de simulation

Les simulations ont été réalisées avec le modèle STICS, dont la calibration pour le sol et les cultures analysées avait été réalisée lors de travaux précédents. L'itinéraire technique appliqué à chaque culture a été celui utilisé actuellement en Guadeloupe. Celui-ci comprend des doses d'engrais azoté de 150 kg N/ha pour le maïs et la canne, et de 450 kg N/ha pour la banane, distribués en 10 applications durant le cycle jusqu'à floraison.

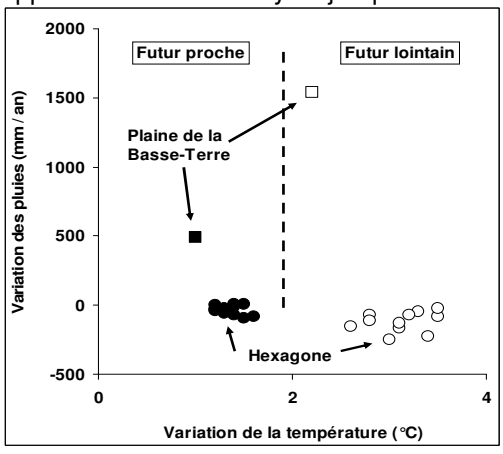



*Figure 2 : Le CC dans l'Hexagone et dans la plaine de la Basse-Terre (scénario CNRM A1B).*

Un seul scénario climatique est disponible pour la région analysée (scénario CNRM A1B). Pour ce scénario, l'augmentation de la température est la plus faible parmi les sites étudiés dans Climator. La tendance s'inverse pour les pluies (Figure 2). L'augmentation prédite pour les pluies est de 20% plus importante en période sèche (février-mai) qu'en période humide (juillet-novembre). C'est-à-dire, les différences relatives entre saisons ont une tendance à s'estomper dans le temps. De plus, à cause d'un plus grand ennuagement, le rayonnement solaire arrivé aux cultures diminue de 8% dans le futur proche (FP) et de 18% dans le futur lointain (FL).

## L'impact du CC sur les rendements et l'environnement

Les rendements diminuent pour les trois cultures analysées et la réduction est plus importante dans le FL (Figure 3). Ces résultats sont à mettre en relation avec le raccourcissement du cycle de culture (à cause de l'augmentation de la température), et aussi à la réduction du rayonnement solaire. Ce dernier affecte notamment la canne et le maïs, la banane étant moins sensible à la diminution du rayonnement. A remarquer que la production de sucre chez la canne est plus affectée que le rendement en matière sèche (p.ex. –23% dans le FL) à cause d'une diminution importante de sa teneur à la récolte (p.ex. –32% dans le FL).

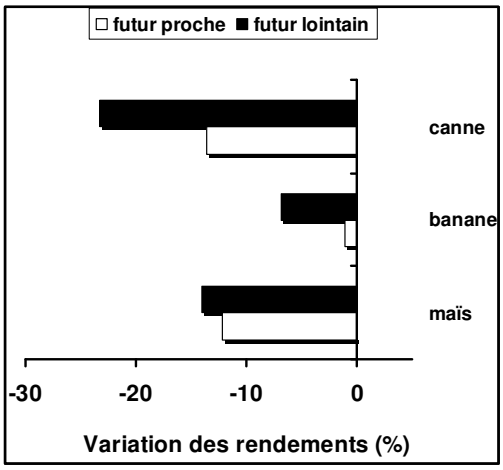



*Figure 3 : Effet du CC sur les rendements*

L'impact du CC est plus faible pour la banane à cause d'une compensation entre l'effet positif de l'augmentation du $CO_2$ (plante C3) et l'effet négatif du raccourcissement du cycle. De plus, l'augmentation de la température a aussi un effet positif sur le taux de croissance de cette culture à cause d'une température optimale relativement élevée (29°C vs. 25°C pour le maïs et 27°C pour la canne).

En ce qui concerne la qualité de l'eau, l'augmentation des pluies n'induirait pas nécessairement un renforcement du lessivage de nitrates vers les nappes, à condition que les doses d'engrais ne soient pas incrémentées. Cela est dû à la capacité des sols de la région, notamment les sols de la zone bananière, à retenir une partie des nitrates. En revanche, la teneur en matière organique (MO) serait très affectée par le CC (Tableau 1).

| | FP | FL |
|---|---|---|
| | % variation en MO | |
| maïs | – 13 | – 19 |
| banane | – 4 | – 9 |
| canne | – 5 | – 11 |

*Tableau 1 : Effet du CC sur la quantité de MO du sol.*

En moyenne, la réduction en MO est de 7% dans le FP et de 13% dans le FL. Cela est dû, d'une part, à l'accélération de la minéralisation à cause de l'augmentation de la température et, d'autre part, à la réduction drastique des restitutions via les résidus de récolte, notamment chez la canne et le maïs.

## Quelques adaptations et potentialités

➢ Plantations plus précoces : décaler les cycles pour mieux profiter d'un début d'année plus humide et éviter les températures plus élevées de la période humide.

➢ Augmentation de la biodiversité cultivée (rotations, cultures et variétés associées, cultures des légumineuses, pluriactivité agriculture/élevage) : i- minimiser les risques et diversifier les sources de revenus ; ii- augmenter les entrées de carbone dans le sol.

➢ Amélioration génétique : obtenir des variétés avec des seuils de température et des indices de récolte plus élevés.

➢ Utilisation des plantes C3 (p.ex. plantes à tubercule) : profiter de l'effet du $CO_2$ et de la possibilité de réaliser des plantations plus précoces (effet de rallongement du cycle végétatif en jouant sur l'effet photopériodique).

## Références bibliographiques

Sierra, J., Brisson, N., Ripoche, D., Déqué, M., 2010. Modelling the impact of thermal adaptation of soil microorganisms and crop system on the dynamics of organic matter in a tropical soil under a climate change scenario. Submitted.

Peterson, T.C., Taylor, M.A., Demeritte, R., et al., 2002. Recent changes in climate extremes in the Caribbean region. J. Geophys.Res. 107, ACL 16, 1-9.

# Atouts et vulnérabilités des cultures face au changement climatique

**F. Levrault**
Chambre d'Agriculture Régionale Poitou-Charentes frederic.levrault@poitou-charentes.chambagri.fr

On examine ici les leviers par lesquels le changement climatique va affecter le fonctionnement des systèmes cultivés, faisant apparaître des atouts et/ou des vulnérabilités suivant les cultures concernées. Les résultats présentés correspondent à une hypothèse de scénario d'émission A1B et le comportement des cultures est analysé à pratiques culturales fixées (dates de semis et variétés). Notre analyse n'inclut pas la dimension économique, les hypothèses sur les charges de production et les prix des produits étant trop incertaines au regard des échéances de l'étude.

## Le CO2 accru favorisera la photosynthèse, plus nettement pour les espèces en C3

L'augmentation du CO2 atmosphérique stimule la photosynthèse, un doublement du CO2 augmentant de 10 à 20 % l'assimilation nette. En outre, l'accroissement du CO2 atmosphérique augmente la résistance stomatique, ce qui permet aux plantes de mieux résister à une dégradation des conditions hydriques. Or, cette double réponse des plantes à l'augmentation du CO2, est beaucoup plus marquée chez les espèces en C3 (blé, colza, prairie, tournesol…) que chez les espèces en C4 (maïs, sorgho). A même augmentation en CO2 atmosphérique, le rendement des espèces en C3 sera ainsi davantage favorisé. Et à même augmentation du déficit hydrique climatique (pluies – ET0), les espèces en C3 subiront une moindre dégradation de leur état hydrique (cf. fiche RENDEMENT). Cet atout des C3 sur les C4 ne permet cependant pas à lui seul de prévoir les évolutions de rendement dans le futur, compte tenu des nombreux autres facteurs en jeu (sensibilité au gel, ampleur de l'esquive, positionnement des phases sensibles, sensibilité aux températures élevées…).

## Le développement des cultures sera accéléré par la disponibilité thermique accrue

Le réchauffement moyen (+ 0,6°C de température moyenne annuelle entre le passé récent, PR, et le futur proche, FP) prévu en France va accroître la disponibilité thermique pour les espèces cultivées. Les besoins en chaleur nécessaires au déroulement complet d'un cycle phénologique seront donc, en un lieu donné, satisfaits plus rapidement et/ou plus fréquemment.

***Raccourcissement des cycles***

Le raccourcissement des cycles culturaux variera d'une espèce à l'autre (cf. fiche TIMING). Les espèces les plus concernées sont les cultures de printemps, notamment le maïs avec un raccourcissement de 41 jours entre le PR et le futur lointain, FL. Les espèces les moins concernées seront les cultures d'hiver vernalisantes et photosensibles (blé et colza) : raccourcissement de 16 jours entre le PR et le FL. Ce raccourcissement des cycles aura comme principal bénéfice l'esquive (plus ou moins complète suivant l'espèce) des stress hydriques et thermiques de printemps et d'été. Mais lorsqu'il touchera la durée de la phase de remplissage des grains, il pourra affecter le rendement à la baisse (cas du maïs dans le FL).

Le raccourcissement des cycles entraînera l'allongement de la durée d'interculture. Dans le cas d'un blé à Versailles par exemple, cet allongement sera de 10 à 13 jours entre le PR et le FP puis encore de 9 à 12 jours entre le FP et le FL suivant la méthode de régionalisation utilisée. Si le sol reste nu durant cette période, l'allongement de la durée d'interculture constituera a priori un risque accru de lixiviation d'azote, sachant toutefois que la baisse prévue des précipitations estivale rendra les épisodes de percolation plus rares que par le passé.

***Nouvelles opportunités de culture***

Ces nouvelles opportunités concerneront principalement les espèces à besoins élevés en chaleur, non cultivables aujourd'hui dans les parties les plus fraîches de notre territoire.

En monoculture, le tournesol illustre bien ce phénomène. Dans les plaines du Nord de la France (site de Mons), il n'atteint sa maturité dans le PR qu'une année sur 10 au mieux suivant la méthode de régionalisation utilisée. Dans le FP, elle sera atteinte 6 à 8 années sur 10 et dans le FL tous les ans. Une progression similaire mais plus graduelle est observée pour la moyenne montagne (site de Clermont – Theix) avec une maturité atteinte 5 à 8 années sur 10 dans le FL.

En rotation, l'avancement des dates de récolte va permettre certaines successions jusque là irréalisables dans les régions les plus fraîche du territoire. A Colmar par exemple, un maïs précoce

(variété Méribel) qui n'atteint la maturité dans le PR que 0 à 2 années sur 10 dans une rotation maïs-blé-colza-blé, y parviendra 8 à 10 années sur 10 dans le FP.
En cultures pérennes, la vigne bénéficie du même mécanisme. D'une part, dans les zones actuelles de culture, le réchauffement permet de nouveaux choix de cépages. A Dijon par exemple, le grenache (typique du Sud-Est) n'atteint la maturité que 3 à 7 années sur 10 dans le PR. Dans le FP, il y parvient 9 à 10 années sur 10. Dans le FL, il y parvient tous les ans quelle que soit la méthode de régionalisation utilisée. D'autre part, le réchauffement permet le développement de la viticulture dans des régions jusque là inaptes. A Mons, le chardonnay (typique de la Bourgogne) n'atteint sa maturité que 3 années sur 10 dans le PR. Dans le FP, il y parviendra 9 à 10 années sur 10, et dans le FL tous les ans.

## Les accidents thermiques gel / échaudage changeront de fréquence

En plus de ses effets moyens, le réchauffement agira sur la fréquence des températures élevées. Le nombre de jours échaudants (Tx > 25°C) au cours des mois d'avril à juin va s'accroître : il passera en moyenne annuelle de 7 à 19 jours à Versailles, de 15 à 35 jours à Toulouse et de 27 à 48 jours à Avignon entre le PR et le FL. Le blé comme le tournesol seront concernés par ce risque accru (cf. fiche TIMING). Chez le blé, le raccourcissement du cycle permet, par esquive, la modération du risque d'échaudage dans le FP. Mais le risque s'accroît nettement dans le FL. Chez le tournesol, on observe dès le FP une très nette augmentation du nombre de jours échaudants pendant le remplissage des grains, tout particulièrement dans la zone Sud-Ouest.
Dans le Nord et le Nord-Est de la France, le gel peut pénaliser les cultures d'hiver. Dans le cas du colza, la raréfaction des jours de gel à l'automne va réduire la fréquence des dégâts aux premiers stades de développement de la culture. A Colmar, la faisabilité du colza passe ainsi de 1 à 2 années sur 10 dans le PR à 9 à 10 années sur 10 dans le FL. Dans le cas du blé, la faisabilité de la culture augmente dans le FP puis dans le FL du fait d'une réduction des gels d'épis tout particulièrement dans la partie Nord-est de l'hexagone (cf. fiche BLE).

## Les excès d'eau seront à la baisse, le manque d'eau à la hausse

***Excès d'eau à la baisse***
Deux résultats illustrent cette tendance. La baisse de pluviosité automnale va réduire l'humidité des sols. En conséquence, les parcelles seront plus fréquemment aptes à supporter le passage des engins agricoles, et le nombre de jours disponibles pour les travaux des champs en période automnale va sensiblement augmenter dans les deux tiers Nord et Ouest du territoire. Autre exemple, sur la façade Ouest de l'hexagone, les excès d'eau hivernaux préjudiciables au rendement expliquent les faibles rendements simulés par STICS dans le PR. A l'avenir, ces excès d'eau se raréfieront.

***Manque d'eau à la hausse***
La baisse des précipitations et l'augmentation de l'évapotranspiration vont réduire le confort hydrique des plantes (cf. fiche EAU), avec des effets à nuancer suivant les espèces. Pour le blé, culture d'hiver de type C3, le rendement ne devrait pas en pâtir en raison d'une esquive partielle par anticipation et de l'effet anti transpirant du CO2 (cf. fiche BLE). Pour le tournesol, culture de printemps de type C3 et à fort enracinement, c'est surtout la croissance de la jeune plantule qui sera mise à mal (cf. fiche TOURNESOL). Pour le maïs enfin, culture de printemps en C4, l'esquive ne sera pas suffisante à échéance du FP entraînant un accroissement des besoins d'irrigation d'environ 40 mm par campagne, tous sites confondus (cf. fiche IRRIGATION). La prairie verra sa productivité annuelle maintenue voire légèrement augmentée, mais avec une forte baisse de la productivité estivale (cf. fiche PRAIRIE). La contrainte hydrique s'avère la principale conséquence négative du changement climatique.

## Ce qu'il faut approfondir…
Quelles opportunités de cultures en dérobé offre le raccourcissement des cycles culturaux ? Comment l'adaptation des pratiques (dates de semis, variétés) permet-elle d'amplifier les mécanismes d'esquive ? Quel appui la modélisation peut-elle apporter aux arbitrages sur le re localisation des zones de production ?

# Eléments sur le changement climatique et la culture du tournesol en France

**N. Brisson[1], L. Guilioni[2]**
[1]INRA, Agroclim, Avignon,France
[2] SUPAGRO, 3, place Viala, Montpellier, France
Auteur correspondant : brisson@avignon.inra.fr)

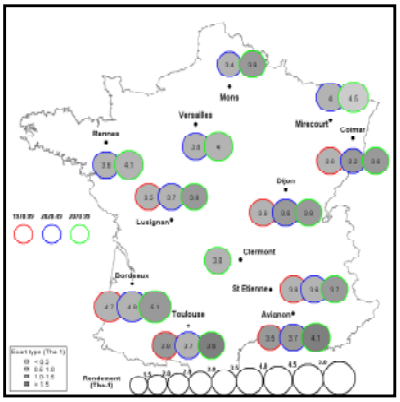
## Introduction

Occupant près de 2,5 % de la SAU nationale, le tournesol est une culture de printemps à besoins modérés en eau, dont les rendements agricoles par zone CLIMATOR oscillent entre 21 et 27 qx/ha (moyennes 2000 à 2007). Actuellement, il est surtout présent dans la zone Sud Ouest où il occupe 7 % de la SAU. Face au changement climatique, le tournesol dispose de deux atouts majeurs : son métabolisme en C3 qui lui permet de bien valoriser l'augmentation du $CO_2$ atmosphérique et sa résistance à la sécheresse. Ses faiblesses résident dans le positionnement estival de son cycle, qui induit un fort raccourcissement de la phase de remplissage et dans sa sensibilité aux températures élevées.

## Protocole de simulation

Dans CLIMATOR, le tournesol a été étudiée comme une culture conduite en pluvial selon deux modalités : une modalité uniquement didactique en monoculture avec deux modèles (STICS et SUNFLO) et une modalité en rotation quadriennale pluviale de grande culture associée à du blé et du sorgho (modèle STICS). Semées le 10/04 sur l'ensemble des 12 sites, 4 variantes de la culture ont été analysées en matière de sol (RU= 104 et 193 mm) et de variété (Prodisol à cycle court et Mélody à cycle long). Les résultats présentés dans ce papier sont issus du modèle ARPEGE (scénario SRES A1B) régionalisé par l'une des méthodes du projet (Terray et al., 2010).

## Impacts sur la productivité

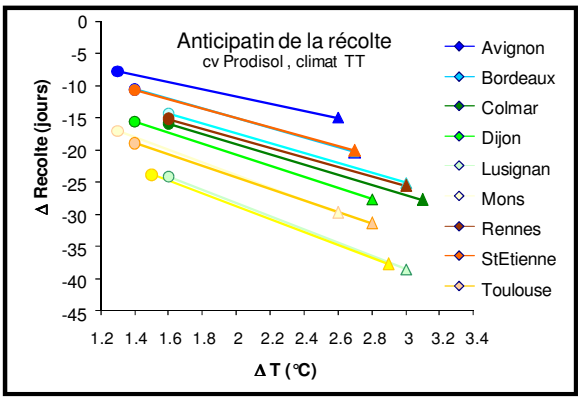



A cause de la variabilité interannuelle, il n'y a pas d'évolution significative du rendement pour les sites traditionnels (sans changement de pratiques), les effets positifs de l'augmentation en $CO_2$ de l'atmosphère compensant les effets négatifs du stress hydrique. L'augmentation se fait au bénéfice des marges Nord ou d'altitude (Fig. 1). Les incertitudes climatique et agronomique ne mettent pas en cause ces tendances.

*Figure 1 : Rendement du tournesol en rotation pour le sol 1 et la méthode des types de temps, avec la variété Melody au Sud et Prodisol au Nord*

## Impacts sur la phénologie

*Figure 2 : Anticipation de la récolte du tournesol (cv Prodisol) pour la méthode de régionalisation des types de temps. Les ● correspondent à FP-PR et les ▲ à FL-PR*




Sans changement variétaux, il y a anticipation de tous les stades : levée plus rapide, floraison et récolte plus précoces. Cette anticipation est bien reliée à l'augmentation de la température moyenne annuelle (Fig. 2) : elle varie de -4 à -6 jours/°C pour la floraison et de -7 à -12 jours/°C pour la récolte selon la méthode de régionalisation du climat et la variété. Les phases de levée et de remplissage sont

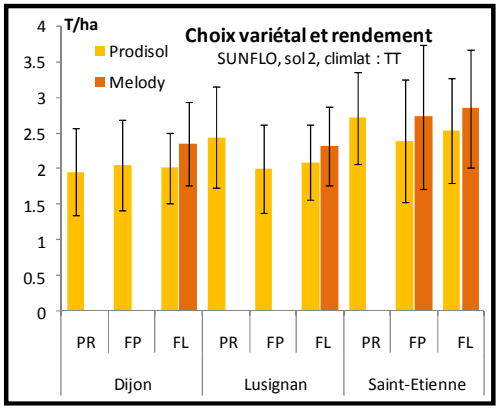
plus raccourcies que la phase de croissance végétative. Ainsi, le rôle de cette phase dans l'élaboration du rendement (mise en place du nombre de graines) se trouve accentué et une pénalisation par des déficits hydriques précoces ou une mauvaise implantation se répercutera de façon plus importante sur le rendement.

## Impacts sur le stress hydrique et thermique

En début de cycle, la croissance de la jeune plantule sera soumise à de fortes contraintes hydriques dans les sites du Sud. En effet, les risques de voir le sol se dessécher en deçà du PFP augmente jusqu'à atteindre 25 % dans le FL à Toulouse. Pendant la phase de remplissage, le confort hydrique diminue alors qu'il est déjà très faible pour le sol 2, sol assez classique pour une culture du tournesol. Toutefois, on remarque dans le FL des effets d'esquive par raccourcissement du cycle sur certains sites comme Bordeaux qui seront bénéfiques au rendement

L'initiation florale du tournesol requiert des températures minimales au dessus de 15°C alors que la formation et le remplissage des graines sont perturbés si les températures maximales dépassent 32°C. Or, l'évolution de ces deux stress thermiques n'est pas symétrique : le premier diminue peu alors que le second augmente de façon importante (à date de semis fixée) dans les sites du sud.

## Quelques pistes d'adaptation envisageables




Dans les sites du Nord et de l'Est, le choix de variétés à cycle de plus en plus long permettra d'augmenter les rendements de façon substantielle (Fig. 3), surtout avec la possibilité d'avancer les semis (quand les sols ne sont pas trop secs). Dans les sites traditionnels de la culture du tournesol, il semblerait intéressant d'envisager des irrigations starter ou l'implantation de la culture sur des sols plus profonds afin de ne pas pénaliser la phase végétative du cycle.

*Figure 3: Rendement du tournesol à Dijon, Lusignan et St Etienne en optimisant le choix variétal. SUNFLO, sol 2, régionalisation du climat : type de temps*

## Conclusion

Le tournesol est une culture qui réagit plutôt bien au changement climatique. Son extension au nord, dans le cadre de rotations céréalières, sera possible dès le FP. Dans les zones actuelles de production, il faut s'attendre à peu d'évolution en moyenne sans changement de pratiques, les effets positifs de l'augmentation en $CO_2$ de l'atmosphère compensant les effets négatifs du stress hydrique. Cependant l'augmentation de la variabilité interannuelle, liée en particulier aux sécheresses pendant la phase végétative, pourra être réduite par le recours à des irrigations starter ou de complément. Le choix de variétés progressivement à cycle long et l'avancée des semis pourra ponctuellement offrir des perspectives d'augmentation des rendements mais pas de façon systématique.

## Références bibliographiques

Terray, L. ; Pagé, C. ; Déqué, M. ; Flecher, C., 2010. L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques. In Brisson, N., Levrault, F. (Eds) : Livre Vert CLIMATOR, ADEME, 15-30.

# Le Cours en Ligne du projet CLIMATOR

**J. Roger-Estrade[1 et 2*], C. Angers[2], F. Huard[3], D. Chambert[3]**
[1] AgroParisTech, Département SIAFEE, Thiverval-Grignon, France
[2] UMR 211, INRA AgroParistech, Thiverval-Grignon, France.
[3] INRA, Agroclim, Avignon,France

*Auteur correspondant : estrade@grignon.inra.fr

## Introduction

Le projet CLIMATOR aborde les impacts du changement climatique sur l'agriculture dans un grand nombre de domaines, en considérant la diversité des régions de France et les principaux systèmes de production agricole. Ce projet, qui a pour ambition de fournir non seulement des méthodes et des outils permettant de simuler les effets du changement mais surtout un référentiel sur l'impact du changement en termes de flux, d'état des systèmes et d'adaptation des pratiques fournit un véritable socle pour comprendre et raisonner l'impact du changement climatique sur nos agro-écosystèmes.

Compte tenu de l'ampleur du champ abordé dans ce projet, qui couvre quasiment tous les domaines de la conduite des agrosystèmes, il a paru utile de valoriser les sorties du projet (de nature à la fois agroclimatique, écophysiologique et agronomique) à des fins pédagogiques. L'objectif était de mettre en forme (et en cohérence) ces sorties puis de les éditer sur un site Web dédié à la formation en ligne.

A travers ce projet, on poursuit donc trois objectifs : (i) valoriser le travail réalisé au cours du projet par les équipes participantes d'une manière originale, (ii) sensibiliser aux effets du changement climatique les utilisateurs potentiels du cours (étudiants de niveau bac minimum et professionnels s'intéressant à la gestion des agroécosystèmes), et (iii) créer un enseignement rendu attrayant car organisé autour de la problématique très actuelle du changement climatique. Il s'agit ici d'appréhender les concepts de bases en agronomie, science du sol, bioclimatologie à travers l'étude du changement climatique et de fournir des pistes pour l'approfondissement de ces connaissances.

### Organisation du Cours en Ligne

Ce cours comprend les différents aspects traités dans le projet : modélisation du climat futur, impacts sur les systèmes de culture, impacts sur le fonctionnement des plantes et du sol, adaptation des systèmes de production et des systèmes de culture.
Il s'accède par un site commun avec la Base de Données à l'adresse suivante : http://w3.avignon.inra.fr/projet_climator (Figure 1).

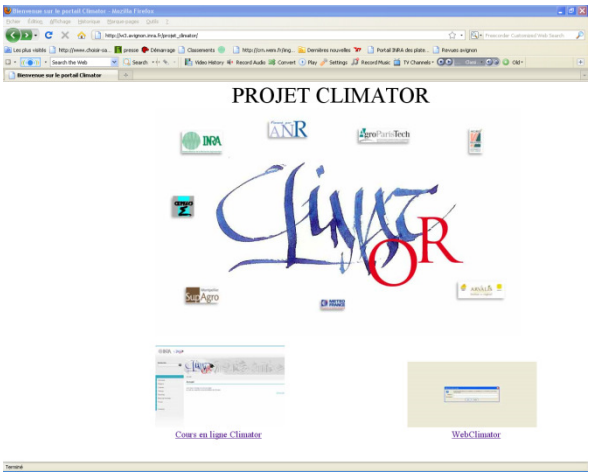



*Figure 1 : page d'accueil du site du cours en ligne*

La page du CEL est structurée en rubriques (colonne de droite) qui donne accès aux informations par les thèmes (identiques au Livre Vert), régions et cultures (figure 2). Un glossaire et un forum complètent les rubriques.

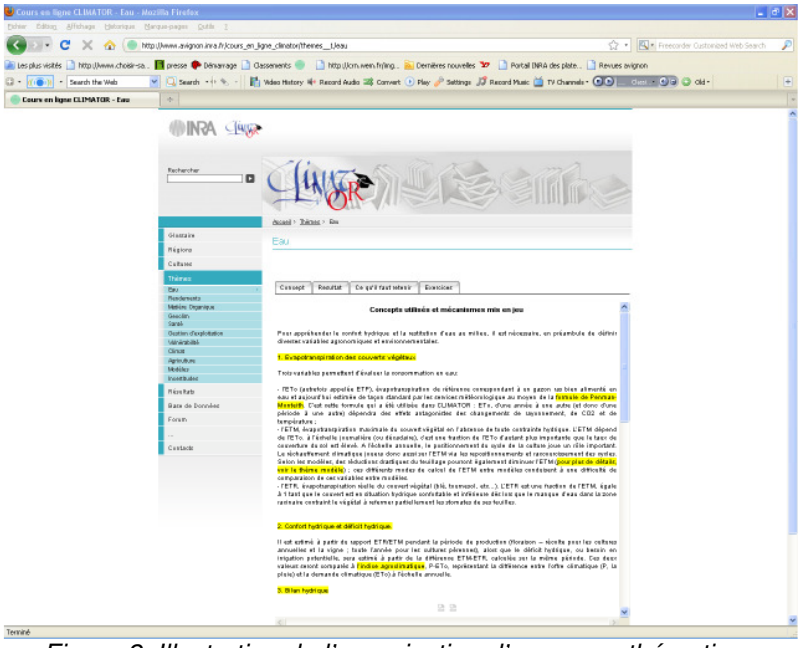


*Figure 2. Illustration de l'organisation d'une page thématique*

Pour chaque rubrique (thème, culture ou région), l'utilisateur peut accéder à quatre niveaux d'information :

1. **les concepts** et théories de base se rapportant au thème. Par exemple, s'agissant de l'eau, on y trouve le cycle de cet élément, les notions d'évapotranspiration, de réserve utile, de confort hydrique, etc… Dans les pages correspondantes des liens hypertextes renvoient soit à des approfondissements dans le site du cours lui-même, soit pointent sur d'autres sites ;
2. **les résultats** des principaux résultats du projet. Une présentation, dans un format adapté au site du CEL, donne les principaux acquis du projet. Là également, à partir de liens hypertextes programmés dans ces pages, l'utilisateur peut naviguer dans le site et au-delà pour approfondir les points essentiels ;
3. **ce qu'il faut retenir** présente une synthèse de la thématique et ouvre vers des sites qui prolongent la réflexion sur le sujet abordé ;
4. **les exercices** permettront à l'utilisateur de tester ses connaissances. Cette application est actuellement en cours d'élaboration et sera activée par la suite.

## Conclusion

Un certain nombre des objectifs initialement fixées au projet n'ont pu être atteints. Cependant ce CEL représente un premier outil qui pourra être par la suite complété et perfectionné.

# Prise en compte de l'effet de l'élévation de la concentration en $CO_2$ sur la production photosynthétique dans les modèles utilisés.

**R. Roche**
INRA, EGC, Grignon,France (roche@grignon.inra.fr)

## Introduction

Pour la plupart des cultures, la formation du rendement résulte principalement de l'accumulation de réserves carbonées provenant du processus de photosynthèse. Ce mécanisme complexe dépend tout à la fois du rayonnement disponible, de la température, de la concentration en $CO_2$ de l'air environnant, de l'ouverture des stomates principalement régulée par les conditions hydriques, et enfin de la quantité d'enzyme disponible elle-même sous dépendance de l'alimentation azotée et de la phénologie.
Jusqu'à présent, à l'instar des autres facteurs environnementaux, la concentration en $CO_2$ atmosphérique était considérée comme constante, non seulement d'un jour sur l'autre, mais aussi entre années, si bien que beaucoup de modèles n'intègrent pas de fonction spécifique rendant explicitement compte de son effet.
Si ce choix ne posait pas de problème majeur pour les simulations sur le passé récent, il n'en sera plus du tout de même pour le futur même proche. Ainsi, quel que soit le scénario d'évolution envisagé, il est prévu au minimum une augmentation de 50% du $CO_2$ atmosphérique d'ici la fin du siècle et selon toute probabilité au moins un doublement.
Dans ces conditions, les modèles ne peuvent faire l'économie d'une fonction rendant compte de l'effet du $CO_2$ sur la production et la confrontation des différentes formules retenues constitue l'objet de ce poster. Outre son rôle de substrat pour les réactions de la photosynthèse, le $CO_2$ exerce aussi un effet direct sur la régulation stomatique et donc les échanges hydriques, effet qui est traité dans un poster conjoint (Cf Olioso et al. Dans ces actes).

## Les différentes approches selon les modèles

| **Formalisme utilisé pour la photosynthèse et la prise en compte du $CO_2$** | **Modèles de production du projet Climator** |
|---|---|
| ***Dynamique de type Farquhar*** (effet $CO_2$ constitutif du formalisme) | CERES, GRAECO, PASSIM |
| ***Dynamique de type Monteith***<br>- avec **coefficient multiplicateur** pour le $CO_2$<br>- **pas d'effet $CO_2$** intégré | <br>CERES, STICS<br>SUNFLO |
| ***Statique et sans effet $CO_2$*** intégré | PANORAMIX |

***Figure 1 :*** *les principaux concepts pour simuler l'assimilation du carbone dans les couverts végétaux.*

Dans l'approche de Monteith, un coefficient appelé RUE permet de convertir le rayonnement intercepté en croissance de la biomasse. Il peut être affecté par la température, les stress et le $CO_2$ de façon empirique. Au contraire, dans l'approche de Farquhar, les processus de carboxylation, de respirations et de transfert d'électron sont simulés en tant que tels de façon indépendante et avec des fonctions de réponse spécifiques à la température. Pour les modèles ne présentant pas d'effet $CO_2$ intégré nous avons choisi d'introduire un facteur multiplicatif du rendement issu d'une synthèse réalisée par Ainsworth et al. (2008) sur les résultats expérimentaux des essais FACE :

$$\text{Rendement corrigé} = \text{rendement} * (1 + \mathbf{A} * ([CO_2] - 367)/(583 - 367)$$

Avec A = 0.14 dans le cas de modèles ne présentant pas de correction d'ETP et A = 0.08 autrement.

## Mode opératoire

Afin de comparer l'effet des différents formalismes de photosynthèse sur la prise en compte du changement climatique, nous avons testé, à l'intérieur d'un même modèle, à savoir CERES-blé les différentes options relatives aux effets du $CO_2$ en comparaison d'un autre effet purement climatique : l'échaudage. Ainsi trois options ont été croisées : prise en compte ou non de l'échaudage du grain induit par les températures élevées, prise en compte ou non de l'effet $CO_2$, mode de calcul de cet effet $CO_2$ avec soit l'approche mécaniste de Farquhar, soit l'approche plus empirique de Monteith. Le

scénario utilisé comme support sur les stations de Colmar et Toulouse est A1B, modèle Arpège et régionalisé par la méthode des types de temps.

## Résultats

Les résultats (fig. 2) montrent que la prise en compte de l'augmentation des concentrations en $CO_2$ dans l'atmosphère constitue l'effet le plus significatif dans le futur lointain. En comparaison, le mode de représentation de cet effet (Farquhar ou Monteith) n'agit qu'au second ordre, de même que l'échaudage. L'intégration d'une fonction rendant compte de l'évolution des concentrations en $CO_2$ est donc de première importance.

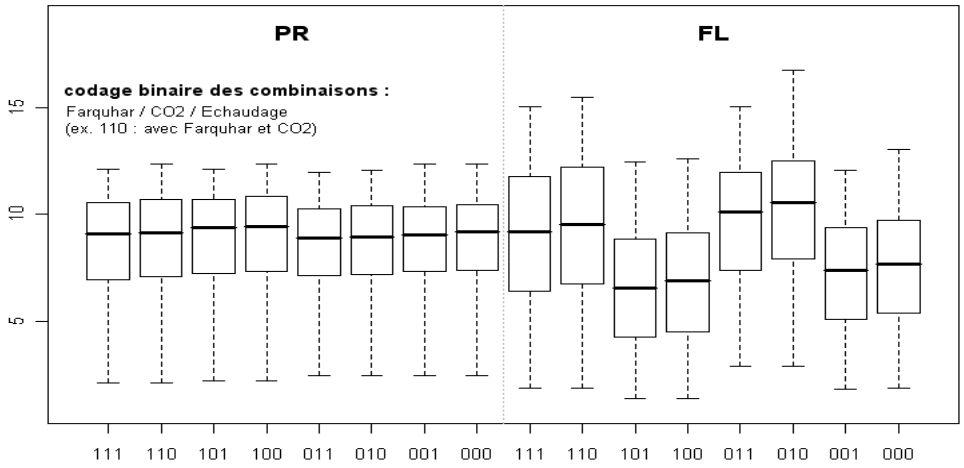



***Figure 2 :*** *comparaison des résultats de CERES blé (moyenne pour les sites de Toulouse et Colmar) en activant ou désactivant trois options de simulation : $CO_2$ ou non, échaudage ou non, calcul de l'effet $CO_2$ avec Farquhar ou Monteith pour les deux périodes extrêmes (PR et FL).*

Les résultats de la fonction empirique pour les modèles sans effet $CO_2$ intégré s'obtiennent facilement en multipliant le rendement des traitements sans $CO_2$ 001 et 000 par le coefficient 0.187 (=0.14*(655-367)/(583-367)). On obtient alors des valeurs quasi identiques à celles obtenues avec le modèle de Farquhar et légèrement inférieures à celles obtenues avec le coefficient multiplicateur présent dans CERES pour le modèle de Monteith pour ces deux lieux.

## Références bibliographiques


Ainsworth EA., Leakey ADB., Ort DR., Long SP., 2008. FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modelling studies of elevated [$CO_2$] impacts on crop yield and food supply. New Phytol 179, 5-9.

Brisson, N., Launay, M., Mary, B. and Beaudoin, N., 2009. Conceptual basis, formalisations and parameterization of the STICS crop model, Quae (Eds), Versailles, 297 p.

Farquhar GD, von Caemmerer S, Berry JA.1980. A biochemical model of photosynthesic $CO_2$ assimilation in leaves of C3 species. *Planta* 149, 78-90.

Lebard S., 2005. Analyse et modélisation au moyen du modèle CERES de la réponse d'un couvert de blé à l'ozone. Application à l'évaluation des pertes de rendement à l'échelle régionale. Doctorat en Sciences de l'Université Paris 11, Orsay, 120 p

Lecoeur J., Poiré-Lassus R., Christophe A., Casadebaig P., Debaeke P., Vear F., Guilioni L., 2010. SUNFLO: a joint phenotyping and modelling approach to analyse and predict differences in yield potential of sunflower genotypes. Functional Plant Biology (soumis)

Loustau, D., A. Bosc, et al. (2005). "Modeling climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub-regional level." Tree Physiology 25(7): 813-823.

Monteith J.L., 1972. Solar radiation and productivity in tropical ecosystems. *J.appl. Ecol.*, 9:747-766.

Riedo, M., Grub, A., Rosset, M., Fuhrer, J., 1998. A pasture simulation model for dry matter production and fluxes of carbon, nitrogen, water and energy. Ecological Modelling 105(2-3): 141-183.

# Prise en compte du $CO_2$ dans le calcul de l'évapotranspiration de référence.

**A. Olioso[1*], F. Huard[2], L. Guilioni[3]**
[1] INRA, UMR1114 Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (EMMAH), 84914 Avignon Cedex 9, France
[2] INRA, Agroclim, Avignon, France
[3] Montpellier SupAgro, Montpellier, France
*Auteur correspondant : olioso@avignon.inra.fr

## Introduction

De nos jours, la détermination de l'évapotranspiration de référence ETo se fonde le plus souvent (et le plus sûrement) sur le bulletin 'Irrigation et Drainage' FAO N°56 'Evapotranspiration des cultures' (Allen et al. 1998). Le calcul de ETo y correspond au calcul, au moyen de l'équation de Penman-Monteith (EToFAO56), de l'évapotranspiration d'une surface de référence constituée par une culture hypothétique correspondant à une surface étendue de fétuque en bon état physiologique, bien alimentée en eau et couvrant totalement le sol. L'évapotranspiration, maximale, d'une culture autre que le gazon de référence est calculée à partir de EToFAO56 en combinaison avec un coefficient cultural dépendant du développement du couvert et de l'état de surface du sol : ETm = Kc EToFAO56. Le calcul de ETo dans des conditions climatiques futures est possible à partir des informations journalières dérivées des simulations de climat (température et humidité de l'air, vitesse du vent, rayonnements incidents). Cependant, l'application directe de la formule PM ne tient pas compte du rôle de l'augmentation de la teneur atmosphérique en $CO_2$ ($[CO_2]_a$) qui a un fort impact sur le fonctionnement stomatique (e.g. Bunce 2004). Dans ce travail, nous avons simulé l'impact du $CO_2$ sur ETo au moyen d'un modèle de transfert sol-végétation-atmosphère et nous avons établi une formule permettant de « corriger » le calcul de ETo de cet impact. Les évolutions futures de ETo avec et sans prise en compte de cet impact sont analysées.

## Prise en compte du CO dans le calcul de ETo

Nous avons utilisé le modèle ISBA-A-gs (Calvet et al. 1998) qui simule les transferts sol-végétation-atmosphère en fonction des données météorologiques et du type de sol. Il décrit explicitement les effets de $[CO_2]_a$ sur le fonctionnement stomatique par le biais d'une paramétrisation couplée de la conductance stomatique et de la photosynthèse foliaire (Jacobs 1994). Les simulations de ISBA-A-gs pour la pelouse de référence en conditions actuelles ($[CO_2]_a$ = 370 ppm) sont en bon accord avec les calculs de EToFAO56 (Fig. 1A). La simulation de l'évapotranspiration de la pelouse de référence montre une diminution de l'évapotranspiration avec l'augmentation de $[CO_2]_a$ jusqu'à 20% pour 900 ppm (Fig.1C). La diminution est de 8% à 550 ppm (Fig.1B). La baisse de ETo est quasiment linéaire avec cependant une légère atténuation avec l'augmentation de $[CO_2]_a$. Au niveau journalier, la baisse d'ETo dépend également du niveau d'évapotranspiration, les ETo les plus fortes étant les plus affectées. Les simulations d'évapotranspiration par ISBA-A-gs à différents niveaux de $[CO_2]_a$ ont servi de base à l'établissement de formules permettant de corriger le calcul de EToFAO56 de l'effet antitranspirant du $CO_2$. Dans le cadre de CLIMATOR une formule linéaire simple, fonction de $[CO_2]_a$ (en ppm), a été utilisée : $ETo_{[CO2]a} = (1{,}1403 - 3{,}8979.10^{-4} * [CO_2]_a) * EToFAO56$

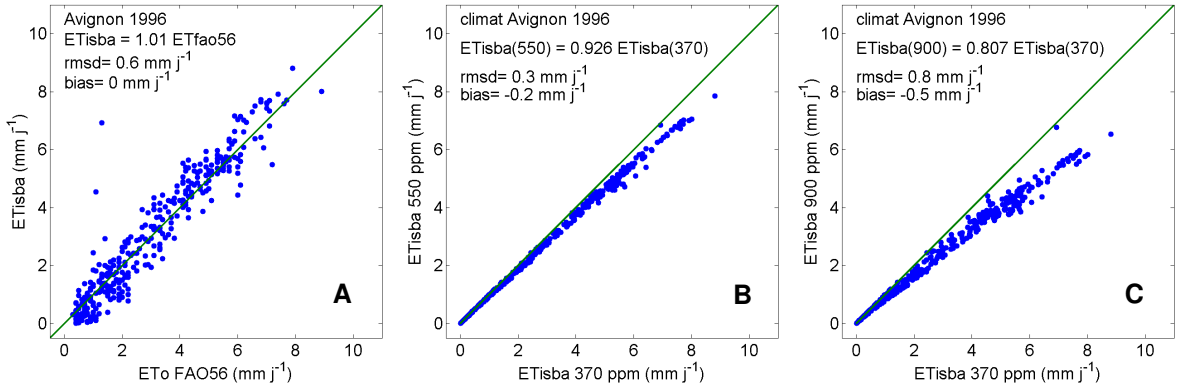



*Figure 1. Comparaison des simulations de ETo en condition actuelle ($[CO_2]_a$ = 370 ppm) avec ISBA-A-gs par rapport à **(A)** EToFAO56, **(B)** ET simulée avec ISBA-A-gs pour $[CO_2]_a$ = 550 ppm et **(C)** 900 ppm.*

Par rapport aux simulations d'ISBA-A-gs, l'erreur quadratique est de 0,127 mm/j. Il est possible de développer une formule plus complexe tenant compte des différentes non linéarités et améliorant le calcul de ETo à l'échelle journalière (mais pas réellement à l'échelle annuelle).

## Analyse des variations de ETo en conditions de changement climatique

Les calculs de EToFAO56 ont été réalisés pour les scénarios SRES B1 ($[CO_2]_a$ = 540 ppm en 2100), A1B (703 ppm) et A2 (836 ppm) à partir de la méthode dynamique Quantile-Quantile (QQ) de régionalisation du CNRM (cf. Terray et al. 2010). Les résultats, présentés pour deux climats contrastés, Avignon et Mons (Fig.2), montrent une augmentation très nette de EToFAO56 à partir de 2020 (Fig. 2). Les augmentations atteignent 50 à 100 mm $an^{-1}$ pour le 'futur proche' (FP : 2020-2049) et 125 à 250 mm $an^{-1}$ pour le 'futur lointain' (FL : 2070-2099) en fonction des scénarios de des climats (Fig.4). Les scénarios les plus pessimistes conduisent en général aux plus fortes augmentations (sauf pour le scénario A2 en FP à Avignon). Les augmentations résultent à la fois d'augmentations de l'insolation et du déficit de saturation de l'air (non montré ici).

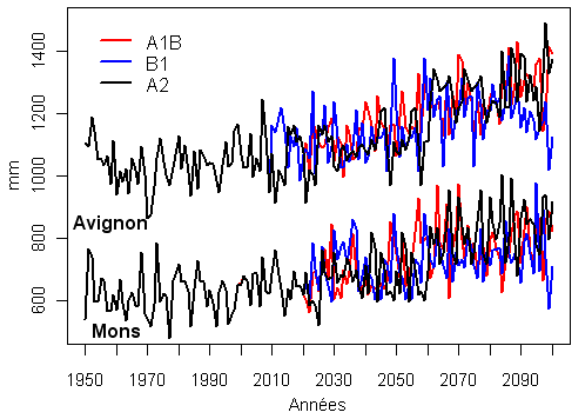



*Figure 2. Evolution de EToFAO56 selon les scenarios SRES (régionalisation QQ).*

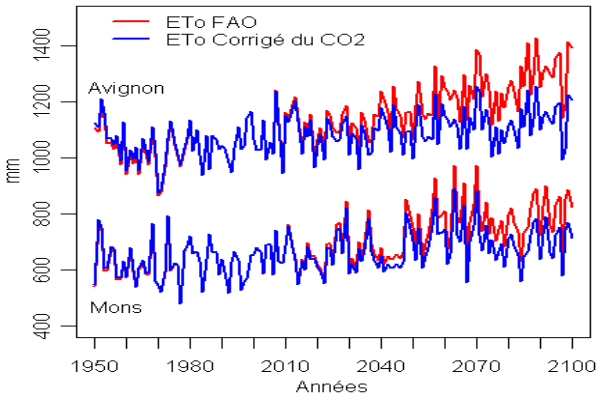
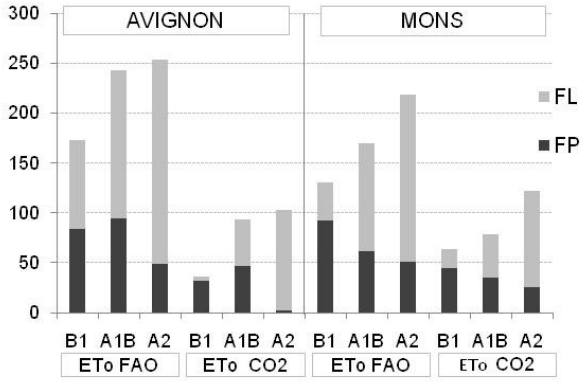



*Figure 3. Effet de la prise en compte du $CO_2$ sur ETo (scénario A1B, régionalisation QQ)*




La prise en compte du $CO_2$ modifie l'évolution de ETo (Fig.2 et 4), les augmentations ne se situant plus que sous 50 mm $an^{-1}$ en FP et entre 30 et 120 mm $an^{-1}$ en FL. Au contraire du cas précédent, les scénarios les plus pessimistes conduisent aux augmentations les plus faibles, les plus fortes concentrations en $CO_2$ résultant en des corrections plus importantes.

*Figure 4. Anomalies (en mm $an^{-1}$) de EToFAO56 et de ETo corrigée de l'effet du $CO_2$ (périodes FP et FL par rapport au 'passé récent' 1970-1999, régionalisation QQ) .*

## Références bibliographiques


Allen R.G., L.S. Pereira, D. Raes, M. Smith, 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. *Irrigation and Drainage Paper 56*, United Nations Food and Agriculture Organization, Rome, Italy. 300 p.

Bunce JA, 2004. Carbon dioxide effects on stomatal responses to the environment and water use by crops under field conditions. *Oecologia* 140 (1): 1-10.

Calvet, J.-C., Noilhan, J., Roujean, J.-L., Bessemoulin, P., Cabelguenne, M., Olioso, A., et Wigneron, J.-P., 1998. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92, 73-95.

Jacobs C.M.J., 1994. *Direct impact of atmospheric $CO_2$ enrichment on regional transpiration*. PhD-thesis, Wageningen University, 179 p.

Terray L., Pagé C., Déqué M., Flécher C., 2010. L'évolution du climat en France basée sur les projections climatiques utilisées dans CLIMATOR au travers de quelques indicateurs agroclimatiques. *Livre Vert du Projet Climator*, édité par l'ADEME.

# Utilisation d'indicateurs phénoclimatiques simples pour évaluer des pistes d'adaptation de la culture du blé aux stress thermiques lors du remplissage dans le contexte du changement climatique

**D. Gouache[1*], P. Gate[2]**
[1] ARVALIS – Institut du végétal, Guyancourt, France
[2] ARVALIS – Institut du végétal, Paris, France
*Auteur correspondant : d.gouache@arvalisinstitutduvegetal.fr

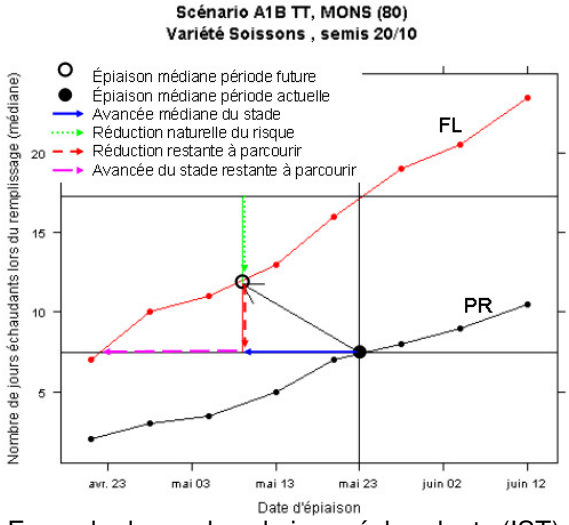
## Introduction

Plusieurs auteurs ont récemment relier la stagnation des rendements des principales cultures alimentaires mondiales dans plusieurs grands bassins de production à l'augmentation des conditions de température excessives (Lobell et Field 2007, Peng et al. 2004). C'est également ce qui a été proposé en France par Gate et al. (2010) : une partie de cette stagnation s'expliquerait par l'augmentation des températures excessives pendant le remplissage des grains du blé.

## Méthodologie employée

Les travaux se sont basés sur un modèle phénologique, PANORAMIX, permettant de simuler notamment les dates d'épiaison (Gate, 1995), ainsi que sur le calcul d'un indicateur simple qui permet de quantifier de manière robuste les impacts des excès thermique lors du remplissage, tant au niveau d'expérimentations au champ que des rendements régionaux (Gate et al. 2010) – le nombre de jours avec des températures maximales dépassant 25 °C entre l'épiaison et l'épiaison + 800 °C-jours.

Dans un premier temps, nous avons simulé, pour 4 séries climatiques (A1B_Anomalies, A1B_TT, A1B_QQ, A2_QQ) et 3 périodes (PR, FP, FL) les dates d'épiaison. Nous avons ensuite simulé pour des séries de 8 dates d'épiaison fictives l'indicateur de stress thermique (IST) décrit ci-dessus. Les dates d'épiaison médianes en PR et dans le futur ont ainsi pu être projetées sur les relations médianes entre date d'épiaison et IST (cf. ci-contre), permettant de chiffrer l'augmentation d'IST, la part compensée par l'avancée des stades et la part restant à éviter pour revenir au niveau de risque actuel. Cette méthode a été déployée pour les 4 séries climatiques, les 2 périodes futures et les 12 sites métropolitains du projet : la simulation de référence, pour la période PR, était celle d'une variété Soissons semée au 20/10. Des stratégies d'adaptation, résumées dans le tableau ci-dessous, ont ainsi été testées.




Exemple de nombre de jours échaudants (IST) en fonction de la date d'épiaison et de projection des dates d'épiaison médianes simulées pour 2 périodes

| Stratégie | Simulations utilisées pour la période future | Variable recalculée |
|---|---|---|
| Pas d'adaptation (Ref) | Référence = Soissons semée au 20/10 | |
| Esquive par la date de semis (S) | Soissons semée au 20/09, 10/10, 20/10, 10/11 | Dates d'épiaison médianes |
| Esquive par la précocité (P) | Semis du 20/10, variétés Charger (tardive), Soissons, Esterel (orge = très précoce) | Dates d'épiaison médianes |
| Tolérance à l'échaudage (T) | Référence = Soissons semée au 20/10 | IST en considérant des seuils à 24 °C, 25 °C, 26 °C, 28 °C, 30 °C |

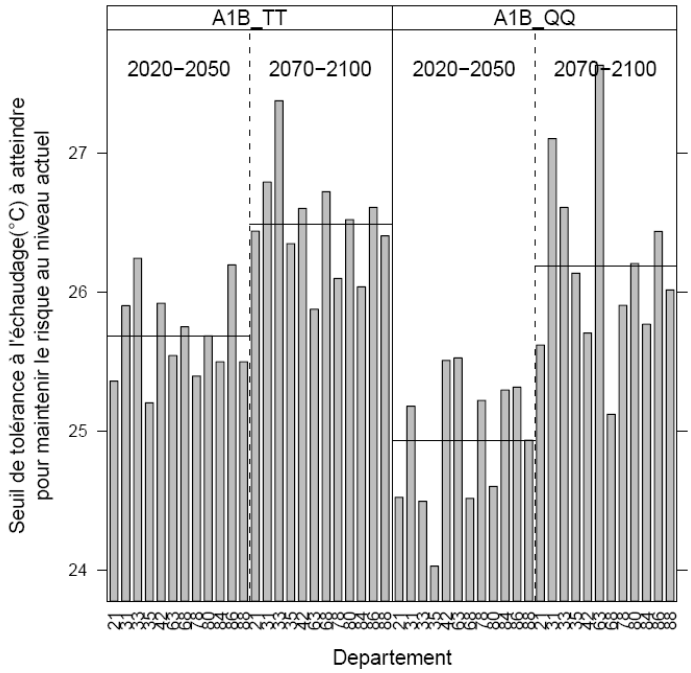
## Chiffrage de l'esquive naturelle et restant à réaliser par adaptation

Les résultats issus de la stratégie Ref permettent de chiffrer les enjeux liés à l'augmentation du risque de températures excessives. Les résultats mettent en évidence un effet de la méthode de régionalisation pour la période FP : avec la méthode QQ, l'esquive naturelle, permise par l'avancée des stades, apparaît suffisante. 5 sites sur 12 ne voient pas l'IST augmenter, et pour les autres celui-ci augmente de 0 à 2 jours. Par contre, pour les autres méthodes de régionalisation, aucun site n'évite complètement l'accroissement de l'IST, qui augmente de 1 à 4 jours. En période lointaine (FL), quelque soit la méthode de régionalisation, l'augmentation de l'échaudage n'est pas compensée par

l'avancée des stades : il reste en moyenne 5 jours échaudants à éviter pour revenir au niveau de risque actuel.
Le calcul des dates d'épiaison médianes à atteindre afin d'annuler l'augmentation du de l'IST montrent que pour chaque jour d'échaudage restant à éviter, il faut une avancée de la date d'épiaison de 3 à 4 jours (sauf pour A2_QQ en FL : plus de 6.5 jours). Cela est cohérent avec le fait qu'un jour d'anticipation naturelle de l'épiaison permet en moyenne d'éviter 0.3 jours échaudants. La traduction de l'augmentation du risque d'échaudage en anticipation supplémentaire des dates d'épiaison est donc extrêmement forte, de l'ordre de 3 semaines supplémentaires en FL, à cumuler aux 2 semaines d'anticipation naturelle dues à la réponse des stades au réchauffement.

## Evaluation de l'efficacité des stratégies d'adaptation

La réduction du risque par le biais des adaptations d'esquive est apparue très limitée dans notre étude. L'avancée d'un mois de la date de semis, du 20/10 au 20/09, ne permet de réduire le nombre de jours échaudants que de 0 à 2 jours : elle ne permet en aucun cas de revenir aux niveaux d'IST actuels, sauf sur le site de Colmar pour la série A1B_QQ. De même, l'esquive par précocification des variétés – approchée ici par la simulation des dates d'épiaison d'une orge d'hiver – apparaît très limitée. En effet, cette stratégie ne permet une réduction du nombre de jours échaudants que de l'ordre de 1 jour. Par contre, le choix d'une variété tardive, type Charger, devient particulièrement néfaste : 3 à 5 jours supplémentaires d'échaudage sont subis dans ce cas.




En simulant une amélioration de la tolérance génétique à l'échaudage via un relèvement du seuil de température utilisé pour le calcul de l'IST, on observe qu'un gain de tolérance de 2°C, combiné à l'anticipation naturelle de stades, permet systématiquement de revenir aux niveaux actuels d'IST. En moyenne sur tous les sites, des gains de tolérance inférieurs à 1°C suffisent à annuler l'augmentation de l'IST en FP. En FL, une tolérance moyenne à 26.5 °C au lieu de 25°C permet de se maintenir au niveau actuel d'IST (voir figure ci-dessus).

## Conclusions

Notre étude fournit un cadre d'analyse simple pour l'évaluation d'adaptations au changement climatique des cultures annuelles en intégrant l'adaptation phénologique naturelle de ces cultures sous effet du changement climatique. Cette méthodologie pourrait être étendue à d'autres types de stress, notamment hydriques, et à d'autres formalismes, plus réalistes, pour le stress thermique.
Le cas étudié ici, les stress thermiques lors du remplissage, montre que l'évolution de ce stress sera forte pour le futur lointain, et plus incertaine pour le futur proche. Les stratégies d'adaptation testées donnent des résultats très différents : l'esquive apparaît d'une efficacité limitée, alors que la tolérance aux températures élevée semble très efficace. Toutefois, la précocité variétale restera un enjeu fort car les précocités inadaptées seront particulièrement pénalisées. Les efforts de recherche et de sélection sur l'échaudage thermique seront donc à prioriser rapidement pour faire face à l'évolution climatique à venir.

## Références bibliographiques

Gate P, 1995. L'écophysiologie du blé. Eds ITCF/Tec&Doc Lavoisier.
Gate P, Brisson N, Gouache D. 2010. Les causes du plafonnement du rendement du blé en France : d'abord une origine climatique. Académie de l'Agriculture de France.
Lobell D. B, Field C. B, (2007) – Global scale climate-crop yield relationships and the impacts of recent warming. Environmental Research Letters 2 (March 2007) 014002
Peng S., Huang J., Sheehy J., Laza R., Visperas M., Zhong X., Ceneto G., et al., (2004) – Rice yields decline with higher temperature from global warming. Agricultural Sciences, PNAS, vol. 101, no. 27, 0071-9975.

## Quelle agriculture dans CLIMATOR ?

**F. Huard**
INRA, Agroclim, Avignon,France
*Auteur correspondant : huard@avignon.inra.fr

### Introduction

CLIMATOR analyse l'impact du changement climatique sur la vulnérabilité de systèmes de culture variés en utilisant des modèles éprouvés. La démarche retenue repose sur un nombre limité de sites représentatifs des principaux agro-pédo-climats de la France, l'agriculture y étant appréhendée au sens large, à travers différentes formes de gestion et d'occupation du sol (grandes cultures, viticulture, prairie, forêt…). Un nombre limité de systèmes agricoles a dû être retenu pour fixer un cadre de modélisation. Les couverts pérennes sont représentés par les cultures fourragères, la vigne et la forêt dans des contextes techniques simplifiés. Pour les grandes cultures, en parallèle de rotations quadriennales, des pratiques agricoles théoriques en monoculture ont été simulées afin d'obtenir des résultats plus facilement interprétables.
Un panel restreint de sols et de génotypes a été retenu. Pour fixer les caractéristiques des systèmes techniques, les options les plus couramment pratiquées actuellement ont été retenues, en balayant une gamme de pratiques allant du conventionnel (objectif de rendement) au biologique.

### Les sites

La démarche est multilocale, à travers 12 sites métropolitains et un site de Guadeloupe (Fig. 1), permettant d'appréhender les grands types de climat français : tropical (Guadeloupe), océanique (Rennes, Lusignan et Bordeaux), méditerranéen (Avignon et Toulouse), continental (Mirecourt, Colmar et Dijon). Les effets de l'altitude sont analysés à travers deux sites proches : Saint-Etienne (400m) et Clermont-Theix (890m).

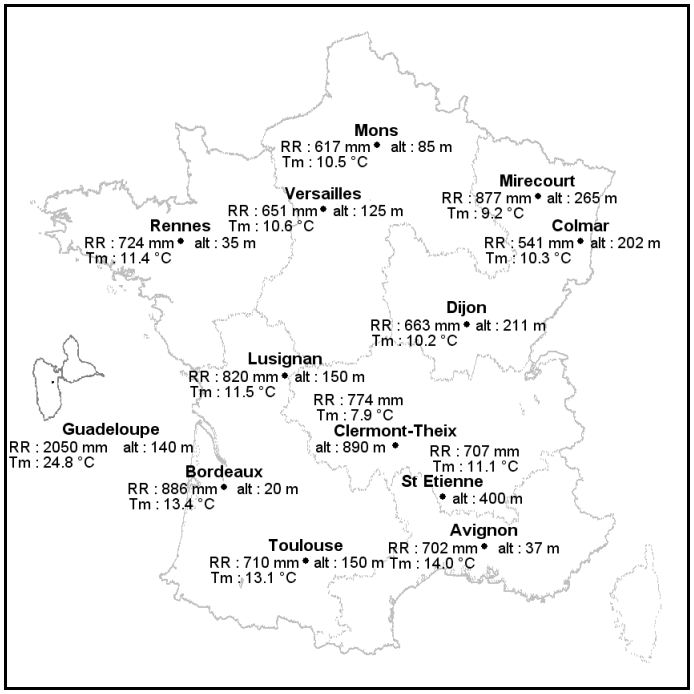



*Figure 1 : localisation des sites (alt=altitude, RR=pluie annuelle, Tm=température moyenne annuelle)*

### Les systèmes de culture

Cinq types d'occup ation du sol ont été retenus à partir desquels des systèmes agricoles sont modélisés à travers plusieurs niveaux d'intensification (Tab. 1). Certains systèmes ne représentent que des cas d'école (par exemple la monoculture de tournesol) mais permettent de comparer directement les sorties de différents modèles. Les choix techniques des dates de labour et de semis, la densité de plantation, l'irrigation et la fertilisation ont été déterminés au départ pour chacun des

systèmes. Pour simuler les jours disponibles, quelques caractéristiques des exploitations agricoles (taille, main d'œuvre, équipement,….) ont été également fixées au préalable.

| | |
|---|---|
| **Systèmes intensifs** | **MI** : Maïs irrigué<br>**BA** : Bananier<br>**MIT** : Mais tropical<br>**BB** : Blé-Blé<br>**MBCB** : Maïs-Blé tendre-Colza-Blé dur irrigué<br>**VI** : Vignes denses, irrigués et fertilisées<br>**GI** : Prairie de graminée irriguée fauchée sur 5 ans<br>**FCC** : Forêt de pins à rotation courte (28 ans) orienté biomasse |
| **Systèmes à intrants limités** | **BIO** : Blé tendre-Pois-Graminée fourragère (Fétuque ou Ray gras)<br>**TBSB** : Tournesol-Blé tendre-Sorgho-Blé dur<br>**TT** : Tournesol-Tournesol<br>**C** : Canne à sucre en pluvial<br>**G** : Prairie de graminée fauchée sur 5 ans<br>**FCL** : Forêt de pins à rotation longue (100 ans) orientée bois d'oeuvre<br>**FCM** : Forêt de feuillus ou de conifère à rotation moyenne (50 ans)<br>**V** : Vignes en pluvial |

*Tableau 1 : les systèmes de culture dans le projet CLIMATOR*

## Le choix des cultivars

Pour la plupart des cultures, l'essentiel de la spécificité variétale se situe au niveau de la précocité. Pour cette raison, pour le maïs, le blé, le sorgho, le tournesol, le colza et la vigne, deux ou trois variétés sont utilisées de façon à tester l'effet de la longueur de cycle et de la précocité et ainsi s'adapter à la modification prévisible des durées de cycle. Pour les cultures fourragères, la spécificité se situe d'avantage au niveau des capacités de la plante à la sécheresse, par la morphologie de leurs systèmes foliaire et racinaire ainsi que leur fonctionnement physiologique. Pour les autres espèces, la spécificité variétale n'est pas discriminante d'un comportement différentiel face au changement climatique et une seule variété standard a été considérée.

## Les sols

L'objectif étant de combiner les résultats par type de culture et site, la démarche est basée sur 3 types de sols :

- un sol commun pour tous les sites et cultures (sol brun peu lessivé de 140 cm de profondeur et 226 mm de RU) ;
- deux sols à niveau de RU et profondeur contrastés représentatifs de chaque type de système agricole mais communs aux sites, sélectionnés à partir d'une analyse statistique de la BD des Sols de l'INRA-Infosol, en appliquant un masque en fonction de l'occupation des surfaces. Pour chaque type d'occupation, sont ressortis plusieurs sols dont deux ont été sélectionnés au regard de leur importance statistique à l'échelle nationale, pédologique et de leurs caractères contrastés ;
- le sol de Guadeloupe est un sol ferrallitique.

## L'adaptation

L'adaptation au changement climatique existe au travers des hypothèses de travail retenues :

- en modélisant les cultures sur tous les sites et en évaluant dans quelles conditions le changement climatique en autorisera de nouvelles (ou à l'inverse en interdira les actuelles) ;
- en utilisant des variétés de durée du cycle variable, permettant l'esquive de périodes climatiques sensibles
- à travers les différents sols utlisés ;
- en testant différentes dates de semis ou ponctuellement en les optimisant ;
- en apportant de l'irrigation pour la satisfaire les besoins en eau et de la fertilisation azotée à stades (et non à dates) fixes…

# Le WEB-CLIMATOR : système d'information de gestion des sorties de simulation du projet

**D. Delannoy*, D. Ripoche, F. Huard**
INRA, Agroclim, Avignon,France
*Auteur correspondant : ddelannoy@avignon.inra.fr

## Introduction

L'objectif du système d'information CLIMATOR est de i) stocker les résultats de simulation d'une façon suffisamment souple pour qu'ils soient aisément consultables et réutilisables et ii) d'en proposer des extractions appropriées à l'approche multi-sites, multi-systèmes et multi-modèles du projet. Cela a requis une homogénéisation des variables de sorties des modèles et en amont, une mise en adéquation des variables et paramètres d'entrée.

## La Base de Données

L'élément de base stocké est la simulation et correspond à 150 ans d'un ensemble de variables de sorties au pas de temps journalier. Une simulation correspond à la combinaison suivante :
1 modèle x 1 site x 1 série climatique de 150 ans x 1 sol x 1 système x 1 variété (ou succession variétales dans le cas d'un système en rotation). Un ensemble, relativement exhaustif de variables de sorties a été défini. Il comprend 108 variables journalières caractérisant la production, le fonctionnement du sol, de la plante, la micrométéorologie, la pathologie, les animaux (pour les prairies pâturées) ou encore les jours disponibles pour les travaux agricoles. Un complément de 68 variables annuelles correspond aux dates qui jalonnent les parcours phénologique et technique (cf. Fig. 1).

Trois bases de temps ont été retenues : le jour, l'année et la période. La base journalière est dédiée aux données brutes, la base annuelle est consacrée aux données brutes calendaires et aux données calculées à partir des données journalières et enfin la période est dédiée à des calculs de synthèse par horizon temporel (les trois horizons de CLIMATOR sont : le passé récent (1970-2000), le futur proche (2020-2050) et le futur lointain (2070-2100)). Seul le modèle de niche EVOLFOR fait exception à ce schéma car il produit directement des résultats par période qui ne passent pas par un calcul du S.I (cf. Fig. 1).

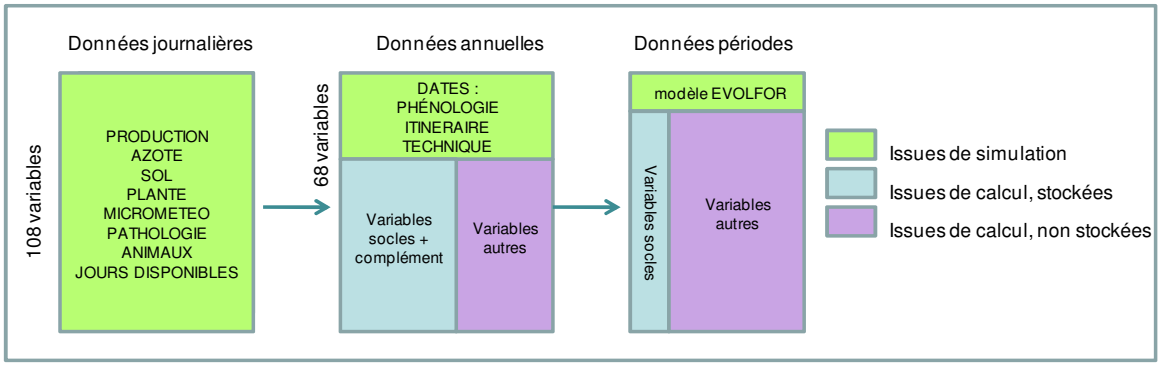



***Figure 1** : Les variables stockées dans la base ou calculées par requête*

La base (POSTGRESQL) contient 22 modèles (codes et options comme par exemple avec et sans prise en compte du $CO_2$), 13 sites, 11 séries climatiques (qui diffèrent par le scénario SRES, le modèle climatique global ou la méthode de régionalisation), 3 sols et de l'ordre de 40 systèmes et 200 variétés ou combinaisons variétales. Les différences en termes de pratiques et de tête de rotation sont incluses dans les systèmes ou les variétés, expliquant le nombre élevé des modalités de ces dernières tables. Evidemment tous les croisements ne sont pas renseignés mais la base est tout de même très importante (1 teraoctet). Les variables d'entrée climatiques seront également stockées dans la base, de même que des métadonnées sur les paramètres d'entrées (sol, variété en particulier).

## Fonctionnement du système d'information

### *Pendant le projet : intégration*

Pendant le projet, les données ont été progressivement intégrées dans la base selon une procédure résumée sur la Fig. 2. A cet effet un format de fichier de sortie a été fourni à l'ensemble des modélisateurs (ASCII CSV) qui est renseigné par un métafichier précisant la simulation en termes de modèle, site, série climatique…. A l'intégration un contrôle est effectué par le S.I. de cohérence de chacune des variables, qui doivent être contenues dans un intervalle prédéfini. Ce contrôle alourdit considérablement les temps d'intégration mais assure au S.I. une grande fiabilité. Il a permis de mettre en évidence certaines erreurs de calculs.

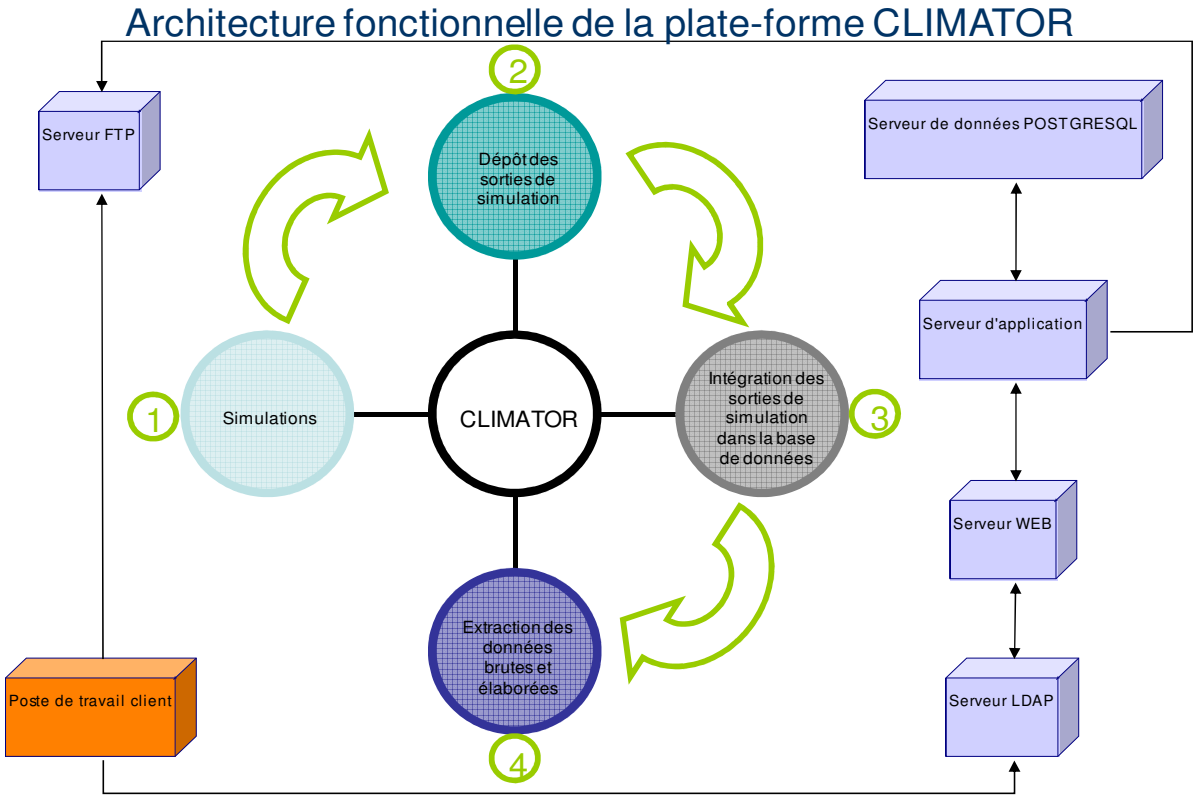



***Figure 2 :*** *Architecture fonctionnelle de la plateforme WebClimator*

### *Pendant et après le projet : extraction*

Les données extraites de la base seront soit prédéfinies (mode calcul), soit laissées au libre choix de l'utilisateur (mode expert). Le mode « calcul » concerne des variables d'intérêt agri-environnementales, définies dans la cadre du projet comme particulièrement intéressantes pour révéler l'impact du changement climatique sur les agro-écosystèmes : ce sont les variables dites « socles » et quelques autres utilisées dans le livre vert. Ces variables sont stockées dans la base (Fig. 1). Le mode « expert » concerne toutes les autres variables (ou les mêmes synthétisées différemment) calculées à partir des données journalières de base. Les calculs mathématiques sont simples (cumuls, moyennes, écartypes) et peuvent se faire sur des périodes définies par des stades de développement ou des dates calendaires. Ces données ne sont pas stockées dans la base mais délivrées à l'utilisateur uniquement. Pour ces deux modes de requêtes, la combinatoire modèle x site x série climatique x système x sol x variété est laissée libre mais ne pourra excéder une limite en termes de volumes de données.

La structure informatique du WEB CLIMATOR est une structure client serveur, adossée à la base de donnée POSTGRESQL et utilisant un serveur d'application. La connexion au WEB CLIMATOR (uniquement pour les partenaires du projet) se fera par identifiant LDAP. L'accès à cet ensemble de données devra passer par l'un des partenaires du projet.