Nadine Brisson et Frédéric Levrault

LIVRE VERT

DU PROJET

CLIMAGOR

Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces

2007-2010

ANR INRA

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Changement climatique, agriculture et forêt en France :
simulations d'impacts sur les principales espèces

Livre Vert du projet CLIMATOR

2007-2010

coordonné par

Nadine Brisson et Frédéric Levrault

Adresse des coordinateurs :

Nadine Brisson
AGROCLIM
INRA
AGROPARC Domaine St Paul
84914 AVIGNON cedex 9

Frédéric Levrault
Chambre Régionale d'Agriculture de Poitou-Charentes
AGROPÔLE
BP 50002
86550 MIGNALOUX-BEAUVOIR

Adresse de l'éditeur :

ADEME
20, avenue du Grésillé
BP 90406
49004 ANGERS cedex 01
www.ademe.fr

Référence de l'ouvrage :

Nadine Brisson, Frédéric Levrault, ÉDITEURS. 2010. *Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces. Le Livre Vert du projet CLIMATOR* (2007-2010). ADEME. 336 p.

Conception et mise en page :

opixido

Crédits photographiques :

INRA : p. 58 : Jean-Marie BOSSENNEC ; p. 123 : Marc FOUCHARD ; p. 143 : Jean WEBER ; p. 146 : Christian SLAGMULDER ; p. 166 : Florence CARRERAS ; p. 182 : Christophe MAITRE - fotolia.com : pp. 36, 48, 61, 74, 125, 128, 157, 193, 199, 215, 222, 252, 294, 302 - 123rtf : pp. 25, 39, 57, 68, 72, 77, 83, 88, 91, 103, 106, 132, 135, 136, 148, 179, 188, 203, 207, 226, 231, 240, 242, 252, 261, 266, 274, 281, 285, 300, 307, 309.

Toute représentation ou reproduction intégrale ou partielle faite sans le consentement de l'auteur ou de ses ayants droits ou ayants cause est illicite selon le Code de la propriété intellectuelle (Art L 122-4) et constitue une contrefaçon réprimée par le Code pénal. Seules sont autorisées (Art L 122-5) les copies ou reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, ainsi que les analyses et courtes citations justifiées par le caractère critique, pédagogique ou d'information de l'oeuvre à laquelle elles sont incorporées, sous réserve, toutefois, du respect des dispositions des articles L 122-10 à L 122-12 du même Code, relative à la reproduction par reprographie.

© ADEME Éditions, juin 2010.

ISBN 978-2-35838-128-4

Préface

Michel Vauclin

Il est remarquable qu'un collectif multidisciplinaire, composé de chercheurs, d'enseignants-chercheurs et d'ingénieurs agronomes et forestiers, se mobilise ainsi autour d'un projet à vocation finalisée. Et je voudrais, au nom de l'ANR, exprimer notre satisfaction d'avoir financé le projet CLIMATOR qui est parvenu, avec ce Livre Vert, à faire le lien entre des méthodes et des outils de recherche et de véritables questions d'intérêt agricole, forestier et environnemental. Le relais financier de l'ADEME pour publier cet ouvrage montre également l'intérêt suscité par les travaux de ce consortium qui fédère les compétences de plus de vingt équipes de recherche et d'institutions diversifiées, mais très complémentaires.

Baignant moi-même dans le monde de la recherche depuis de longues années, je sais quels efforts a demandés la rédaction d'un ouvrage à vocation appliquée, perceptibles dans l'organisation « à la carte » du document, la concision et la pédagogie des fiches (avec les encarts sur « ce qu'il faut retenir »), la clarté des illustrations (même si pour certaines, il faut rester quelques minutes, absorbés à les analyser car riches d'information), la mise à disposition d'un glossaire, la rédaction de fiches synthétiques (*Atouts et vulnérabilités* par exemple)… La prise en compte des divers « points de vue » est à souligner, qui permet au thématicien, au spécialiste de la filière, au responsable régional et aux apprenants de trouver dans le Livre Vert une manne d'informations. Sans avoir aucune prétention à l'exhaustivité, il me semble que peu de questions soulevées par l'impact du changement climatique sur l'agriculture et la forêt ont été oubliées par les auteurs.

Évidemment des partis pris ont été adoptés, comme celui de n'étudier qu'un nombre limité de sites, mais néanmoins suffisamment nombreux et surtout variés pour que la diversité des facettes locales des problèmes soit appréhendée. Toutes les productions agricoles n'ont pas été abordées telles que par exemple l'arboriculture fruitière. Cependant les productions qui soulèvent le plus de questions sont bien présentes dans le Livre Vert : maïs irrigué, blé, vigne, prairie, et la mise en évidence de la spécificité de chacune d'elles montre qu'il est tout simplement impossible de prétendre à un discours homogène sur l'agriculture et la forêt en général. Un autre parti pris a été de tester des systèmes extrêmes comme le maïs irrigué d'un côté et une rotation pluviale à base de tournesol, blé et sorgho avec, de surcroît, des variétés à précocités extrêmes, d'un autre. Mais n'est-ce pas le rôle d'une étude prospective, comme celle-ci, de pointer du doigt d'éventuels problèmes qui sont bien extériorisés par ces systèmes extrêmes ?

Car nous sommes bien dans le cadre d'une étude prospective, sous hypothèse climatique, et je salue les efforts conceptuels réalisés pour se doter de relations simplifiées entre variables d'intérêt agricole et environnemental et les déterminants climatiques des scénarios (ΔT et Δ pluies en particulier) comme dans les fiches EAU, TIMING, VIGNE ou FORÊT). Ces relations pourront permettre rapidement d'envisager les impacts d'autres scénarios climatiques, en particulier ceux que le GIEC produit tous les cinq ans.

Bien évidemment, nous sommes dans un monde virtuel, dessiné par des modèles et il nous faut rester très prudents au regard des résultats qui ne tiennent pas forcément compte des mécanismes adaptatifs. Cependant, je tiens à mettre en exergue l'effort, au demeurant très lourd au niveau des traitements de données, d'accompagner l'étude d'analyses systématiques des incertitudes, ce qui est encore suffisamment rare pour mériter d'être mentionné. On voit bien pourtant qu'elles jouent un rôle très important en raison des formalismes inclus dans nos modèles d'écosystèmes qui sont extrêmement variables.

En lisant le Livre Vert, on est frappé de voir quelques résultats spectaculaires (restriction de l'alimentation en eau des nappes, anticipation des stades phénologiques, augmentation des besoins en irrigation du maïs, baisse de la qualité du vin), mais aussi bon nombre de « non-effets » du changement climatique résultant parfois de rôles antagonistes (CO_2 et stress hydrique, par exemple). On voit aussi que les agriculteurs disposent de quelques leviers efficaces pour limiter les effets négatifs du changement (dates de semis, choix des variétés et, dans une moindre mesure, celui des sols).

Outre le pont, établi entre la recherche et la profession, que constitue le Livre Vert, c'est aussi un référentiel sur l'impact du changement climatique sur notre agriculture (sans oublier les tropiques !) et notre forêt qui, même avec l'ensemble des partis pris évoqués, fournit un corpus de résultats novateurs obtenus de façon cohérente… Et c'est une grande première dans ce domaine.

Merci Nadine et Frédéric pour avoir réalisé la coordination de ce bel ouvrage qui fera date !

Michel Vauclin
Coordinateur scientifique du programme
« Vulnérabilité, Milieux, Climat et Sociétés » de l'ANR

Le mot de l'ADEME

Jean-Louis BAL

La forêt et l'agriculture produisent des biens et des services multiples indispensables à nos sociétés. Même s'il existe encore de grandes incertitudes sur l'ampleur du changement climatique et ses impacts, on sait que les activités agricoles et forestières sont déjà et seront de plus en plus touchées par l'évolution du climat. Il est indispensable d'anticiper pour préparer l'agriculture et les écosystèmes forestiers et minimiser le plus possible les impacts néfastes.

Or, la recherche de solutions d'adaptation demande du temps. Elle concerne des disciplines très variées comme la génétique, l'agronomie, l'économie, la sociologie, et doit mobiliser tous les acteurs : agriculteurs, forestiers, conseillers, enseignants, chercheurs, politiques, grand public et consommateurs… Il est donc nécessaire de mettre en œuvre dès à présent des groupes de réflexion, des programmes de recherche, des observatoires, des lieux d'information et de sensibilisation à ces nouveaux enjeux.

Dans le cadre de ses nouvelles missions sur le changement climatique, l'ADEME souhaite s'investir en particulier pour aider à la valorisation des connaissances dans ce domaine. Le financement par l'Agence de l'édition du Livre Vert CLIMATOR s'inscrit dans cet objectif. Initié par l'ANR, mobilisant différents organismes, le projet CLIMATOR est ainsi dignement valorisé *via* l'élaboration de ce Livre Vert d'une qualité remarquable et incontournable pour le transfert des connaissances vers les acteurs du monde agricole et forestier.

Jean-Louis BAL
Directeur Productions et Énergies Durables de l'ADEME

Sommaire

Préface 3

Le mot de l'ADEME 5

Le projet CLIMATOR 9

A | *La méthodologie* 17

A | 1 Climat
L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques 19

A | 2 Agriculture
Quelle agriculture dans Climator ? 33

A | 3 Modèles
Description des modèles agronomiques et forestiers et mise en œuvre 41

A | 4 Incertitudes et variabilités
Analyse des sources d'incertitudes et de variabilités 51

B | *Les thèmes* 63

B | 1 Timing
Anticipation des stades phénologiques et raccourcissement des phases 65

B | 2 Eau
Confort hydrique et restitution d'eau aux nappes 79

B | 3 Irrigation
Évolution des besoins en irrigation des cultures 93

B | 4 Matière organique
Stockage/déstockage de carbone dans les sols 105

B | 5 Santé
Évolution de quelques pathosystèmes sur le blé et la vigne 113

B | 6 Rendement
Complexité des évolutions du rendement des cultures 127

C | *Les cultures* 139

C | 1 Atouts et vulnérabilités
Atouts et vulnérabilités des productions agricoles face au changement climatique 141

C | 2 Blé
Changement climatique et culture du blé : l'essentiel des impacts 155

C | 3 Maïs sorgho
Changement climatique et cultures de maïs et de sorgho grains : l'essentiel des impacts 169

C | 4 **Prairie**
Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts 181

C | 5 **Colza**
Changement climatique et culture du colza : l'essentiel des impacts 191

C | 6 **Tournesol**
Éléments sur le changement climatique et la culture du tournesol 201

C | 7 **Vigne**
Changement climatique et culture de la vigne : l'essentiel des impacts 213

C | 8 **Forêt**
Éléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine 225

C | 9 **Agriculture biologique**
Analyse d'un exemple d'agriculture biologique en grandes cultures 237

D | *Les régions* 245

D | 1 **Géoclimat**
Potentiel de déplacement géographique des cultures et des essences forestières 247

D | 2 **Centre-Nord**
Changement climatique en zone Centre-Nord : aperçu des impacts agricoles 255

D | 3 **Ouest**
Changement climatique en zone Ouest : aperçu des impacts agricoles et forestiers 263

D | 4 **Nord-Est**
Changement climatique en zone Nord-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers 271

D | 5 **Centre-Est**
Changement climatique en zone Centre-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers 279

D | 6 **Sud-Ouest**
Changement climatique en zone Sud-Ouest : aperçu des impacts agricoles et forestiers 287

D | 7 **Sud-Est**
Changement climatique en zone Sud-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers 297

D | 8 **Antilles**
Changement climatique en zone Antilles : aperçu des impacts agricoles 305

E | *Annexes* 311

E | 1 **Glossaire** 313

E | 2 **Les femmes et les hommes de CLIMATOR** 325

Le projet CLIMATOR

Nadine Brisson

A Cadre du projet

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), pour un montant de 620 601 €.

L'ANR, établissement public à caractère administratif créé en 2007, est une agence de financement de projets de recherche. Elle s'adresse à la fois aux établissements publics de recherche et aux entreprises, avec une double mission : produire de nouvelles connaissances et favoriser les interactions entre laboratoires publics et laboratoires d'entreprise en développant les partenariats. Le programme VMC vise à renforcer la production scientifique nationale, à engendrer des connaissances utiles pour l'action publique et à renforcer les capacités françaises dans les négociations internationales sur la thématique du changement global.

Pendant trois ans, dix-sept équipes de sept instituts et organismes ont travaillé ensemble sur le projet CLIMATOR (tab. 2) 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.

B Objectifs

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 treize sites* représentatifs des climats français (Avignon, Bordeaux, Clermont-Ferrand [Theix], Colmar, Dijon, Mirecourt, Mons, Lusignan, Rennes, Saint-Étienne, 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.

C 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* (FP : 2020-2049) et le futur lointain* (FL : 2070-2099), en référence à une période de passé récent* (PR : 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 SRES* (A1 B, A2, B1) ;
- cinq modèles climatiques* dont le modèle français ARPÈGE* ;
- trois méthodes de régionalisation* (quantile-quantile*, types de temps*, anomalies*) ;
- deux ou trois modèles agronomiques* par système de cultures ;
- deux ou trois variétés ou cépages par espèce cultivée ;
- trois types de sol (variant par leur réserve utile* ou RU, teneur en matière organique, profondeur, pierrosité…) ;
- des modes de conduite en termes d'irrigation ou de densité de plantation.

Sont analysées les évolutions en tendance des variables d'intérêt ainsi que les sources d'incertitude et de variabilité. 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.

D 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 la restitution en eau au milieu* ;

- 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 *stricto sensu* 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 six zones (cf. fiche AGRICULTURE) auxquelles s'ajoute la zone caraïbe représentée par la Guadeloupe. Ces six zones, qui sont des ensembles de régions administratives, sont représentées par un à trois sites : Ouest (Rennes), Centre-Nord (Versailles, Mons-en-Chaussée), Nord-Est (Colmar, Mirecourt, Dijon), Centre-Est (Saint-Étienne, Clermont-Theix), Sud-Est (Avignon), Sud-Ouest (Toulouse, Bordeaux, Lusignan). 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.

E Diffusion des résultats du projet et présentation du Livre Vert

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, organisations professionnelles agricoles [OPA], administrations, collectivités, enseignement agricole) et d'un cours en ligne destiné à l'enseignement (http://www.avignon.inra.fr/cours_en_ligne_climator/).

Pourquoi un Livre Vert ?

Trois motivations ont guidé les auteurs dans la rédaction du Livre Vert.

1 Le changement climatique est déjà perçu par de nombreux opérateurs du monde agricole. Mais l'information vers ce public reste encore fragmentaire et souvent concentrée sur des événements extrêmes (sécheresses, canicules...). Les auteurs ont donc tenu à consacrer une partie importante de leur travail à la conception puis à la rédaction d'un ouvrage spécifiquement destiné aux acteurs *largo sensu* du monde agricole.

2 Les impacts* du changement climatique sur l'agriculture sont de mieux en mieux analysés. Mais des incertitudes demeurent liées aux concepts et aux outils utilisés, ainsi qu'à la difficulté de représenter l'agriculture française dans toute sa diversité. Le Livre Vert s'emploie à expliquer ces incertitudes et à dégager ce qui semble assuré en termes d'impacts.

3 Les impacts du changement climatique sur l'agriculture sont nombreux et variés, certains négatifs, d'autres positifs. L'examen préalable et complet de ces impacts sur les systèmes cultivés actuels est le seul moyen de définir ultérieurement les adaptations agricoles les plus pertinentes.

Le Livre Vert : pour qui ?

Le Livre Vert est l'outil de diffusion des résultats du projet CLIMATOR en dehors du monde scientifique *stricto sensu*. Il est destiné à tous ceux qui, au titre de leur activité professionnelle ou associative, sont concernés par les impacts du changement climatique sur l'agriculture. Il s'adresse tout particulièrement :

- aux agriculteurs et aux élus agricoles des OPA ;
- aux techniciens et ingénieurs chargés de l'appui technique aux agriculteurs (chambres d'agriculture, instituts techniques, coopératives, associations de développement agricole…) ;
- aux ministères et aux services déconcentrés de l'état liés à l'activité agricole (ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche [MAAP], ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du Développement durable et de la Mer [MEEDM], préfectures, DRAAF, DIREN…) ;
- aux collectivités territoriales impliquées dans le développement agricole local (départements, régions) ;
- aux établissements publics chargés des questions d'eau et d'énergie (agences de l'eau, ADEME, Établissements Publics Territoriaux de Bassin [EPTB]) ;
- aux enseignants et aux élèves de l'enseignement agricole et agronomique ;
- aux responsables des associations environnementalistes.

Le Livre Vert ne doit cependant pas être considéré comme un ouvrage de vulgarisation grand public. Si la clarification des messages a bien été le souci constant des auteurs, les contenus restent néanmoins denses et destinés à des lecteurs - certes non spécialistes - mais ayant l'habitude des contenus techniques et une connaissance de base des problématiques agronomiques, agricoles et / ou climatiques.

Comment aborder le Livre Vert ?

Le Livre Vert est organisé pour une lecture « à la carte » (tab. 1), adaptée à la diversité des lecteurs et de leurs périmètres thématiques et géographiques de responsabilité. Pour cela, une organisation en quatre chapitres a été adoptée, qui peuvent être abordés de façon séparée. Chaque chapitre est composé de plusieurs « fiches » (elles-mêmes consultables de façon séparée avec des renvois appropriés aux fiches connexes), chacune faisant la synthèse des résultats du projet sur le sujet abordé. Nous recommandons néanmoins la lecture préalable des fiches méthodologiques décrivant les outils et les protocoles de simulation, compte tenu de leur utilisation systématique dans les travaux présentés.

Chapitre	Fiches	Sous-titre
La méthodologie	Climat	L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques
	Agriculture	Choix des sites et des sols, des systèmes agricoles et forestiers
	Modèles	Description des modèles agronomiques et forestiers et mise en œuvre
	Incertitudes	Analyse des sources d'incertitudes et de variabilités
Les thèmes	Timing	Anticipation des stades phénologiques et raccourcissement des phases
	Eau	Confort hydrique et restitution aux nappes
	Irrigation	Évolution des besoins en irrigation des cultures
	Matière organique	Stockage et déstockage de carbone dans le sol
	Santé	Évolution de quelques pathosystèmes sur le blé et la vigne
	Rendement	La complexité des évolutions de rendement
Les cultures	Atouts et vulnérabilités	Atouts et vulnérabilités des productions agricoles face au changement climatique
	Blé Maïs et Sorgho Prairie Colza Tournesol Vigne Forêt	L'essentiel des impacts du changement climatique par culture et/ou filière
	Agriculture biologique	Analyse d'un exemple d'agriculture biologique en grandes cultures
Les régions	Géoclimatologie	Potentiel de déplacement géographique des cultures et des essences forestières
	Centre-Nord Nord-Est Ouest Centre-Est Sud-Est Sud-Ouest Antilles	Évolution des cultures emblématiques et opportunité de nouvelles cultures à partir du ou des sites étudiés dans la zone

Tableau 1 : *organisation et contenu du Livre Vert .*

Le chapitre « **La méthodologie** » décrit les choix méthodologiques faits et en précise les motivations et les limites quant à la valeur des résultats obtenus.

Le chapitre suivant, « **Les thèmes** », aborde différents thèmes agricoles transversaux impactés par le changement climatique. La logique est davantage celle du développement rural, de l'aménagement territorial et de l'environnement.

Le chapitre consacré aux **cultures** présente, culture par culture dans une logique de filière économique, les résultats obtenus sur un panel de productions végétales parmi les plus importantes en France et pour lesquelles les modèles disponibles sont jugés opérationnels. Une fiche introductive fait la synthèse sur leurs atouts et vulnérabilités.

Enfin, le chapitre « **Les régions** », introduit par une fiche « Géoclimatologie » où les éventuels déplacements de production sont envisagés, présente, pour six régions de métropole et la Guadeloupe, une sélection des résultats obtenus en lien avec les particularités agricoles de ces zones.

Des renvois entre fiches permettent de localiser les développements requis. Les termes jugés complexes sont repérés dans le texte lors de leur première apparition dans une fiche, leurs définitions étant regroupées dans un glossaire en fin d'ouvrage (ex : anticipation*).

Organisme / unité		Personnes	Rôle dans le projet / *auteur et co-auteurs de fiche du Livre Vert*
INRA : Recherche agronomique	AGROCLIM	Nadine Brisson	Coordination scientifique / projet, modèles, maïs-sorgho, colza, agribio, timing
		Frédéric Huard	Coordination technique, simulations climatiques / protocoles agriculture
		David Delannoy	Base de données, WEB CLIMATOR
		Dominique Ripoche	Simulations STICS
		Damien Chambert	Ingénierie des données et du cours en ligne
		Cédric Flecher	Générateur climatique
	EGC	Laurent Huber	Co-animation « santé »
		Bernard Itier	Animation « eau » / eau, atouts et vulnérabilités
		Romain Roche	Simulations CERES / rendement, santé
		Marie-Odile Bancal	Simulations CERES-ROUILLE / blé, santé
		Nathalie Gagnaire	Simulations humectation, ingénierie des données
	URP3F	Jean-Louis Durand	Co-animation « azote », simulations STICS / prairie
		Frédéric Bernard	Simulations STICS / prairie
	UREP	J.-F. Soussana	Simulations PASIM
		Anne-Isabelle Graux	Simulations PASIM / prairie
		Romain Lardy	Simulations PASIM, ingénierie des données / prairie
	APC	Jorge Sierra	Co-animation « azote », simulations / Guadeloupe, matière organique, modèles
	INFOSOL	Manuel Martin	Animation « matière organique », base de donnée sols, simulations CENTURY
	BIOSP	Denis Allard	Données horaires, générateur climatique, analyses statistiques / incertitudes
	EGFV	Philippe Pieri	Simulations BHV, BOTRYTIS / vigne, santé
	EPHYSE	Alexandre Bosc	Simulations GRAECO / forêt
	EEF	Vincent Badeau	Animation « géoclim », simulations EVOLFOR / géoclimatologie
		Nathalie Bréda	Simulations BILJOU / forêt
	LEPSE	Éric Lebon	Simulations BHV / géoclimatologie
	EMMAH	Albert Olioso	Calculs ET0
Encadrement agricole	ARVALIS	Philippe Gate	Animation « phénologie et calendriers » / timing, blé
		David Gouache	Co-animation « santé », simulations PANORAMIX, septoriose / santé
	Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes	Frédéric Levrault	Responsable Livre Vert / irrigation / atouts et vulnérabilités / régions métropolitaines
Enseignement agronomique	SUPAGRO	Lydie Guilioni	Animation « incertitudes », simulations SUNFLO / tournesol
	AGROPARIS-TECH	Jean Roger-Estrade	Responsable du cours en ligne, simulations OTELO
Recherche climatologique	CERFACS - CNRS	Laurent Terray	Coordination climat / climat
		Christian Pagé	Simulations climatique TT / climat
	Météo France CNRS	Michel Déqué	Simulations climatique QQ / climat

Tableau 2 : *participants à CLIMATOR et rôle dans le projet.*

Pour en savoir plus…

ANR : http://www.agence-nationale-recherche.fr

Atelier de Réflexion Prospective ADAGE (Adaptation au changement climatique de l'Agriculture et des Écosystèmes anthropisés) de l'Agence Nationale de la Recherche, coordonné par l'INRA : https://www1.clermont.inra.fr/adage/

Changement climatique : conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore : colloque de restitution du projet ACTA, 22/10/2009, 144p.

Projet RExHySS : Impact du changement climatique sur les Ressources en Eau et les Extrêmes Hydrologiques dans les bassins de la Seine et la Somme. http://www.sisyphe.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/

Projet CLIMASTER : http://www.rennes.inra.fr/climaster/

A

La méthodologie

La méthodologie A

Cette partie explique les hypothèses, concepts et outils mis en œuvre dans le projet CLIMATOR. Elle éclaire le lecteur sur les possibilités d'utilisation de ces méthodes, mais aussi sur leurs limites, ainsi que sur les conséquences quant à la qualité des résultats obtenus.

- **A1 - Climat**
  Cette fiche précise comment trois méthodes de régionalisation appliquées au modèle climatique ARPÈGE associé au scénario d'émission A1B permettent une caractérisation à échelle locale du climat français au cours du XXIe siècle. Des cartes nationales de différentes variables agroclimatiques pour le passé récent (PR), le futur proche (FP) et le futur lointain (FL) sont présentées. Les atouts et limites de ces différentes méthodes sont discutés.

- **A2 - Agriculture**
  Cette fiche indique comment une représentation simplifiée de l'agriculture française a pu être construite au travers d'un nombre limité mais représentatif de productions végétales, de sites d'étude, de sols et d'itinéraires techniques.

- **A3 - Modèles**
  Cette fiche définit, classe et présente les différents modèles de culture utilisés dans le projet CLIMATOR. Elle montre comment ces outils représentent les interactions entre croissance et développement des plantes et changement climatique, ainsi que la façon dont sont reproduites les pratiques agricoles.

- **A4 - Incertitudes et variabilités**
  Cette fiche présente et qualifie les différentes sources d'incertitudes liées à la méthode de travail : incertitudes climatiques, incertitudes liées aux modèles agronomiques. Elle examine le poids du changement climatique par rapport aux possibilités d'action de l'agriculteur. Enfin, elle fournit des recommandations sur l'interprétation des résultats.

L'évolution du climat en France au travers de quelques indicateurs agroclimatiques

A 1
Climat

Laurent Terray, Christian Pagé, Michel Déqué, Cédric Flécher

A Comment prévoir notre climat futur ?

L'objectif du projet CLIMATOR est de modéliser l'impact du changement climatique* d'origine anthropique sur les agro-écosystèmes, en métropole 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*) simulées par un ensemble de modèles climatiques* globaux de grande échelle (avec des mailles* entre 150 et 300 kilomètres) en fonction de plusieurs scénarios d'émissions anthropiques (gaz à effet de serre et aérosols) pour le XXIe siècle. La deuxième étape, indispensable avant l'utilisation de ces données climatiques pour des études d'impact, est celle de leur régionalisation (voir méthode de régionalisation*) : on parle aussi de désagrégation ou de descente d'échelle.

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 XXIe siècle. À 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 °C, avec une incertitude* de ± 0,6 °C 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 (fig. 1).

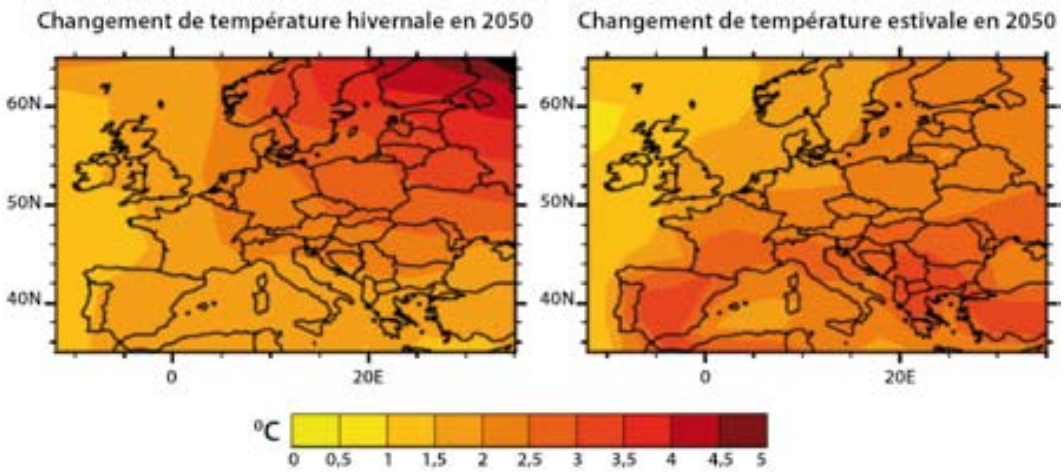


Figure 1 : *anomalies de température en Europe pour le climat de 2050 telles que simulées par le multimodèle du GIEC (21 modèles) et suivant le scénario A1B.*

Le réchauffement à la fin du XXe siècle pourrait atteindre 3,2 °C avec une plage d'incertitude de [1,9 – 4.2 °C], selon la même définition que précédemment. Sous le même scénario d'émission A1B, les modifications attendues des précipitations en fin de siècle seraient une diminution de l'ordre de 25 mm/an avec une plage d'incertitude de [0-55 mm/an]. Ces changements sur la France s'accompagnent d'un fort contraste saisonnier : alors que le sens du changement des précipitations hivernales est incertain, les précipitations estivales diminueraient sur tout le territoire, et en particulier sur le sud du pays.

Pour la région Caraïbe et selon le même scénario d'émission A1B, l'augmentation des températures moyennes annuelles serait de 2 °C d'ici 2100. La plupart des modèles climatiques y indiquent également une diminution des précipitations, estimée à 12 % d'ici la fin du XXIe siècle.

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 régionalisation : étape indispensable

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. 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 du projet, notre objectif principal était donc de fournir un ensemble de projections climatiques pour le XXIe siècle, désagrégées pour douze stations* climatiques de métropole et une de la Guadeloupe (cf. fiche AGRICULTURE).

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 repose sur l'utilisation de modèles climatiques régionaux à résolution spatiale plus fine que celle des modèles climatiques globaux (avec des mailles entre 25 et 50 kilomètres). Ces modèles régionaux ont une représentation plus réaliste des hétérogénéités spatiales : en particulier, le relief y est bien mieux représenté que dans les modèles globaux. L'approche statistique se décompose en deux étapes :

1 la mise au point 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 ;

2 l'application de cette fonction de transfert aux variables de grande échelle issues des projections climatiques pour générer des projections climatiques à échelle fine.

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. Remarquons aussi que les hypothèses de stationnarité sous-jacentes aux méthodes statistique et dynamique sont de nature différente. 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, tandis que l'approche dynamique suppose que les erreurs systématiques du modèle climatique sont invariantes (mais peuvent varier d'un modèle à l'autre). En effet, certains des biais des modèles globaux subsistent au sein des modèles régionaux. Cela explique pourquoi il est nécessaire de corriger les données simulées par désagrégation dynamique avant leur utilisation pour les études d'impact.

Les méthodes de correction mises en œuvre sont basées sur une fonction d'ajustement entre les données observées et simulées : l'idée est simplement de supposer que le modèle climatique régional prédit correctement le rang* et non pas nécessairement la valeur d'une variable. La fonction d'ajustement pour une variable donnée (par exemple, les précipitations) est estimée pour le climat actuel en comparant les fonctions de distribution observée et simulée avant d'être ensuite appliquée aux projections climatiques.

Si l'on s'intéresse spécifiquement aux impacts du changement climatique d'origine anthropique sur la France, on va donc chercher, avec ces méthodes de régionalisation, à représenter le mieux possible les modifications éventuelles des régimes thermiques et pluviométriques en réponse au signal du changement climatique. La question essentielle est alors celle de la capacité des modèles et des méthodes de régionalisation à simuler ce signal et les variables climatiques associées (par exemple, précipitation et température) aux échelles locales.

B Les méthodes de désagrégation

La méthode des anomalies ou ANO

La méthode des anomalies ou ANO (appelée aussi méthode des perturbations mensuelles) est la plus simple des méthodes de régionalisation. Pour chaque variable climatique, des perturbations sont calculées mensuellement, comme le rapport (ou la différence dans le cas de la température) entre le climat mensuel moyen simulé sous changement climatique et celui simulé pour le temps présent, pris comme référence. Ces perturbations mensuelles servent à modifier les séries actuelles observées, en étant appliquées uniformément durant tout le mois considéré. Cette stratégie ne rend compte que du changement de climat moyen et préserve, dans les scénarios de climat perturbé, la variabilité du climat actuel aux échelles qui ne sont pas celles du mois (journalières et interannuelles, notamment). Sa limitation principale est donc qu'elle ne permet pas de rendre compte des changements possibles de la fonction de distribution des variables climatiques à l'échelle journalière. Elle ne considère pas non plus les modifications éventuelles de la variabilité interannuelle.

La méthode des types de temps ou TT

L'idée de régimes ou de types de temps a été introduite dans les années 1950 par la climatologie synoptique* et repose sur une représentation conceptuelle de la dynamique atmosphérique des moyennes et hautes latitudes. Un régime ou type de temps se caractérise par l'apparition reconnaissable et récurrente, au-dessus d'un territoire géographique donné, d'une situation météorologique associée à des caractéristiques bien déterminées du temps sensible. Un autre aspect essentiel des types de temps est leur capacité à restituer une description fine des variables du climat sensible (température, précipitation, vent de surface, tempêtes…) aux échelles régionales à locales. Il est alors naturel d'utiliser les changements d'occurrence des types de temps pour interpréter les fluctuations climatiques continentales et cela pour un large spectre d'échelles spatiales et temporelles. Nous avons montré par exemple qu'une fraction importante de la variabilité interannuelle et de la tendance des précipitations en France au cours du XXe siècle pouvait être expliquée par les modifications de l'occurrence des types de temps. C'est l'idée qui est derrière la méthode de désagrégation développée par Boé (2007) et qui a été légèrement adaptée pour le projet CLIMATOR.

La méthode des types de temps est une variante raffinée de la méthode des analogues, dont le principe de base est le suivant : deux situations synoptiques données doivent engendrer des effets locaux comparables si elles sont suffisamment similaires. À partir d'une projection climatique à l'échelle journalière de la circulation synoptique (caractérisée, par exemple à l'aide de la pression atmosphérique de surface au niveau de la mer), la méthode des analogues extrait d'une archive météorologique plusieurs situations similaires (appelées les analogues) qui se sont produites dans le passé. L'archive météorologique utilisée dans CLIMATOR pour la circulation synoptique est la réanalyse américaine NCEP qui couvre la période de 1958 jusqu'à 2009. Les variables climatiques d'intérêt (pluviométrie, température...) observées pour chacune des situations synoptiques analogues sont également extraites des archives de mesures correspondantes. L'archive des observations utilisées dans CLIMATOR est la réanalyse SAFRAN* à haute résolution spatiale (mailles de 8 x 8 kilomètres) développée à Météo-France (Habets *et al.* 2008). On obtient ainsi une gamme de précipitations, températures et autres variables (rayonnement, vent, humidité) associées à une probabilité liée au degré d'analogie pour chacun des jours. En résumé, cette méthode est essentiellement une méthode de ré-échantillonnage des données observées. La méthode des types de temps raffine la méthode des analogues sur deux aspects essentiels : d'une part, elle combine la recherche d'analogues sur la circulation synoptique à celle sur la pluviométrie reliée aux changements d'occurrence des types de temps. D'autre part, elle utilise aussi un indice de température qui permet de mieux représenter la variabilité des épisodes pluvieux en été. Elle a aussi recours à un incrément de température pour représenter le réchauffement d'origine radiative* qui n'est pas associé aux modifications de circulation atmosphérique.

Dans CLIMATOR, la méthode des types de temps a été appliquée à un certain nombre de simulations réalisées avec le modèle atmosphérique ARPÈGE (voir ci-dessous). Elle a aussi été appliquée à un certain nombre de simulations issues des différents modèles globaux utilisés pour l'exercice d'intercomparaison qui a servi de support au dernier rapport du GIEC.

La méthode dynamique quantile-quantile ou QQ

La désagrégation dynamique consiste à utiliser des modèles climatiques (généralement atmosphériques, non couplés à l'océan) régionaux à haute résolution (25-50 km) forcés par des conditions latérales et aux limites (respectivement atmosphériques et océaniques) provenant soit des réanalyses* et des observations, soit des modèles climatiques globaux pour le climat actuel et de modèles climatiques globaux pour le climat futur. Le modèle climatique régional utilisé dans le projet CLIMATOR est le modèle atmosphérique ARPÈGE (Gibelin et Déqué, 2003), selon deux versions différentes, les versions 3 et 4 à une résolution de 60 et 50 km respectivement sur la France. Ce modèle est en réalité un modèle global mais avec un raffinement de maillage sur l'Europe et la France. Néanmoins, nous l'appellerons ici, par abus de langage, modèle régional. En revanche, puisqu'il est global, il n'a pas besoin de conditions latérales atmosphériques, mais uniquement des conditions aux limites océaniques (les températures de surface de la mer et les extensions de glace de mer) qui sont fournies pour le présent et le futur par le modèle climatique global CNRM-CM3 développé à Météo-France. Les erreurs systématiques des modèles climatiques, globaux et régionaux, imposent une étape de correction avant l'utilisation de leurs résultats pour les études d'impact.

La technique de calibration statistique dite quantile-quantile* consiste à corriger les variables simulées par le modèle à l'aide d'une fonction de correction, construite comme une probabilité conditionnelle* sur les données observées pour les mêmes variables. Plus précisément, les fonctions de correction ramènent les quantiles des données simulées par le modèle pour le temps présent vers les quantiles observés sur une période concomitante, pour chaque variable, saison et points de mesure. Cette méthode non paramétrique revient à considérer que le modèle est capable de prédire la distribution des variables climatiques mais pas la valeur exacte de chaque quantile. Dans sa version de base, la méthode corrige chaque variable (température, précipitation...) indépendamment des autres. Cependant, le biais d'humidité n'est pas forcément le même les jours chauds et les jours froids, les jours secs et les jours pluvieux. Aussi, de même qu'on applique une correction différente chaque saison, on définit quatre familles de temps local à partir d'une classification des sept variables météorologiques de chaque station. Pour chaque famille, on utilise une correction différente. Le tableau 1 résume les avantages et les inconvénients des trois méthodes de régionalisation.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Anomalies ou ANO	Simple et mise en œuvre facile et rapide	Hypothèses très fortes et très peu réalistes sur les modifications de variabilité : la variabilité journalière et interannuelle est considérée invariante entre le futur et le passé
Types de temps ou TT	Applicable facilement à un grand nombre de projections climatiques	Les liens grande échelle - échelle locale sont considérés invariants entre le futur et le passé
	Utilisable pour la quantification des incertitudes	Non -prise en compte d'événements extrêmes journaliers d'amplitude supérieure à ceux de l'archive passée (sauf pour la température)
Dynamique quantile-quantile ou QQ	La plus complète pour la prise en compte des rétroactions et les modifications des extrêmes	Très coûteuse en temps de calcul Les erreurs du modèle pour la correction quantile-quantile sont considérées invariantes entre le futur et le passé

Tableau 1 : *avantages et inconvénients des différentes méthodes de désagrégation utilisées dans le projet CLIMATOR.*

La méthode du générateur de temps

Nous avons aussi développé dans le cadre du projet CLIMATOR un générateur stochastique de temps* qui a pu être utilisé très partiellement dans l'étude des incertitudes climatiques (cf. fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS). 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 de temps proposé (WACS-Gen) 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 la méthode TT) ;

2 le vecteur des cinq variables d'intérêt est tiré aléatoirement selon une distribution* Closed Skew-Normal conditionnellement aux états de temps. 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 autres, 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* a été défini : les fonctions de transfert. Ces corrections sont 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 reposant sur des hypothèses et principes analogues à ceux mis en œuvre dans les méthodes ANO et QQ ;

2 la modification des paramètres du processus stochastique sous-jacent de la chronique temporelle des états de temps appliquant des principes semblables à la méthode TT, mais cette fois à l'échelle de la parcelle et non plus synoptique.

C Les projections climatiques

Les projections climatiques choisies et utilisées au sein du projet CLIMATOR résultent de la nécessité d'aborder la question des incertitudes. Une autre contrainte forte porte sur le nombre total de projections qui devait rester raisonnable afin de pouvoir les conjuguer avec les autres paramètres (sols, culture, etc.) des modèles d'agro-écosystèmes utilisés au sein du projet. Les différentes sources d'incertitude que nous voulions estimer simplement et qualitativement (donner une estimation des ordres de grandeur) sont les suivantes: l'incertitude liée au scénario socio-économique d'émission des gaz à effet de serre ou GES* (aussi appelé scénario SRES), l'incertitude liée au modèle climatique global utilisé et l'incertitude liée à la méthode de désagrégation. Nous avons également choisi une projection climatique de référence : elle est basée sur l'application de la méthode des types de temps à une simulation ARPÈGE (version 3) avec le scénario A1B et utilisant les conditions aux limites océaniques fournies par le modèle global CNRM-CM3. Cette projection sera toujours implicite dans le document si elle n'est pas précisée (voir § précédent).

Pour chaque source d'incertitude, nous détaillons maintenant les simulations (globale et/ou régionale) utilisées ainsi que les méthodes de régionalisation/désagrégation/correction appliquées (synthèse dans le tableau 2).

1 Les scénarios d'émission : trois simulations ARPÈGE (version 4) avec les scénarios SRES B1, A1B et A2 et régionalisés par la méthode quantile-quantile. Les conditions océaniques proviennent de simulations du modèle CNRM-CM3 contraint par les trois mêmes scénarios SRES.

2 Les modèles globaux : quatre simulations avec le scénario A1B et les modèles climatiques globaux NCAR, GISS, MRI, CCCMA, désagrégées par la méthode des types de temps. Ces quatre modèles simulent des évolutions différentes des températures océaniques et des variables caractéristiques de la circulation atmosphérique.

3 Les méthodes de régionalisation : une simulation d'ARPÈGE avec le scénario A1B et utilisant les conditions aux limites océaniques fournies par le modèle global CNRM-CM3 a été régionalisée par les trois méthodes de régionalisation : anomalies, quantile-quantile et types de temps. Ces trois projections climatiques permettent donc de tester l'impact de la méthode de régionalisation.

4 La simulation du modèle ARPÈGE : à la version standard du modèle ARPÈGE, nous avons ajouté une seconde version permettant de tester la sensibilité du modèle ARPÈGE au chaos de l'atmosphère. La version standard est initialisée au 1er janvier 1950 avec les conditions atmosphériques de ce jour et la seconde avec les conditions d'un jour de janvier 1950 tiré au hasard. Cette seconde version est régionalisée avec la méthode TT.

Scénario SRES	Modèle	Initialisation	Régionalisation
A1B	ARPÈGE	1	ANO
A1B	ARPÈGE	1	TT
A1B	ARPÈGE	1	QQ
A1B	ARPÈGE	2	TT
A1B	NCAR	1	TT
A1B	GISS	1	TT
A1B	MRI	1	TT
A1B	CCCMA	1	TT
B1	ARPÈGE	1	QQ
A2	ARPÈGE	1	QQ

Tableau 2 : *synthèse des simulations climatiques réalisées. En bleu, les simulations utilisées de façon systématique dans les études d'impact.*

Pour les estimations des incertitudes relatives à ces différentes sources, nous renvoyons le lecteur à la fiche INCERTITUDES. Rappelons encore une fois que ces estimations sont très qualitatives et qu'il n'est pas aisé de mettre en œuvre une procédure objective et optimale pour la quantification des différentes sources d'incertitude.

Trois périodes privilégiées vont être spécifiquement étudiées : une période de référence, 1970-2000, aussi appelée passé récent (PR), et deux périodes futures 2020-2050 (ou futur proche : FP) et 2070-2100 (ou futur lointain : FL). Ces périodes correspondent donc aux climats de 1985, 2035 et 2085, avec la définition simple d'une moyenne sur trente ans.

D Les données climatiques du passé récent

On veut montrer ici la capacité des modèles climatiques et des méthodes de régionalisation à représenter certaines caractéristiques du climat du passé récent. Le climat du passé récent est ici simplement défini comme la moyenne des variables climatiques sur la période 1971-2000 (PR).

Les modèles climatiques, globaux ou régionaux, tels qu'ils sont utilisés dans ces études climatiques sur le réchauffement lié aux effets anthropiques, ne sont pas destinés à reproduire les observations d'une année particulière ou d'une séquence de plusieurs années. Leur évaluation ne repose pas non plus sur leur aptitude à reproduire les tendances observées sur les trente dernières années : en effet, si cette tendance peut résulter en partie des forçages observés qui sont présents à la fois dans les observations et les simulations, elle est également fortement influencée par la variabilité intrinsèque du système climatique qui n'a aucune raison d'être identique entre les observations et les simulations. En revanche, ils doivent reproduire le mieux possible les caractéristiques moyennes (c'est-à-dire le Climat tel que défini précédemment) des variables climatiques qui sont importantes pour l'étude d'impact à conduire.

Les analyses présentées dans la fiche climat portent sur cinq indices climatiques qui sont pertinents pour les questions liées à l'impact du climat sur les agro-écosystèmes. Les indices climatiques que nous considérons sont : la température annuelle, les précipitations annuelles, le rayonnement global moyen annuel, le nombre de jours échaudant* (>25 °C) au printemps, la

somme d'avril à septembre des températures moyennes journalières en base 6 et le bilan hydrique climatique calculé comme la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration de référence ou évapotranspiration potentielle (ET0*).

L'évaluation des modèles et méthodes de régionalisation est discutée ici uniquement pour les indices températures et précipitations annuelles et pour une simulation réalisée avec le modèle ARPÈGE et régionalisée par la méthode TT (et la projection climatique de référence). Il est important de remarquer ici que l'évaluation porte implicitement sur la capacité du modèle climatique à reproduire les caractéristiques spatiales et fréquences d'occurrence des types de temps. Le jeu d'observations est issu de l'analyse SAFRAN* et des données météorologiques de l'INRA pour une douzaine de stations : Avignon, Bordeaux, Clermont-Theix, Colmar, Dijon, Lusignan, Mirecourt, Mons, Rennes, Saint-Étienne, Toulouse, Versailles.

La figure 2 montre que les températures désagrégées à partir de la simulation ARPÈGE reproduisent très bien les caractéristiques spatiales des températures annuelles observées. Le modèle ARPÈGE (et la méthode de régionalisation TT) donne des températures légèrement trop chaudes (écart modèle-observations sur les douze stations en moyenne de 0,5 °C et toujours inférieur à un degré). Ce biais du modèle est dû à la présence excessive dans la simulation de types de temps favorisant des anomalies chaudes, en particulier au printemps et en été. Ce biais chaud est aussi visible sur le nombre de jours échaudants (température maximale supérieure à 25 °C) au printemps et sur le cumul de température printemps-été.

L'accord est encore meilleur pour les précipitations annuelles avec une erreur de 29,2 mm/an en moyenne et un maximum de 73 mm/an à Lusignan et Mons.

Les variations spatiales des indices de températures et de la pluviométrie sont bien restituées par les données régionalisées. Cela montre que le modèle ARPÈGE reproduit convenablement la structure spatiale et les fréquences d'occurrence moyennes des types de temps observés sur la période 1971-2000. Il est aussi important de noter que le bon accord pour les données annuelles ne résulte pas d'une compensation d'erreur entre les différentes saisons (non montré).

Cela valide donc le modèle ARPÈGE pour son utilisation dans la simulation du climat futur, car les équations dynamiques et physiques sont universelles. Par contre, cela suppose que les relations statistiques (paramétrisations) qui représentent certains phénomènes dans le modèle seront les mêmes dans le futur.

1971-2000	Observations SAFRAN	Scénario ARPÈGE régionalisé par la méthode TT

Moyenne annuelle de la température en degrés Celsius

Nombre de jours échaudants (Tmax>25°C) au printemps (avril-mai-juin)

Cumul des températures en base 6 de mai à septembre en degrés Celsius

Précipitations annuelles moyennes en mm/an

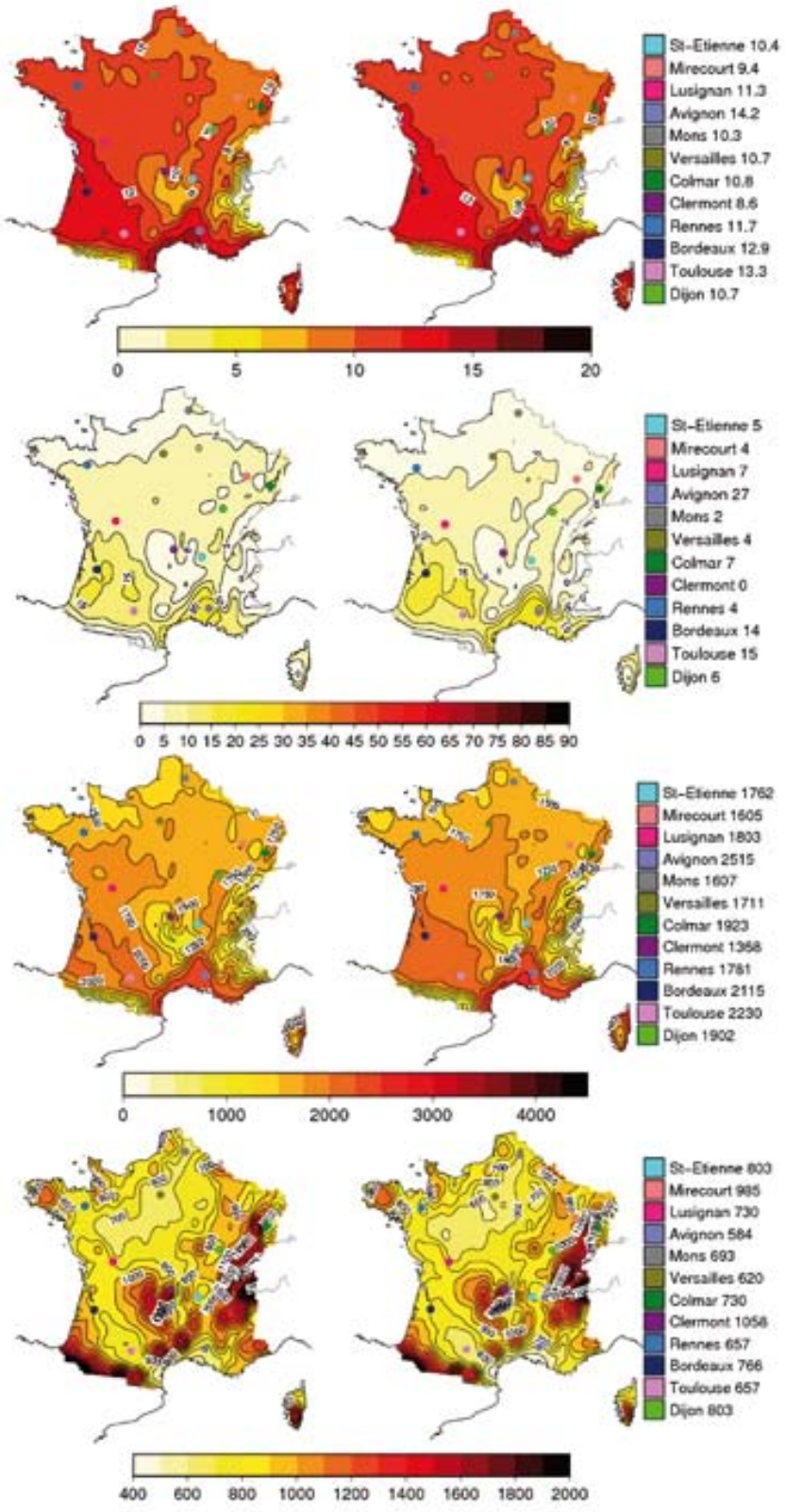


Figure 2 : *indicateurs climatiques CLIMATOR pour la période 1971-2000. Les figures ont été lissées spatialement pour permettre une meilleure lisibilité.*

E Les données du futur

Les projections climatiques vont être présentées pour quatre des cinq indices (la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration n'a pas été calculée pour la méthode QQ) et pour nos deux périodes d'intérêt (FP et FL). Afin d'illustrer très simplement certaines des sources d'incertitude, nous montrons deux projections climatiques issues de deux simulations réalisées avec les versions du modèle atmosphérique ARPÈGE pour la période 1950-2100 (les deux initialisations : voir § sur les projections). Le scénario d'émission reste le scénario A1B et les mêmes conditions aux limites océaniques (voir section sur les projections climatiques) sont conservées. Deux approches de régionalisation ont alors été suivies : TT et QQ. On compare donc ici une régionalisation dynamique pure avec correction de biais (QQ) avec une régionalisation statistique appliquée à un modèle climatique régional (TT). Il faut souligner que cette comparaison n'épuise absolument pas les différentes sources d'incertitude, et en particulier l'incertitude épistémique liée aux biais dans la représentation des processus physiques dans les modèles climatiques globaux (voir fiche INCERTITUDES pour une discussion approfondie de ces questions). Il faut donc absolument considérer ces projections comme deux trajectoires possibles parmi de nombreuses autres équiprobables. Notons néanmoins que la projection des températures basée sur la méthode des types de temps est proche de la médiane des projections obtenues en appliquant cette dernière à l'ensemble des simulations de quatorze modèles climatiques globaux (toujours pour le scénario A1B, voir Boé 2007).

Le futur proche

Les cartes sur les indicateurs thermiques (fig. 3) montrent un réchauffement important en moyenne annuelle sur l'ensemble du territoire métropolitain (de l'ordre de 1,6 ° C pour les deux projections). La projection QQ montre un gradient spatial marqué et croissant du nord-ouest au sud-est et qui est très atténué dans TT. Le cumul de température printemps-été indique une amplitude correspondante et une structure spatiale de réchauffement proche de celles des moyennes annuelles. Les deux projections montrent une diminution généralisée des précipitations (liée à une baisse importante au printemps et en été), sauf sur l'extrême sud-est en raison d'une augmentation des pluies hivernales. Les réductions les plus importantes se situent sur le Sud-Ouest et sur les Alpes et ceci pour les deux projections. Les amplitudes sont plus marquées avec TT (entre 5 et 15 % pour les douze stations) pour l'ensemble des stations, sauf pour le centre de la France (stations de Clermont-Theix et Saint-Étienne). La figure 5 montre qu'au niveau du nombre de jours échaudants au printemps, le scénario désagrégé par la méthode TT montre une augmentation significative de l'ordre de 10 à 20 jours. En moyenne annuelle, le rayonnement global augmente de 10 W/m^2, tandis que P-ET0 diminue significativement, avec plusieurs stations présentant un déficit au lieu d'un surplus.

Le futur lointain

Les projections TT et QQ (fig. 4) montrent une accentuation nette des tendances du futur proche. Les indicateurs thermiques suggèrent un réchauffement moyen pour TT et QQ de l'ordre de 3,0 et 3,3 ° C. La projection QQ indique un maximum de réchauffement dans le Sud-Est alors que celui de TT est au centre et à l'est du pays. Ces structures spatiales sont largement dues aux changements simulés au printemps et en été. Les cartes de précipitation TT et QQ montrent des caractéristiques spatiales assez similaires (surtout pour le sud de la France) et une accentuation des tendances du futur proche (baisse quasi généralisée), en particulier pour le sud-ouest avec des baisses pouvant aller jusqu'à 30 à 40 %. Cette similarité entre TT et QQ montre qu'une partie importante des changements des précipitations est due à des modifications de la circulation atmosphérique présentes dans les deux simulations. Il faut souligner ici que ces changements hydrologiques sont en bon accord avec la moyenne de ceux obtenus par quatorze modèles climatiques globaux régionalisés par la méthode TT (scénario d'émission A1B) (Boé 2007). Comme pour le futur proche, la figure 5 montre un accroissement important du nombre de jours échaudants au printemps, 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.

2020-2050	Scénario ARPÈGE régionalisé par la méthode QQ	Scénario ARPÈGE régionalisé par la méthode TT
Moyenne annuelle de la température en degrés Celsius		
Cumul des températures en base 6 de mai à septembre en degrés Celsius		
Précipitations annuelles moyennes en mm/an		

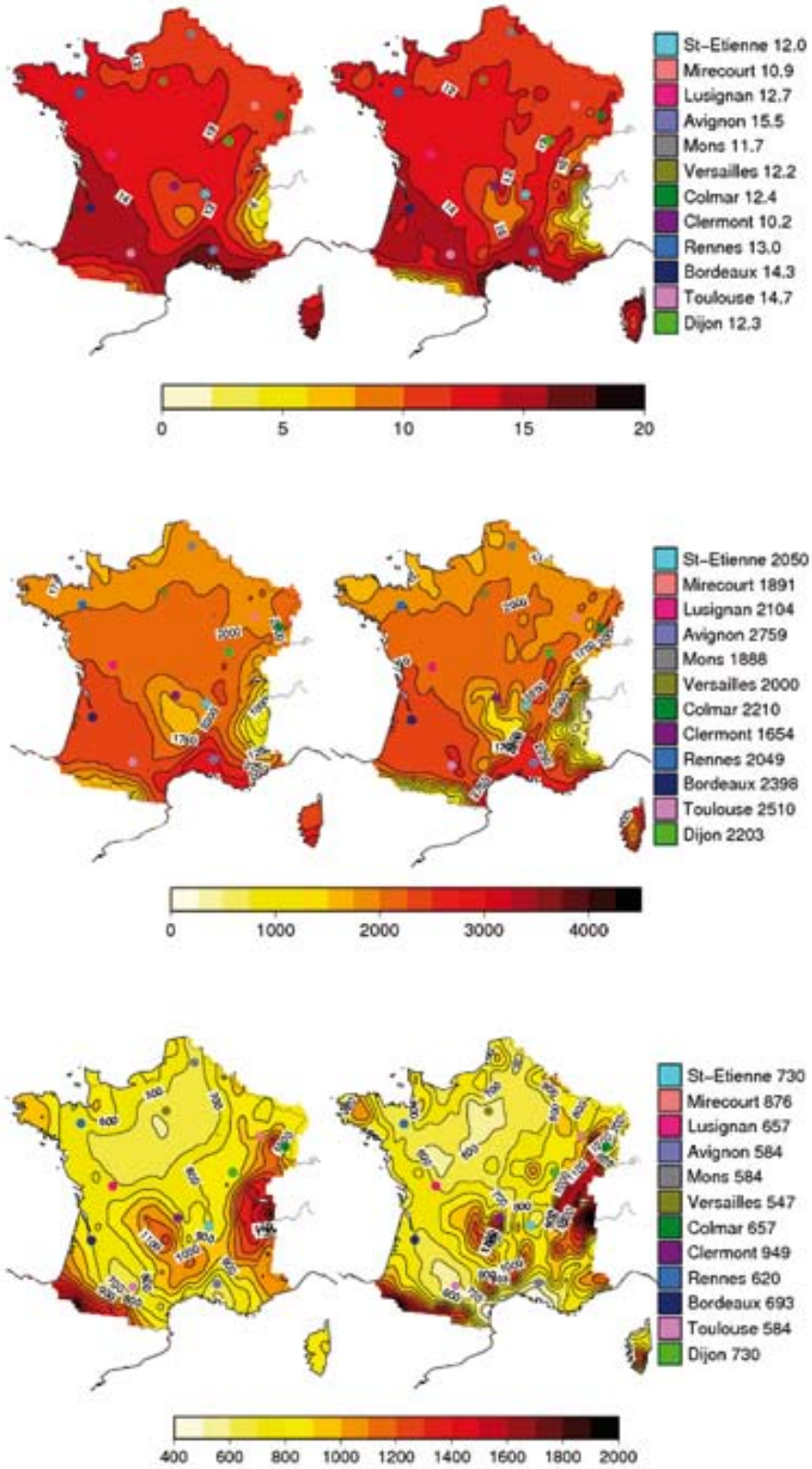


Figure 3 : *indicateurs climatiques CLIMATOR pour la période 2020-2050. Les figures ont été lissées spatialement pour permettre une meilleure visibilité.*

2070-2100	Scénario ARPÈGE régionalisé par la méthode QQ	Scénario ARPÈGE régionalisé par la méthode TT
Moyenne annuelle de la température en degrés Celsius		
Cumul des températures en base 6 de mai à septembre en degrés Celsius		
Précipitations annuelles moyennes en mm/an		

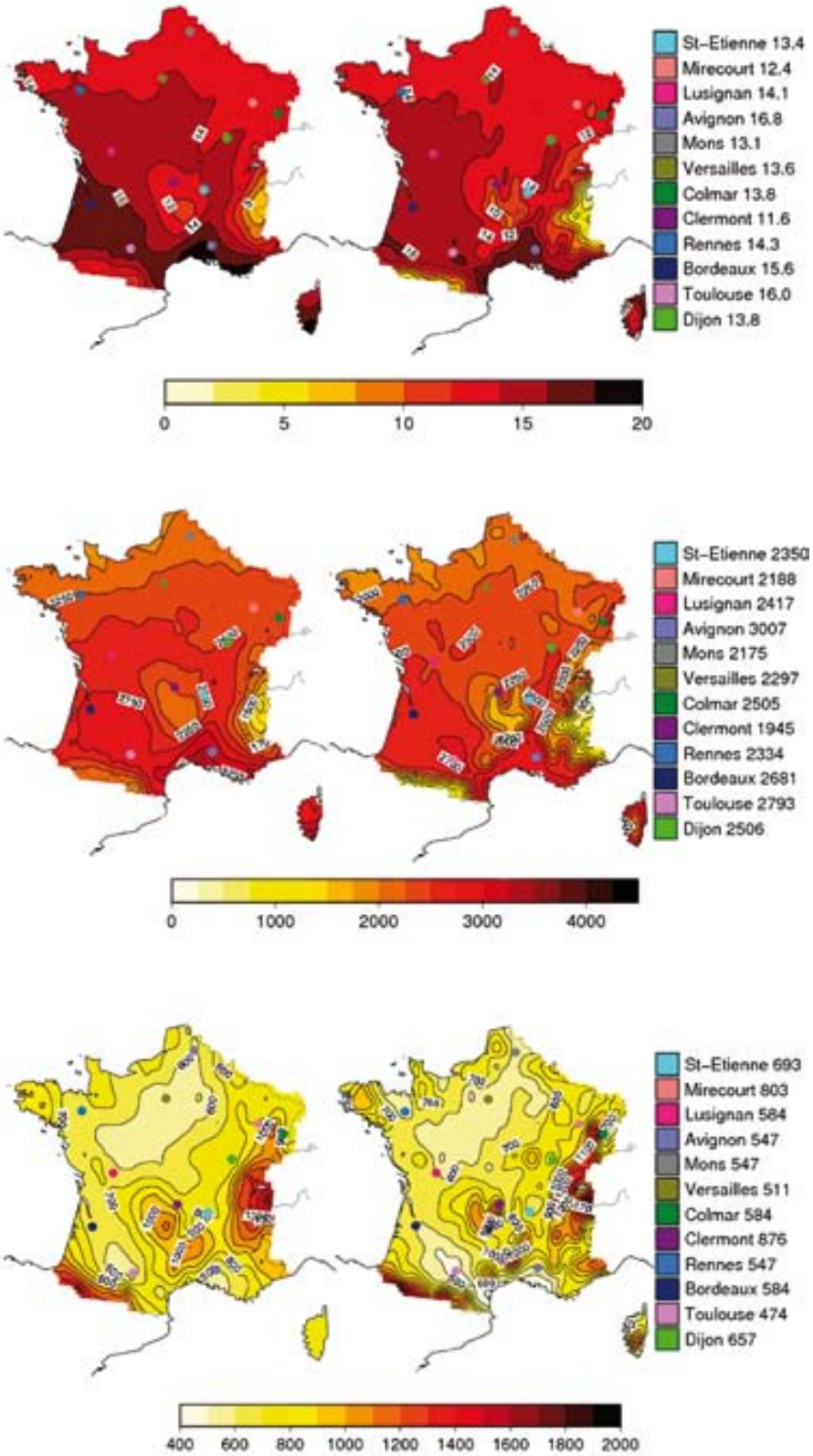


Figure 4 : *indicateurs climatiques CLIMATOR pour la période 2070-2100. Les figures ont été lissées spatialement pour permettre une meilleure visibilité.*

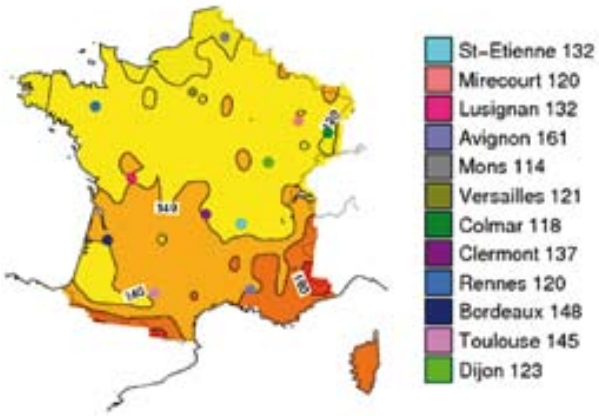
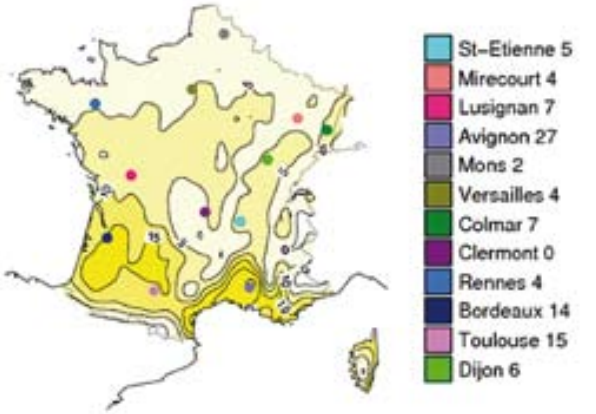
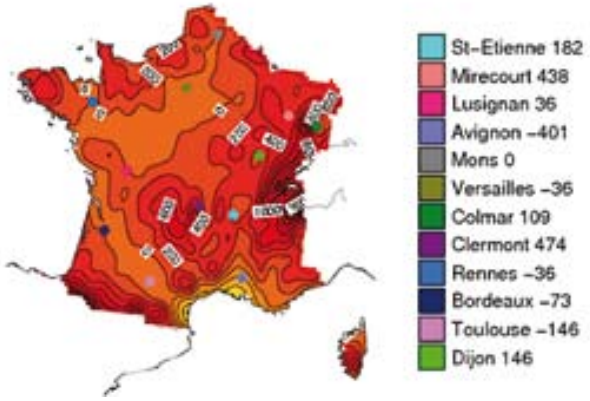
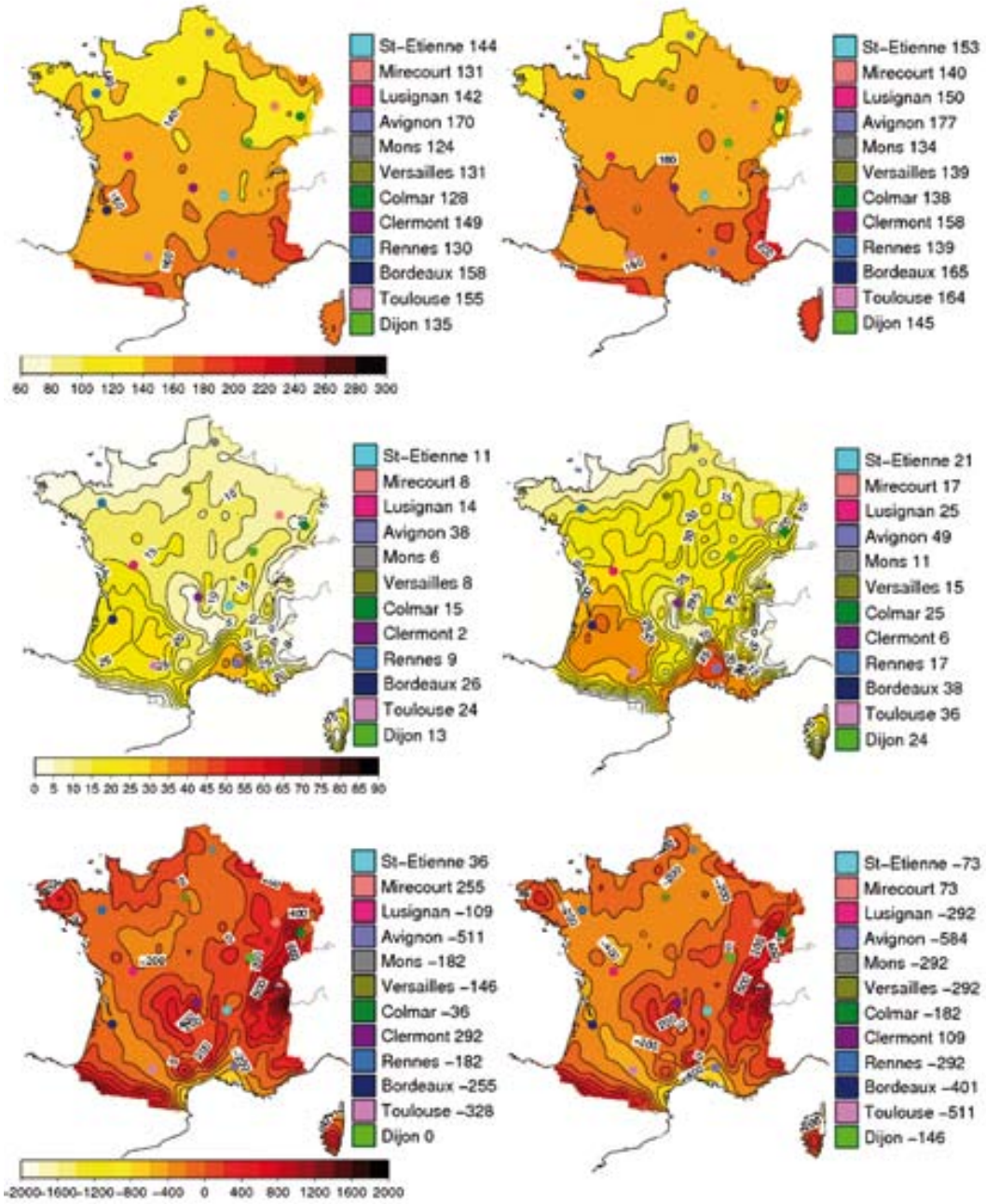
Scénario ARPÈGE régionalisé par la méthode TT	1971-2000
Rayonnement global annuel moyen (W/m²/an)	
Nombre de jours échaudant (Tmax>25°C) au printemps (avril-mai-juin)	
Précipitations moins l'ET0 en moyenne annuelle (mm/an)	

Figure 5 : *indicateurs climatiques CLIMATOR. Les figures ont été lissées spatialement pour permettre une meilleure visibilité*

Ce qu'il faut retenir

Afin de disposer au sein de CLIMATOR de projections climatiques à échelle fine sur la France, nous avons d'abord réalisé un certain nombre de simulations de l'évolution du climat de 1950 à 2100, à l'aide d'un modèle climatique régional, le modèle atmosphérique ARPÈGE. Ce modèle utilise comme conditions aux limites océaniques les températures de surface de la mer fournies par un modèle climatique global couplant l'océan et l'atmosphère. Afin de pouvoir utiliser ces projections pour les études prévues dans CLIMATOR, une étape de régionalisation (ou descente d'échelle et/ou de correction de biais) est absolument nécessaire. Nous avons donc également développé une méthode de désagrégation statistique basée sur les types de temps. Cette méthode permet de dériver, à partir de la la circulation atmosphérique de grande échelle, un ensemble de variables

2020-2050	2070-2100



climatiques (comme les précipitations et la température) à échelle fine (8 kilomètres) sur la France métropolitaine. En ce qui concerne la désagrégation dynamique, nous avons développé une méthode de correction des données directement simulées par les modèles régionaux comme le modèle ARPÈGE utilisé au sein du projet. Cette méthode dite quantile-quantile permet d'ajuster les variables climatiques modélisées sur celles des observations pour le climat présent, avant d'être appliquée sur les données simulées pour le climat futur. L'application de ces différentes approches a permis de générer un ensemble de projections climatiques à échelle fine sur la France de 1950 à 2100, en suivant le scénario d'émission A1B pour le XXe siècle. Les méthodes de régionalisation quantile-quantile et types de temps montrent une cohérence d'ensemble avec des tendances générales similaires, ce qui démontre la robustesse des projections.

L'ensemble de ces méthodologies de projection climatiques convergent vers :

- ✓ un réchauffement moyen de l'ordre de 1,6 (3,0) °C pour l'ensemble des stations et la période 2020-2050 (2070-2100) et pour la projection climatique de référence ;
- ✓ une forte diminution des précipitations au printemps et en été, en particulier sur le Sud-Ouest ;
- ✓ les grands traits de la structure spatiale des changements en futur lointain, déjà en place en 2050 ;
- ✓ des différences régionales et locales importantes liées au choix de l'approche de désagrégation, que ce soit pour les variables liées aux températures ou aux précipitations.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ Une meilleure compréhension des phénomènes physiques responsables des changements simulés par les modèles de climat et, en particulier, le rôle des modifications thermodynamiques et dynamiques de l'océan de surface (température de surface de la mer et de la banquise et extension de banquise).
- ✓ Une meilleure quantification des différentes sources d'incertitude liées au climat.
- ✓ La mise en œuvre de techniques visant à réduire certaines des sources d'incertitude, en particulier celles liées aux disparités des représentations des processus physiques dans les modèles de climat (par exemple, la représentation des nuages ou des mécanismes qui contrôlent l'évapotranspiration).
- ✓ L'amélioration des méthodes de désagrégation et de correction.
- ✓ La caractérisation fine des modifications des événements extrêmes et leurs impacts sur les agro-écosystèmes.

Pour en savoir plus…

Boé, J. (2007) - *Changement global et cycle hydrologique : une étude de régionalisation sur la France.* Doctorat de l'Université de Toulouse (Toulouse III - Paul Sabatier).

Braconnot, Pascale, Jean-Louis Dufresne, David Salas y Mélia and Laurent Terray (2009) - Analyse et modélisation du changement climatique : *2e édition du Livre Blanc Escrime,* sous la direction de Pascale Braconnot, Jean-Louis Dufresne, David Salas y Mélia et Laurent Terray. Société météorologique de France et Météo-France, Paris, 80 pp. ISBN : 978-2-11-098873-7.

Déqué, M., Rowell, D.P., Lüthi, D., Giorgi, F., Christensen, J.H., Rockel, B., Jacob, D., Kjellström, E., Castro, M. ,van den Hurk, B., 2007 - An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. *Climatic Change*, 81, 53-70.

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.

Flécher, C., Naveau, P., Allard, D. and Brisson, N. A stochastic daily weather generator for skewed data. [In press in *Water Ressource Research*].

Habets, F., *et al.* (2008) - The SAFRAN-ISBA-MODCOU hydrometeorological model applied over France, *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, doi:10.1029/2007JD008548.

Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.) (2007) - *Le quatrième rapport du GIEC.* Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Quelle agriculture dans Climator ?
Choix des sites, des systèmes agricoles et forestiers, et des sols

Frédéric Huard

A 2
Agriculture

A Introduction

CLIMATOR a pour objectif d'appréhender 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 agropédoclimats 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…).

Cependant, ne pouvant multiplier les combinaisons (techniques culturales, types de production, taille des exploitations…), un nombre limité de systèmes agricoles a été retenu pour fixer un cadre de modélisation qui n'alourdisse pas trop le nombre des simulations. Cette attitude a également permis de comparer les sorties des modèles utilisés dans un cadre commun de simulation (en termes de types de sol, rotations*, techniques utilisées, etc.). Les couverts pérennes sont représentés par les cultures fourragères, la vigne et la forêt dans des contextes techniques simplifiés (dates de coupe fixées, densités de plantations du vignoble et durées de révolution de la pinède standard). Pour les grandes cultures, en parallèle de rotations quadriennales relativement complexes à modéliser (grand nombre de combinaisons prises en compte : plante, génotype, précédent cultural, rotation…), des pratiques agricoles théoriques en monoculture ont été simulées (tournesol, maïs, blé) afin d'obtenir des résultats plus facilement interprétables.

Dans le même ordre d'idée, un panel restreint de sols et de génotypes a été retenu dans chacun des sites. 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 (système ayant pour objectif l'atteinte d'un rendement élevé) au biologique… Toutefois, en prenant le risque calculé de quelques situations un peu paradoxales, l'ensemble des systèmes retenus a été simulé sur tous les sites, conduisant dans certains cas (rares) à des impasses techniques (par exemple, températures ne permettant pas le déroulement complet du cycle de culture).

Une étude spécifique a été entreprise pour la Guadeloupe, focalisée sur trois cultures tropicales (maïs, banane et canne à sucre) et un seul type de sol caractérisant la pédogenèse de ces latitudes. Elle fournit des éléments de comparaison entre agriculture tempérée et agriculture tropicale.

B Les sites

La démarche repose sur une analyse multilocale, à travers douze sites métropolitains et un site de Guadeloupe (fig. 1) possédant au moins 30 ans d'enregistrements climatiques repartis sur sept régions administratives. Pour étudier les effets de l'altitude, deux sites proches ont été retenus : Saint-Étienne (400 m) et Clermont-Theix (890 m). Ces douze sites permettent d'appréhender les grands types de climat français : tropical (Guadeloupe), océanique (Rennes, Lusignan et Bordeaux), méditerranéen (Avignon et Toulouse), continental (Mirecourt, Colmar et Dijon). La pluviométrie moyenne annuelle des sites métropolitains varie de 541 mm (Colmar) jusqu'à quasiment 900 mm (Bordeaux, Theix et Mirecourt) et l'amplitude des températures moyennes annuelles est de plus de 6 °C (7.9 °C à Theix et 14 °C à Avignon).

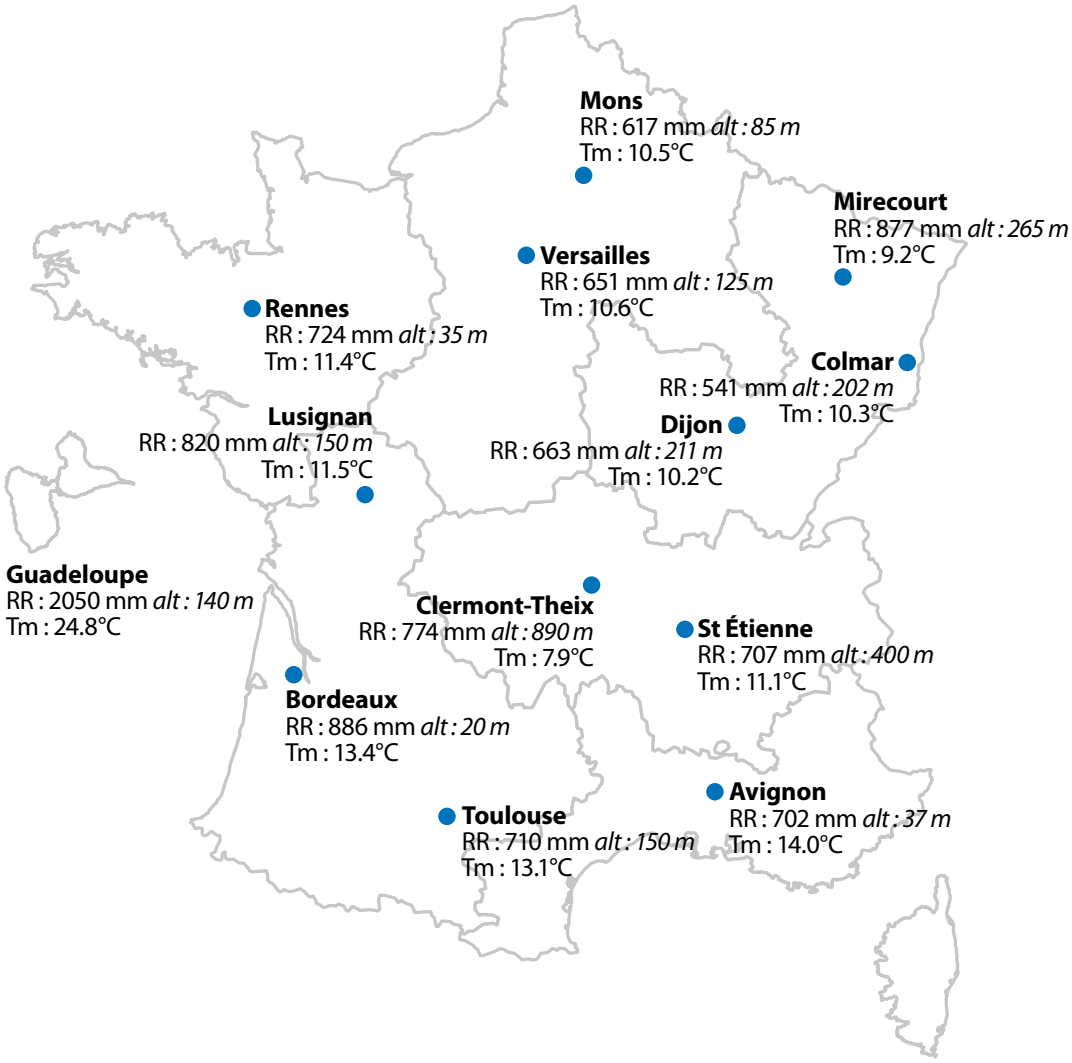


Figure 1 *: localisation des sites métropolitains avec leur altitude et climatologie.*

C Les systèmes de culture

Cinq types d'occupation du sol ont été retenus à partir desquels des systèmes agricoles sont modélisés et plusieurs niveaux d'intensification ont été retenus. Le tableau 1 présente l'ensemble de ces choix.

SYSTÈMES DE CULTURE		
« Intensif »	MI	Maïs irrigué (80 %)
	BA	Bananier
	MIT	Maïs tropical
	BB	Blé-blé
	MBCB	Maïs-Blé tendre -Colza-Blé dur irrigué (80 % pour le maïs, 70 % pour le blé)
	VI	Vignes denses, irrigués (30 %) et fertilisées
	GI	Prairie de graminée irriguée (80 %) fauchée sur 5 ans
	FCC	Forêt de pins à rotation courte (28 ans) orienté biomasse
« Intrants limités »	BIO	Blé tendre-Pois-Graminée fourragère (Fétuque ou Ray grass)
	TBSB	Tournesol-Blé tendre-Sorgho-Blé dur
	TT	Tournesol-Tournesol
	C	Canne à sucre en pluvial
	G	Prairie de graminée fauchée sur 5 ans
	FCL	Forêt de pins à rotation longue (100 ans) orientée bois d'œuvre
	FCM	Forêt de feuillus ou de conifères à rotation moyenne (50 ans)
	V	Vignes en pluvial

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

Certains systèmes ne représentent que des cas d'école (par exemple, la monoculture de tournesol…), mais ils ont permis de comparer directement les sorties de différents modèles. Enfin, pour simuler les jours disponibles*, quelques caractéristiques des exploitations agricoles (taille, main d'œuvre, équipement…) ont été également fixées (cf. fiche TIMING).

D 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 (cf. tableau 2) 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, liée au changement climatique.

Maïs	Méribel (1640 °CJ), DKC5783 (2010 °CJ) et Spectral (tropical)
Blé tendre	Charger, Soissons, Arminda par ordre croissant de tardivité d'épiaison
Sorgho	Friggo (1650 °CJ) et Fulgus (1855 °CJ)
Blé dur	Acalou et Nefer par ordre croissant de tardivité d'épiaison
Colza	Olphi et Pollen par ordre croissant de tardivité à la montaison
Tournesol	Prodisol (1650 °CJ) et Mélody (2010 °CJ)
Vigne	Chardonnay, merlot et grenache par ordre croissant de tardivité à la floraison

Tableau 2 : *les variétés utilisées pour les systèmes annuels et la vigne.*

Pour les cultures fourragères, la spécificité se situe d'avantage au niveau des capacités de la plante à faire face à la sécheresse (évitement*, adaptation*, tolérance*), par la morphologie de leurs systèmes foliaire et racinaire ainsi que leur fonctionnement physiologique : c'est le cas du ray grass anglais (adapté aux milieux humides) et de la fétuque (adaptée aux milieux secs). 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 utilisée (pois, banane, canne à sucre, espèces forestières).

E Les itinéraires techniques*

Le tableau 3 présente les choix techniques des dates de labour et de semis, la densité de plantation, l'irrigation et la fertilisation.

Système	Plante	Date		Densité plants/m²	Irrigation % besoins	Fertilisation Kg N ha⁻¹	Résidus de culture (en plus des racines)
		Labour	Semis				
MBCB	Maïs*	15/09	10/04	10	80	200	chaumes
	Blé tendre	-	10/10	240	70	230	chaumes
	Colza	10/08	20/08	35	0	180	pailles
	Blé dur	01/10	20/10	240	70	230	pailles
TBSB	Tournesol*	15/11	10/04	6	0	60	pailles
	Blé tendre*	01/10	20/10	280	0	230	pailles
	Sorgho	15/11	20/04	28	0	120	pailles
	Blé dur	10/10	20/10	280	0	170	pailles
BIO	Pois	15/10	01/03	80	0	20 tonnes fumier le 01/10	chaumes
	Blé tendre	16/09	20/10	220	0	20 tonnes fumier le 01/10	chaumes
	Fétuque ou Ray grass (2 ans)	05/09	10/10	3000 (talles)	0	0	chaumes
V	Vigne	-	-	0.3 /0.9	0	15	bois
VI					30	40	
MIT	Maïs tropical	10/05	20/05	5	0	150	pailles
BA	Banane	01/04	05/04	0.25	0	450	pailles
C	Canne à sucre	10/01	01/02	8	0	150	chaumes
G	Fétuque ou Ray grass sur 5 ans	10/09	01/10	3000 (talles)	0	200	chaumes
GI					80		

Tableau 3 : *les itinéraires techniques*
(*) également itinéraire technique des systèmes en monoculture.

La prairie semée est constituée d'une seule espèce, la fétuque élevée ou le ray grass anglais, semée le 8 septembre puis exploitée au rythme de 4 fauches par an, sous condition de biomasse sur pied supérieure à une tonne de matière sèche par hectare. La fertilisation est apportée le lendemain de la coupe. Plus ponctuellement, sur certains scénarios, des pratiques dites « optimisées » ont été testées ou calculées (pour MI, BB et TT). Le choix des doses de fertilisant azoté correspond à des valeurs couramment observées en région de grande culture et les doses d'irrigation ont été calculées de façon à couvrir un pourcentage des besoins en eau (% sur le tableau). L'enfouissement des résidus correspond, le plus souvent, aux pratiques les plus courantes.

F Les sols

La méthodologie de prise en compte des sols a été dictée par la volonté de combiner les résultats par type de culture et de site. Pour limiter le nombre de simulations, la démarche s'est basée sur trois sols (cf. fiche MODÈLES) :

- un sol commun (ou sol 1) pour tous les sites et cultures, caractérisé par son caractère « moyen » et une réserve utile* relativement élevée afin d'éviter toute situation hydrique limitante et qui a permis de mettre en évidence les effets du climat, « toutes choses égales par ailleurs » ;
- deux sols à niveau de réserve utile et profondeur contrastés, communs aux sites mais représentatifs de chaque type de système agricole.

Ces sols ont été sélectionnés à partir de la Base de Données des Sols de l'INRA-Infosol à Orléans, en appliquant un masque sur l'ensemble du territoire 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. De fait, ils ne peuvent prétendre représenter une réalité régionale. Le sol de Guadeloupe est un sol ferrallitique (profondeur = 90 cm, RU = 275 mm, MO = 5 %).

Occupation du sol	Commun	Grandes cultures		Vigne		Prairie		Forêt Décidus		Forêt Conifères	
Sigle du sol	Sol 1	Sol 2	Sol 3	Sol 2	Sol 3	Sol 2	Sol 3	Sol 2	Sol 3	Sol 2	Sol 3
Classification	brun peu lessivé tronqué	lessivé hydromorphe	lessivé modal	brun calcaire	brun lessivé	brun calcaire	fluviosol brunifié carbonaté	rendzine brunifiée modale	lessivé acide	brun	fersiallitique
Profondeur (cm)	140	65	215	55	120	60	210	70	140	90	125
RU (mm)	226	104	317	73	150	92	287	126	167	103	96
MO (%)	1.8	1.4	2.3	2.8	1.5	2.8	6.1	9.2	2.5	1.2	5.7

Tableau 4 : *caractéristiques des sols métropolitains choisis.*

G L'adaptation

L'étude de l'adaptation des systèmes et des pratiques face au changement climatique est partielle dans le projet CLIMATOR. Elle existe toutefois au travers des hypothèses de travail retenues :

- en modélisant toutes les cultures sur tous les sites (tenter, par exemple, la viticulture à Mirecourt ou à Clermont-Theix) et en évaluant si (et dans quelles conditions) le changement climatique va autoriser de nouvelles cultures (ou à l'inverse interdire certaines cultures actuelles) ;
- en utilisant des variétés se distiguant par la durée du cycle, permettant ainsi de pratiquer une esquive de périodes climatiques sensibles ;
- en testant différentes dates de semis ou ponctuellement en les optimisant (cf. fiches MAÏS, TOURNESOL) ;
- en utilisant différents sols, et notamment deux sols opposés en termes de profondeur et de réserve en eau ;

- en utilisant pour l'irrigation non pas des dates et des volumes fixés mais une satisfaction des besoins en eau à atteindre ;
- en apportant la fertilisation azotée à stades fixes et non pas à dates fixes.

La combinaison de l'ensemble de ces leviers a permis d'appréhender les conditions d'adaptation des systèmes face aux modifications du climat et d'envisager l'évolution des conditions les plus (et les moins) favorables pour différents systèmes de culture actuels.

Ce qu'il faut retenir

- ✓ Les choix faits en matière de systèmes, d'itinéraires techniques, de variétés, de rotations… comprennent une part de subjectivité. Ils sont cependant nécessaires afin de tester dans le projet le plus grand nombre de modèles. Ce faisant, les cas d'étude ont été limités pour améliorer les conditions de comparaison des sorties. Ces choix ont été faits de manière la plus raisonnable possible, à savoir basés sur l'expertise des membres du projet et d'un collectif de professionnels réunis au début du projet. Ils correspondent à des pratiques couramment observées dans les régions étudiées. L'objectif n'est pas de fournir des préconisations, mais d'extérioriser au mieux les impacts du changement climatique sur nos agro-écosystèmes
- ✓ Pour les sols, deux niveaux d'approche ont été adoptés. Le premier, pour un regard à court terme, propose l'utilisation d'un sol commun à tous les couverts qui permet la comparaison des systèmes de culture dans leur fonctionnement annuel. Le second, pour un regard à long terme et plus pragmatique, caractérise les sols par types de couvert. La spécificité géographique des sols a été jugée secondaire dans le projet, ce qui se justifie à l'échelle nationale (sauf pour la Guadeloupe).
- ✓ Le choix raisonné de sites, systèmes, modèles, sols et décisions techniques permet ainsi de balayer, sans prétention à l'exhaustivité, la part la plus importante de la gamme des combinaisons possibles. L'analyse statistique des variables de sortie des modèles permettra de hiérarchiser les principales sources de variations entraînées par les différentes modalités des facteurs, ainsi que leurs principales interactions (cf. fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS).

Description des modèles agronomiques et forestiers et mise en œuvre

Nadine Brisson

A 3
Modèles

A Présentation des modèles

Le terme « modèles » fait ici référence à des représentations mathématiques, simplifiées, de l'évolution des agro-écosystèmes dans leur environnement climatique et édaphique. Ils ne simulent pas tous les mêmes systèmes, ni les mêmes fonctionnalités de ces systèmes. Ils nécessitent des données en entrée* qui décrivent le sol, la plante (dans ses dimensions spécifique et variétale), les pratiques culturales ou forestières, l'état initial du système et bien sûr le climat*. Si la plupart de ces modèles sont dynamiques, le pas de temps qui les pilote, qui correspond aussi à la résolution temporelle des données climatiques en entrée, peut varier. La parcelle agricole ou forestière constitue leur niveau spatial élémentaire, sachant que quelques modèles de culture* associent plusieurs parcelles pour simuler assolements ou exploitation agricole. Les aspects économiques ne sont pas abordés.

Quel que soit le degré de sophistication des modèles, n'oublions pas qu'il s'agit de représentations forcément imparfaites de la réalité, mais qui sont des outils indispensables pour nous projeter dans le futur !

Nom	Système modélisé	Pas de temps du forçage climatique	Référence bibliographique
CERES	Monoculture de blé	jour / heure	Lebard, 2005
PANORAMIX	Monoculture de blé	jour	Gate, 1995
STICS	Rotations GC, prairie, vigne	jour	Brisson *et al.*, 2009
SUNFLO	Monoculture de tournesol	jour	Lecoeur *et al.*, 2010
PASIM	Prairie	heure	Riedo *et al.*, 1998
GRAECO*	Forêt de pin + sous-bois	heure	Lousteau et Bosc, 2005
BILJOU*	Forêt décidue et conifère	jour	Granier *et al.*, 1999
BHV	Vigne	jour	Pieri et Gaudillère, 2003
OTELO	Exploitation de GC	jour	Papy *et al.*, 1990
CENTURY	Sol	mois	Parton *et al.*, 1987
HUMECTATION	Feuillage	heure	Lhomme et Jimenez, 1992
BOTRYTIS	Vigne + Botrytis	jour	Fermaud *et al.*, 2003
CERES-ROUILLE	Blé + Rouille brune	jour	Roche *et al.*, 2008
SEPTORIOSE	Blé + Septoriose	jour	Gouache et Couleaud, 2009
EVOLFOR*	Forêt de hêtres, chênes	période	Badeau *et al.*, 2010

** (détails dans la fiche FORÊT)*
Tableau 1 : *carte d'identité des modèles de CLIMATOR.*

Nous pouvons classer ces modèles en plusieurs catégories.

- Les modèles de production (CERES, PANORAMIX, STICS, SUNFLO, PASIM, GRAECO) prédisent le rendement en simulant l'assimilation du carbone et sa redistribution dans les couverts végétaux, pilotées par la phénologie* et le stress hydrique* subi, issu d'un bilan hydrique. Certains d'entre eux simulent également le bilan azoté de la culture et les éventuels stress associés au manque d'azote (CERES, STICS, PASIM). Le modèle PANORAMIX a deux particularités : le rendement est calculé à partir de relations diagnostique entre composantes du rendement

et, contrairement aux autres modèles, l'état du sol (dans ce cas, uniquement hydrique) est réinitialisé en début de campagne agricole à l'humidité au point de flétrissement permanent. Les modèles CERES et STICS reproduisent l'effet du gel à différents stades de la plante. Le modèle STICS est le seul à prendre en compte l'impact de l'excès d'eau et simule rotations culturales* et assolements.

- Les modèles de bilan hydrique (BHV et BILJOU) prédisent uniquement l'état de contrainte hydrique du couvert et l'évolution du stock d'eau dans le sol. Ils nécessitent une description du feuillage en entrée, terme déterminant dans la transpiration des plantes. Cela se fait par une approche architecturale du feuillage dans BHV et, de façon plus globale, par la dynamique saisonnière de l'indice foliaire* (ou IF) dans BILJOU.
- Le modèle CENTURY simule le stockage du carbone dans le sol à long terme, sa résolution temporelle est mensuelle. Bien qu'il fonctionne de façon autonome, nous l'avons rendu compatible avec les autres modèles en lui fournissant les simulations de résidus de culture des modèles de production. C'est ce modèle qui est couplé avec PASIM pour simuler le bilan carbone-azote du sol.
- En termes de santé des plantes, quatre types de modèles ont été utilisés simulant de façon plus ou moins intégrée l'ensemble des deux biologies de la plante hôte et du pathogène. Le modèle HUMECTATION reproduit les conditions physiques d'un feuillage de type blé. Les modèles BOTRYTIS, SEPTORIOSE et CERES-ROUILLE simulent respectivement la nuisibilité des maladies sur vigne et blé et, pour les deux premiers, les traitements phytosanitaires requis.
- Le modèle OTELO simule l'organisation des chantiers au sein d'une exploitation agricole. Cette simulation repose sur l'application de règles de décision pour déterminer quels sont les jours disponibles pour les opérations culturales (ces règles dépendent de la pluviométrie et de l'évolution de l'état hydrique du sol). Le modèle permet également de calculer le déroulement des chantiers des différentes opérations culturales, en prenant en compte dans les règles de décision simulées, le climat, les exigences des cultures (températures minimales…), les contraintes horaires des employés, la vitesse des matériels utilisés, les priorités entre opérations quand plusieurs sont possibles. Nous l'avons utilisé uniquement sur une exploitation de grande culture.
- Le modèle EVOLFOR est un modèle de niche qui prédit l'évolution à long terme de la présence des espèces forestières à partir d'un modèle statistique impliquant les variables climatiques intégrées sur les périodes d'intérêt.

Dans cet ensemble, seuls quelques couples ou triplets de modèles sont théoriquement comparables (tab. 2), dans le sens où ils simulent la même variable pour le même système.

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

** Les systèmes forestiers de GRAECO et BILJOU ne sont pas strictement comparables (cf. fiche FORÊT)*

Tableau 2 : *modèles « théoriquement » comparables.*

Pour simuler les mécanismes fondamentaux de l'écophysiologie des couverts végétaux, ces modèles font appel à des concepts synthétisés dans le tableau 3, qui varient entre les modèles. Il s'agit de la façon de simuler le feuillage, de réaliser l'interception du rayonnement solaire, sa conversion en biomasse par les processus de photosynthèse* et de respiration, l'estimation des besoins en eau des couverts végétaux. De même, au niveau du sol, le transfert d'eau et l'évolution de la matière organique font appel à des concepts parfois différents d'un modèle à l'autre. Le tableau 3 montre que, dans CLIMATOR, la diversité des concepts est largement représentée, ce qui ne facilite pas les comparaisons entre modèles. En contrepartie, cela permet de balayer un large spectre de possibilité pour tenir compte des nombreuses sources d'incertitude (cf. fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS).

Mécanisme	Concept	Modèle concerné
Feuillage	**IF :** le feuillage est vu comme une grande feuille caractérisée par sa surface rapportée à 1m^2 de sol	STICS, CERES, PASIM, SUNFLO, BILJOU
	Plante architecturée : le feuillage est en deux dimensions, caractérisé par une succession d'étages foliaires	BHV
Interception du rayonnement	**Bilan radiatif :** la forme des couverts végétaux est simulée et participe à la discrimination du rayonnement reçu	STICS-Vigne, BHV
	Loi de Beer : on suppose que le rayonnement intercepté suit la loi optique de Beer-Lambert en fonction de l'IF	STICS-Herbacées, CERES, PASIM, SUNFLO
Assimilation du carbone	**Farquar :** respiration et photosynthèse brute sont simulées séparément. La biochimie photosynthétique y est prise en compte de façon détaillée et en particulier le rôle du CO_2	CERES, PASIM
	Monteith : un coefficient appelé RUE permet de convertir le rayonnement intercepté en croissance en biomasse. Il peut être affecté par la température, les stress et le CO_2 de façon empirique.	STICS, CERES, SUNFLO*, PANORAMIX*
Besoins en eau	**ET0 :** la demande climatique est estimée par une formule (Penman ou Penman-Monteith) puis éventuellement répartie entre sol et plante par une loi de Beer en fonction du IF	CERES, BILJOU, SUNFLO, PANORAMIX, PASIM, OTELO
	Bilan d'énergie : le bilan des énergies radiatives et convectives est réalisé au niveau du couvert végétal et sa résistance stomatique spécifique est prise en compte intégrant l'effet du CO_2	STICS, BHV
Transferts d'eau dans le sol	**Modèle à réservoir :** l'eau s'écoule d'un horizon à l'autre dès que la teneur en eau dépasse la capacité au champ.	STICS, SUNFLO, PANORAMIX, CERES, BILJOU, BHV, OTELO
	Loi de Darcy-Richards : l'eau s'écoule selon une loi flux-gradient.	PASIM
Evolution de la matière organique du sol	**N :** c'est l'évolution de l'azote qui est simulée et l'évolution du carbone en est déduite par un rapport C/N constant	STICS, CERES
	C : c'est l'évolution du carbone qui est simulée et l'évolution de l'azote en est déduite par un rapport C/N constant	CENTURY, PASIM

** : ajout de l'effet CO_2 mentionné ultérieurement.*
Tableau 3 : *les principaux concepts utilisés pour simuler l'écophysiologie des couverts végétaux.*

B Quels mécanismes en interaction avec le climat ?

Dans ces modèles, les mécanismes sont nombreux, quasiment tous en interaction avec le climat* et de façon parfois antagoniste. Focalisons-nous sur les variables climatiques les plus affectées par le changement, c'est-à-dire la température, la pluviométrie, le rayonnement (en interaction avec la pluviométrie) et le CO_2.

Le déroulement des cycles phénologiques est sous la dépendance de la température avec essentiellement des réponses en accélération (selon des lois en somme de degrés - jours) mais aussi des réponses de type frein pour la vernalisation* ou la dormance.

La photosynthèse*, moteur de la croissance* et donc de la production, augmente avec la teneur en CO_2 de l'atmosphère, en même temps que la conductance stomatique diminue. L'ampleur de cette augmentation est plus importante pour les plantes en C3* (de l'ordre de 20 %) que pour les plantes en C4* (de l'ordre de 6 %). Rappelons également que la photosynthèse est proportionnelle au rayonnement intercepté par le feuillage.

Il existe des effets seuils au niveau thermique, qui actuellement pénalisent peu les cultures, mais qui dans un contexte thermique plus chaud peuvent devenir très pénalisants. C'est par exemple le cas de l'échaudage thermique des céréales ou des décélérations de développement* à haute température.

Bien que soumis à des effets qui peuvent être contraires, le bilan hydrique des cultures sera globalement pénalisé : à côté des précipitations qui ont tendance à diminuer, la demande climatique sera au mieux stable pour les C3 et en augmentation pour les C4 ; l'effet réducteur du CO_2 (ou effet anti transpirant qui correspond à une fermeture stomatique, induite par une teneur élevée en CO_2 de l'atmosphère, qui s'exerce pour la plupart des plantes en C3), ne compensant pas l'effet amplificateur des températures et du rayonnement.

Les maladies des cultures sont surtout sensibles à l'humidité de l'air ou l'humectation (quantité d'eau libre sur le feuillage). Or l'évolution de ces facteurs climatiques n'est pas aussi prévisible qu'il n'y paraît (cf. fiche SANTÉ) car même si la durée d'humectation exprimée en heures a tendance à diminuer, si on l'exprime en degrés-jours humectés on assiste au contraire à une légère augmentation, du fait de l'augmentation globale des températures, et bien souvent les pathogènes réagissent à une combinaison des durées d'humectation et températures.

Au sujet du bilan carboné et azoté de la matière organique du sol, les choses sont complexes (cf. fiche MATIÈRE ORGANIQUE) et, si on ne regarde que les effets de premier ordre, l'augmentation de la température a tendance à augmenter l'activité des micro-organismes du sol et donc la minéralisation de la matière organique, ce qui a tendance à offrir plus d'azote minéral aux cultures. Cependant la sécheresse du sol peut bloquer ces réactions mais limite les lessivages. Au second ordre, il faut compter avec les recyclages des résidus dans les sols qui dépendent de la production. Par ailleurs, la réponse des micro-organismes du sol peut s'adapter à l'augmentation de température.

Les jours disponibles pour les travaux agricoles sont raisonnés en fonction de l'occurrence des dates d'intervention (semis, récolte…) qui dépendent de la température et de la pluviométrie qui influenceent la praticabilité des sols et donc la faisabilité des travaux.

Il s'agit là d'une première appréhension des relations agro-écosystèmes/climat, mais nous verrons qu'il existe des actions combinées et des rétroactions qui rendent l'utilisation de ces modèles indispensable pour réaliser des études d'impact du climat futur.

C Adaptations

De l'écophysiologie des systèmes : exemple de l'adaptation* à long terme des micro-organismes du sol

Parmi les hypothèses d'adaptation à caractère écophysiologique, nous avons testé l'adaptation des micro-organismes du sol à une ambiance édaphique plus chaude, en nous appuyant sur nos connaissances comparatives du comportement de la microflore du sol sous des climats tropical et tempéré. Nous avons testé cette hypothèse avec le modèle STICS afin d'évaluer son effet sur le stockage/déstockage de la matière organique. Pour cela, nous avons fait varier la température de référence de la minéralisation (valeur initiale de 15 °C dans l'hexagone et de 20 °C sous les tropiques) en fonction du réchauffement. Ainsi, la température de référence pour une année donnée « n » est égale à la température de référence initiale plus un écart de température, δT ; où δT représente la différence des températures moyennes entre la période (n – 1 an ; n – 10 ans) et la période 1950-1970.

Des pratiques

Les choix variétaux sont analysés en sortie des modèles puisque, dans toutes les simulations, sont utilisées systématiquement deux variétés communes, aux précocités opposées.

En ce qui concerne les dates de semis, deux approches ont été testées. La première, avec les modèles PANORAMIX, OTELO, CERES et SUNFLO, est un simple échantillonnage de dates de semis possibles dans une large gamme couvrant plusieurs mois autour de la période prescrite. La seconde, avec le modèle STICS, consiste à calculer la date de semis optimale pour l'implantation, en tenant compte de plusieurs facteurs liés à la croissance de la plantule (température de croissance non gélive et sol suffisamment humide) et à la praticabilité du sol (humidité non « tassante »).

Les besoins en irrigation sont calculés par les modèles (STICS et BHV), de sorte que l'indice de stress ne descende pas en dessous du seuil prescrit (0,8 pour le maïs, 0,7 pour le blé, 0,3 pour la vigne). Pour ce faire, dès que l'indice chute sous le seuil, la quantité d'eau d'irrigation est calculée de façon à remplir le réservoir sol, sans pour autant dépasser un seuil technique journalier acceptable (40 mm en aspersion et 10 mm en goutte-à-goutte pour la vigne).

Les doses de fertilisants (STICS, CERES, PASIM) n'ont pas été adaptées aux nouveaux contextes climatiques. Nous verrons par la suite que rien, dans nos résultats, ne permet de justifier une modification fondamentale des doses actuelles. En revanche, les apports ont été effectués à des stades (sauf pour les graminées fourragères où coïncident apports et coupes : STICS et PASIM) qui, eux subissent une anticipation (cf. fiche TIMING).

D Mise en œuvre des modèles

Protocoles de simulations communs (cf. fiche AGRICULTURE)

Afin de rendre les résultats des simulations comparables, des protocoles communs ont été établis en termes de choix de systèmes, de cultures, de variétés, de pratiques et de sol. Cet ensemble définit la vision de l'agriculture dans le projet.

Choix et paramétrage des sols

Les sols choisis l'ont été parmi les profils de sols de la base de données DONESOL, qui présentaient une description complète en termes de texture, de pH, de carbone organique et ce, sur une profondeur suffisante. Pour chaque usage, trois sols ont été sélectionnés, en fonction de leur profondeur et de leur réserve utile* unitaire (RU/profondeur, mm/cm), de la façon suivante :

1 Par usage, les profils ont d'abord été classés en fonction de leur profondeur. Trois sous-groupes de sols sont ensuite sélectionnés : des sols correspondant à des valeurs de profondeur médiane, faible (valeur médiane moins 1,5 x écart interquartile) et forte (valeur médiane plus 1,5 x écart interquartile).

2 Au sein de chacun de ces trois sous-groupes, le sol choisi est celui présentant une valeur médiane de réserve utile unitaire. Cette dernière sélection a été effectuée afin d'éviter de choisir des sols trop particuliers en termes de réserve utile totale.

En plus de ces trois sols choisis par usage, un sol sous grande culture (site de Blosseville) de type limono-sableux profond a été sélectionné. Ce sol a, par la suite, été utilisé comme support de simulations tous modèles confondus, afin de permettre des comparaisons inter-usage. Au contraire, les sols choisis par usage n'ont naturellement été utilisés que pour les couverts et qu'avec les modèles correspondant à cet usage.

Le paramétrage de la densité apparente et des propriétés hydriques des sols a été réalisé à partir des descriptions de ces profils et en utilisant des règles de pédotransfert (relations mathématiques permettant d'estimer les paramètres* hydrodynamiques des sols pour tous types de modèles, à partir de propriétés des sols facilement mesurables) connues (Woesten, 1997 pour les propriétés hydriques et Martin *et al.*, 2009 pour la densité apparente). L'application de ces fonctions de pédotransfert nécessite de connaître les taux de carbone organique et la texture des sols. La réserve utile des sols a, par ailleurs, directement été estimée en utilisant les sorties de ces fonctions.

Entrées climatiques horaires

Pour les modèles nécessitant des données climatiques horaires, des relations physiques et statistiques ont été utilisées pour transformer les données journalières en données horaires.

Pour le rayonnement et la température, la dynamique journalière repose sur l'évolution de la hauteur du soleil au-dessus de l'horizon, les valeurs journalières servant à caler les bornes. Dans le cas de la température, il a été tenu compte des phénomènes d'inertie dus au réchauffement des surfaces et, dans le cas du rayonnement, une correction statistique a été effectuée pour tenir compte des valeurs plus faibles pendant les heures de pluie. La dynamique de l'humidité relative est fondée sur celle de la température en relation avec la température de rosée, calculée elle-même selon l'hypothèse de constance de l'humidité de la masse d'air pour le jour considéré. Enfin, pour le vent, une partition jour/nuit a été effectuée selon une base statistique.

En ce qui concerne la pluviométrie horaire, une méthode statistique de désagrégation a été mise au point. Celle-ci consiste à distribuer, de façon aléatoire, le cumul observé sur les 24 heures de la journée, tout en respectant l'histogramme calculé sur des séries horaires observées et une auto corrélation temporelle.

ET0 et CO_2

Sur la base de simulations réalisées avec le modèle ISBA gazon (Calvet *et al.*, 1998) qui décrit de façon mécaniste les échanges gazeux et la réponse des stomates aux facteurs atmosphériques, nous avons proposé la formule suivante qui permet de tenir compte de l'effet « CO_2 » sur la demande climatique ET0* :

$$ET0_{CO2} = \left(1.1403 - 3.8979 \cdot 10^{-4}\left[CO2\right]\right) \times ET0_{370} \qquad (1)$$

Croissance et CO2

Pour les modèles ne prenant pas en compte l'effet du CO_2, deux équations correctives du rendement ont été proposées, s'appuyant sur les travaux d'Ainsworth *et al.* (2008) :

$$RDT_{CO2} = RDT\left[1 + \alpha \frac{CO_2 - 367}{583 - 367}\right] \qquad (2)$$

avec a = 0,08 si le CO_2 est pris en compte dans le calcul des besoins en eau (ET0 : équation 1) et a = 0,14 dans le cas contraire

Initialisations pour la matière organique (MO) du sol

L'un des aspects essentiels de la modélisation de la dynamique de la MO, est la définition de la valeur de référence à partir de laquelle réaliser les calculs d'évolution. Pour des raisons opérationnelles, nous avons utilisé deux méthodes pour définir cette référence :

- pour les simulations réalisées avec le modèle PASIM et avec le modèle STICS pour les systèmes tropicaux, nous avons considéré que la matière organique initiale (an 1950) était à l'équilibre. La valeur d'équilibre a été calculée par des itérations successives, en utilisant les mêmes modèles, et en tenant compte du climat de l'an 1950 et des pratiques de chaque système (par exemple, une valeur d'équilibre initiale par système simulé). L'impact du changement climatique* a été ensuite calculé comme pour les autres variables : la différence entre la valeur moyenne du FP* ou du FL* et la valeur moyenne de la situation dite actuelle.

- pour le reste des simulations réalisées avec le modèle STICS et avec le modèle CENTURY, nous avons considéré comme référence un scénario sans changement climatique. Ce scénario a été simulé à partir du climat des années 1960, y compris pour sa variabilité interannuelle. L'impact du changement climatique pour un futur donné a été calculé comme la différence des moyennes des scénarios avec et sans changement climatique.

Nous avons vérifié que les deux méthodes fournissaient des valeurs de variation de quantité de matière organique similaires.

Enchaînements annuels

Tous les modèles, sauf PANORAMIX, ont été utilisés en continu de sorte que l'état du sol, à la fin de la simulation de l'année n, a été utilisé comme état initial de l'année n+1.

Modes opératoires

Comme il n'était matériellement pas possible de réaliser un plan d'expérience complet, associant tous les modèles avec tous les sites, tous les scénarios climatiques (au sens large, c'est-à-dire scénarios SRES, modèle de climat, initialisation et méthode de régionalisation) et tous les sols, nous avons défini quatre modes opératoires (tab. 4) dont deux modes standard. Les modes simplifiés ont pour objectif de comparer les modèles ou les climats.

Standard métropole	Standard Antilles	Simplifié modèles	Simplifié climats
12 sites	1 site	2 sites *	2 sites *
3 sols	1 sol	1 sol 1	1 sol
3 méthodes de régionalisation	2 méthodes de régionalisation	1 méthode de régionalisation (TT)	1 variété

** : Toulouse et Colmar*
Tableau 4 : *définition des modes opératoires pour les simulations.*

Notons que, dans le cadre de notre étude prospective, ces modes opératoires peuvent engendrer des situations peu réalistes (par exemple, présence de certains systèmes agricoles ou forestiers dans des sites incongrus), mais ils donnent des éléments comparatifs entre sites ou entre systèmes riches d'enseignement pour la compréhension des phénomènes.

Les variables d'intérêt ou variables socle

Bien qu'un grand nombre de variables soient simulées par les modèles (qui sont stockées dans une base de données de travail), nous avons choisi de porter nos efforts d'interprétation sur quelques variables d'intérêt agronomique ou environnemental (tab. 5), susceptibles de dresser un portrait global de l'évolution des cultures et des systèmes, recouvrant tous les processus-clés en interaction avec le climat. Parmi ces variables, le confort hydrique (cf. fiche EAU) est estimé de façon différente d'un modèle à l'autre, ce qui rend cette variable difficilement comparable.

LES VARIABLES SOCLE	
Cultures	**Systèmes**
Faisabilité*	Restitution d'eau au milieu*
Rendement*	Stockage/déstockage de la matière organique des sols
Dates de semis, floraison, récolte	Lixiviation*
Le confort hydrique*	Nuisibilité des maladies
L'azote dans la plante	Durée d'humectation foliaire*

** voir glossaire*
Tableau 5 : *les variables socle du projet CLIMATOR*

Ce qu'il faut retenir

- ✓ La diversité des systèmes analysés dans le projet CLIMATOR s'appuie sur de nombreux modèles. De plus, pour chaque système, nous avons mis en œuvre plusieurs modèles afin d'approcher l'incertitude épistémique, liée à la différence conceptuelle entre les modèles. Cette différence est importante et peut concerner des processus aussi variés que la prise en compte du CO_2 dans la croissance des plantes ou le bilan hydrique et organique du sol.
- ✓ Cependant, un effort d'homogénéisation important a été réalisé au niveau des paramètres en entrée des modèles et des variables en sortie, ainsi que des modes opératoires de simulation. Cette homogénéisation peut conduire à des situations simulées incongrues, mais assure une certaine robustesse des résultats vis-à-vis des espèces étudiées. Par ailleurs, les modèles sont utilisés dans le cadre actuel d'état des connaissances et un contexte de validation qui leur est propre. Or le projet CLIMATOR les pousse à la limite de leur domaine de validité, ce qui doit nous rendre prudents vis-à-vis des résultats produits. Malgré tout, des adaptations sont envisagées tant au niveau écophysiologique, pour la faune du sol, qu'au niveau des pratiques pour le semis et l'irrigation.
- ✓ Les réponses des mécanismes élémentaires aux facteurs du climat sont souvent contradictoires. Cela rend indispensable l'utilisation des modèles, mais laisse également entrevoir qu'il ne peut pas y avoir de réponse univoque possible au changement climatique.

Ce qu'il faut approfondir...

- ✓ Les aspects adaptatifs aussi bien au niveau de l'écophysiologie des plantes que des pratiques doivent être affinés : gamme variétale plus fournie, recherche d'idéotypes et d'itinéraires techniques optimisés. De plus, le projet ne s'est pas intéressé à des systèmes entièrement nouveaux. Au plan méthodologique, on peut regretter que le nombre de modèles comparables par système/espèce soit faible et ne permette pas d'analyser finement l'incertitude liée aux modèles.

Pour en savoir plus…

Ainsworth, E. A., Leakey, A. D. B., Ort, D.R. Long S. P., 2008 - FACE-ing the facts: inconsistencies and interdependence among field, chamber and modeling studies of elevated [CO_2] impacts on crop yield and food supply. *New Phytologist* 179: 5-9

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.

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

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.

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

Fermaud M., Pieri P., Mimiague F. 2003 - Precursory climatic indices of Botrytis rot development in mature grapes. "Integrated Protection and Production in Viticulture", Volos (Greece), 18-22 march 2003. *Proceedings in IOBC/wprs Bulletin* 26(8), 63-66.

Gate, P., 1995. *Écophysiologie du blé : de la plante à la culture*. Lavoisier Éditeur, Paris, France 424 p.

Gouache D., Couleaud G. 2009 - L*e positionnement des traitements fongicides : enjeu pour la septoriose et intérêt du modèle « Septolis »*. AFPP. IXe conférence Internationale sur les maladies et les plantes, Tours.

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.

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.

Lecœur 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).

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

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.

Martin, M.P., Seen, D.L.O., Boulonne, L., Jolivet, C., Nair, K.M., Bourgeon, G. & Arrouays, D. (2009) - *Soil Science Society of America Journal* 73, 2, 485-493.

Papy F., Aubry C., Mousset J., 1990 - Éléments 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.

Parton W J, Schimel D S, Cole C V, Ojima D S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1987; 51: 1173-1179.

Passioura J.B., 1996 - Simulation models ; Science, snake oil, education, or engineering. *Agron. J.*, 88 : 690-694.

Pieri P., Gaudillère J.-P., 2005 - *Vines water stress derived from a soil water balance model - sensitivity to soil and training system parameters.* XIVe Journées du GESCO, Geisenheim, Germany, 23-27 Août 2005, 457-463.

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.

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 modelling of infection events and plant-pathogen interactions. *Aspects of Applied Biology* 88, Effects of Climate Change on Plants: Implications for Agriculture, pp 135-142.

Woesten, J. H. M., (1997) - Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: Gregorich, E. G., Carter, M. R., editors. *Developments in Soils Sciences*. Amsterdam: Elsevier. p 221-245.

Analyse des sources d'incertitudes et de variabilités

Denis Allard et Nadine Brisson

A 4
Incertitudes et variabilités

A 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 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.

À 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.

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. Ces points seront abondamment illustrés dans les fiches dédiées aux différentes cultures.

À ce stade, il est nécessaire de préciser que n'ont pas été prises en compte dans cette réflexion les incertitudes d'origine socio-économique, elles aussi très importantes ; les aspects liés aux pratiques ne sont considérés que dans leurs déterminants biophysiques.

Il était impossible d'explorer toutes les combinaisons (séries climatiques x sites x modèles de cultures x sols x choix techniques). Nous avons donc privilégié deux modes opératoires :

- le premier considère l'ensemble des sites géographiques pour une série climatique particulière, considérée comme une hypothèse « médiane ». Cette série climatique est constituée du scénario SRES A1B*, du modèle climatique à grande échelle ARPÈGE*, régionalisé par la méthode des types de temps (TT)* ;
- le second considère toutes les séries climatiques sur deux sites seulement : Toulouse, représentatif de la zone de grande culture du sud de la France, et Colmar, illustrant une agriculture diversifiée du nord de la France.

Ce second mode opératoire permet de mesurer l'incertitude liée aux séries climatiques sur deux sites représentatifs. Celle-ci peut être étendue aux autres sites en faisant l'hypothèse, somme toute raisonnable, que la variabilité qui en découle est transposable. Pour l'un ou pour l'autre de ces modes opératoires, on fera varier les modalités des autres facteurs de façon raisonnée pour chaque système ou chaque variable étudiée.

B Méthodologie

Tout au long de cet ouvrage, nous allons utiliser de façon récurrente trois types d'analyse : la représentation en boxplot*, l'estimation des effets et l'analyse de la variance*. Ces trois types d'analyse seront illustrés, dans cette fiche, sur plusieurs variables agro-environnementales dont un indicateur agroclimatique (P-ET0 : le bilan hydrique climatique), le rendement*, le confort hydrique* des cultures et la restitution d'eau aux nappes.

La représentation en boxplot

La représentation en boxplot, qu'on appelle parfois aussi boîte à moustaches, est utilisée quand on souhaite visualiser d'un seul coup d'œil le domaine de variation d'une grandeur lorsque l'on fait varier certains facteurs. Un boxplot (fig. 1 à 5) est une représentation graphique sous forme de boîte autour d'une valeur centrale et prolongée par des segments. La valeur centrale est la médiane (*i.e.*, la quantité telle que la moitié des valeurs étudiées sont inférieures à cette quantité), le côté inférieur (resp. supérieur) est la quantité telle que 20 % (resp. 80 %) des valeurs étudiées sont supérieures à cette quantité. Ces quantités sont appelées les quantiles* à 50, 20 et 80 %. Les traits pointillés prolongent la boîte jusqu'aux valeurs minimum et maximum. Ainsi, 60 % des valeurs appartiennent à la boîte. Cette représentation a plusieurs avantages : d'une part elle permet une lecture aisée à la fois de la tendance centrale, de la variabilité et des dissymétries des extrêmes en fonction des modalités. D'autre part, elle est réputée robuste. En revanche, elle ne permet pas de faire un test statistique rigoureux de comparaison des tendances centrales, ce qui est l'objet de l'analyse des effets.

L'analyse des effets

L'analyse des effets, c'est-à-dire à la fois leur estimation et le test de leur significativité*, se fait en comparant les moyennes d'une variable sur deux des périodes étudiées, par exemple futur proche (FP*) *vs.* passé récent (PR*), de 30 ans chacune. On parle d'analyse en différence, ou en projection. Le test statistique mis en œuvre est un test de différence des moyennes sous hypothèse gaussienne. Cette analyse permet de mettre en évidence qu'un effet jugé significatif globalement (par exemple tous sites confondus) peut en réalité présenter des effets de signe opposé ou jugés non significatifs pour différentes modalités du facteur.

L'analyse de variance

L'analyse de la variance permet de hiérarchiser les différentes sources de variabilité d'une quantité étudiée. L'analyse de la variance consiste à estimer les paramètres d'un modèle* linéaire. Ce modèle explique la variable étudiée par la somme des effets de chacune des modalités des facteurs, à laquelle s'ajoutent les interactions entre facteurs et un résidu considéré comme gaussien. Ce résidu n'a pas pu être expliqué par les effets, soit parce que l'influence d'un facteur est non linéaire, soit parce qu'il manque des facteurs explicatifs. On attribue à chaque facteur une variabilité égale à la somme des carrés autour des effets simples et à une part de la somme des carrés autour des interactions (la moitié pour une interaction d'ordre 2, un tiers pour une interaction d'ordre 3, etc.). Au sein de chacun des facteurs, on peut en outre distinguer ce qui relève des interactions avec un effet lié au changement climatique de ce qui relève des autres interactions.

C Les incertitudes climatiques vues par un modèle agronomique

Comme nous l'avons vu en introduction, les incertitudes sur le climat futur proviennent des scénarios de concentration de gaz à effet de serre et d'aérosols (scénarios SRES), des choix dans les modèles de climats et des méthodes de régionalisation pour passer à l'échelle de la parcelle. Pour illustrer ces incertitudes, nous présentons le déficit hydrique climatique (P-ET0) annuel (fig. 1) ainsi que le rendement du blé issu du modèle STICS dans les conditions standard (fig. 2). Nous verrons plus bas des résultats pour d'autres systèmes de culture*.

Une série climatique particulière joue un rôle central : il s'agit de la série obtenue selon le modèle de circulation générale ARPÈGE pour le scénario A1B (considéré comme un scénario SRES médian), avec une régionalisation par la méthode TT* (cf. fiche CLIMAT). Autour de cette série, qui sera utilisée dans les autres parties de cette fiche, on fait varier les modalités en séparant les graphiques en trois zones. À gauche, on considère deux scénarios SRES alternatifs également simulés avec ARPÈGE mais désagrégés selon la méthode QQ*. Le scénario B1, plus optimiste, présente des concentrations en gaz à effet de serre (GES) plus faibles ; à l'inverse, le scénario A2 est plus pessimiste et contient des concentrations en GES plus élevées. Au centre, pour le scénario A1B et le modèle ARPÈGE, on considère successivement la méthode des quantiles (QQ), la méthode des anomalies (ANO*), le générateur stochastique WACS-Gen (Flécher *et al.* 2009), la méthode des types de temps (TT) pour deux simulations ARPÈGE qui diffèrent par leurs conditions d'initialisation. Les différences observées entre ces deux instances permettent d'appréhender partiellement la variabilité irréductible du climat (ce qu'on appelle parfois le chaos climatique). À droite enfin, on considère quatre autres modèles étudiés par le GIEC, pour le scénario A1B et la méthode de régionalisation TT. Trois périodes sont étudiées.

L'étude du passé récent (PR, 1970-1999) nous permet d'étalonner la variabilité due aux modèles climatiques et à la méthode de régionalisation. La série ANO correspond aux données observées durant cette période. Sa variabilité est donc la variabilité naturelle. Pour les deux variables et les deux sites, on observe que les différences entre les boxplots obtenus pour les différents modèles et/ou différentes méthodes de régionalisation sont du même ordre de grandeur que les différences entre les boxplots des deux initialisations d'ARPÈGE utilisées avec la méthode TT, qui ne représente que le « chaos climatique ». Une méthode diffère toutefois notablement des autres : la méthode QQ présente une variabilité nettement plus importante que toutes les autres séries. On observe également que le rendement du blé est nettement plus variable à Toulouse qu'à Colmar.

Dans le futur proche (FP, 2020-2049), pour la variable P-ET0, les différents scénarios SRES régionalisés par la méthode QQ présentent toujours une variabilité plus importante que toutes les autres séries. Les médianes ne diffèrent pas de façon plus importante entre les différents scénarios SRES qu'entre les différentes méthodes de régionalisation du scénario A1B. Concernant le rendement du blé issu de STICS, il faut distinguer les évolutions à Colmar et à Toulouse. À Toulouse, la variabilité de la méthode QQ reste beaucoup plus élevée que pour les autres méthodes de désintégration. À Colmar, en revanche, la variabilité entre les différents scénarios SRES est aussi importante que celle imputable à la méthode de régionalisation.

Dans le futur lointain (FL, 2070-2099), la variabilité de la variable P-ET0 diminue sensiblement sur les deux sites, sauf pour la méthode QQ. À cet horizon lointain apparaît également très nettement le rôle prégnant du choix du scénario de concentration de GES, qui domine les variabilités imputables aux différentes méthodes de régionalisation. En revanche, sur le rendement du blé, la variabilité augmente très sensiblement, en particulier à Toulouse, car les limites physiologiques étant souvent atteintes, elles entraînent des variations interannuelles très élevées du rendement.

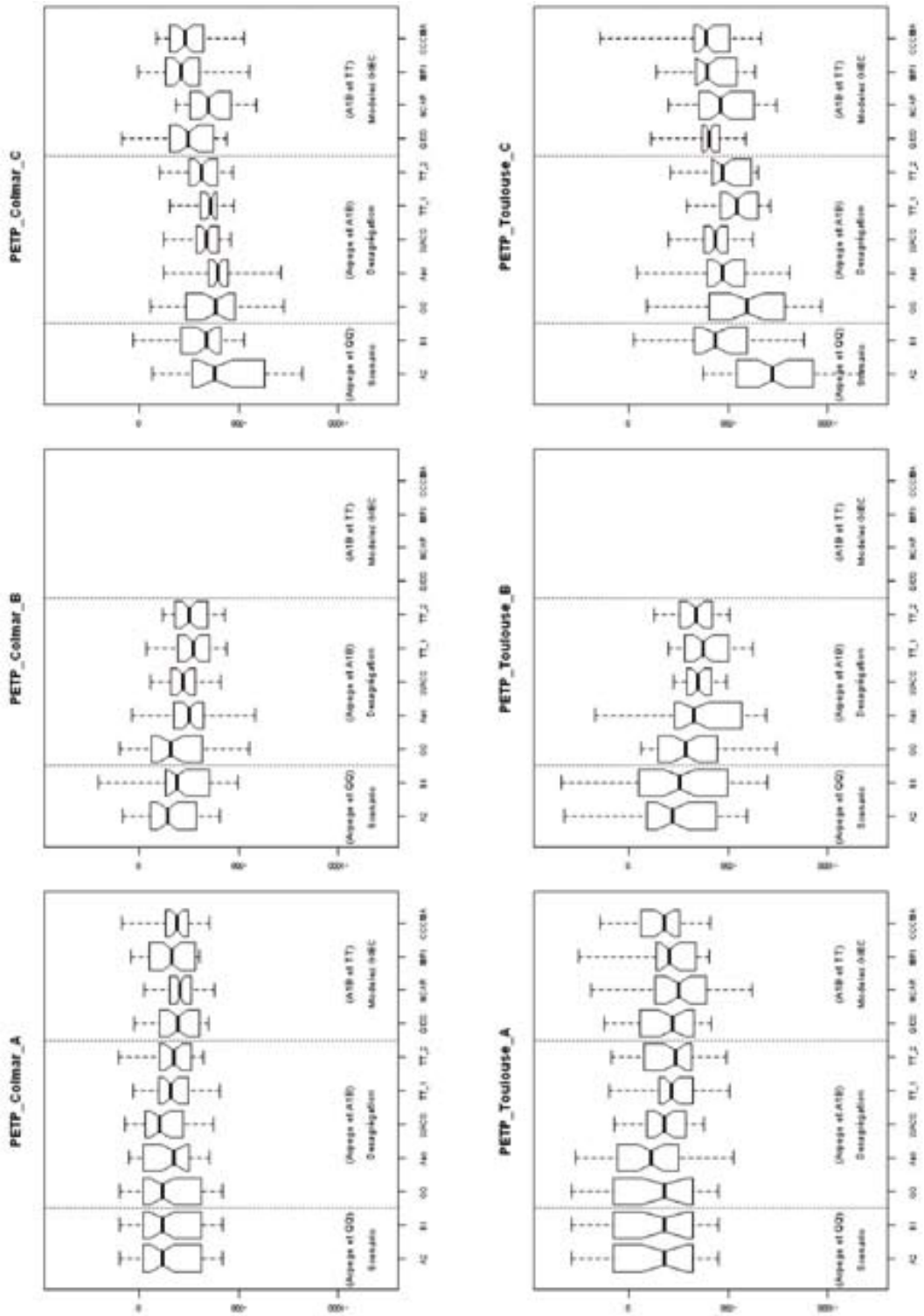


Figure 1 *: boxplots du bilan hydrique climatique P-ET0 pour Colmar (haut) et Toulouse (bas) pour le passé récent (A), le futur proche (B) et le futur lointain (C); pour la période future proche, les modèles issus du GIEC n'ont pas été régionalisés pour la période B.*

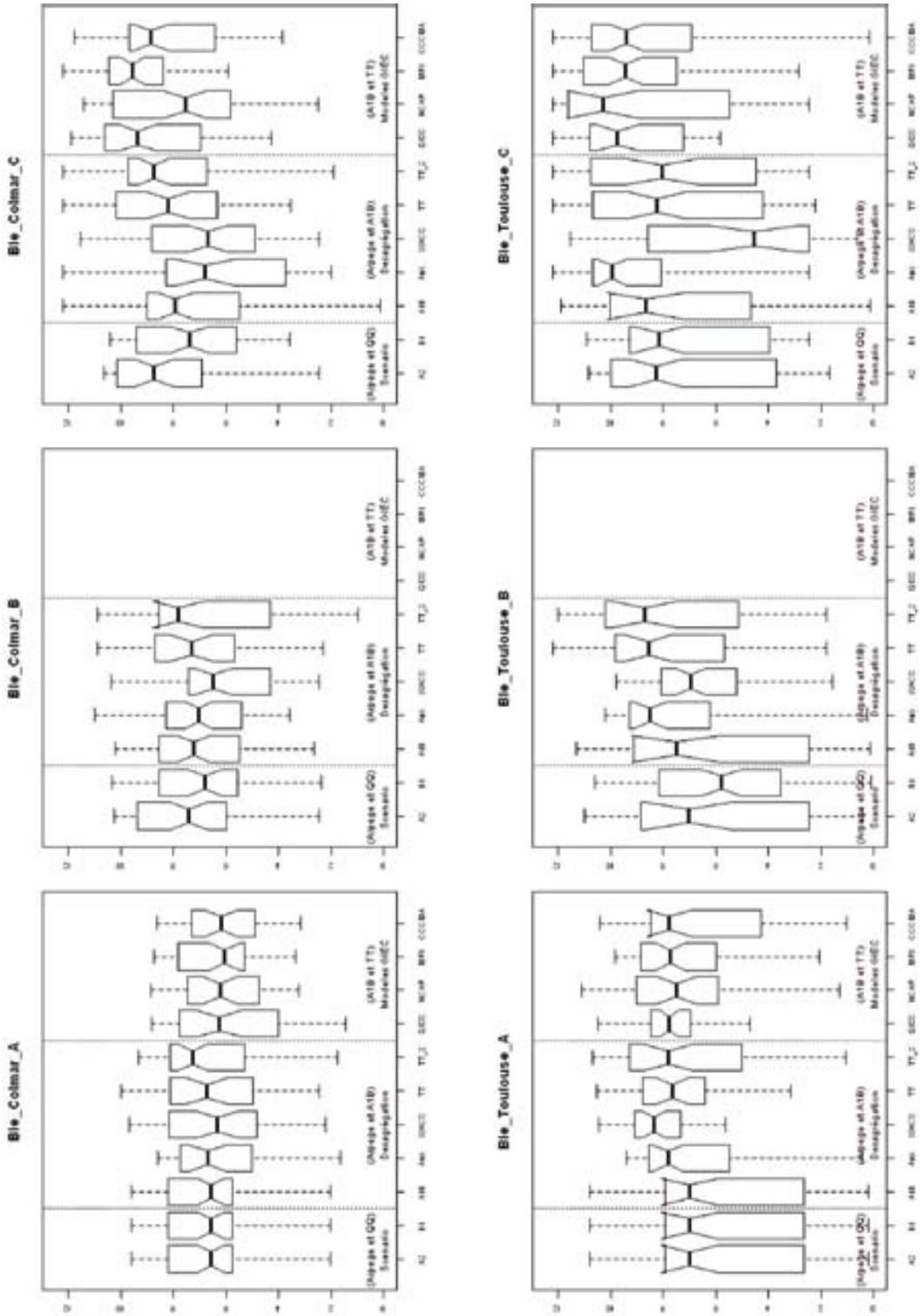


Figure 2 *: boxplots du rendement de blé tendre pour Colmar (haut) et Toulouse (bas), issus de STICS pour le passé récent (A), le futur proche (B) et le futur lointain (C) pour la période futur proche, les modèles issus du GIEC n'ont pas été régionalisés pour la période B.*

D L'impact du changement climatique sur le rendement, vu à travers les sites et les cultures

L'effet du changement climatique pour les douze sites d'étude et pour les huit systèmes agronomiques est résumé dans le tableau 1 par la différence de la moyenne observée entre la période FP et la période de référence PR, et entre les périodes FL et PR, pour la variable rendement. Les cultures étudiées pour le rendement sont (cf. fiche AGRICULTURE) : blé (modèle CERES, système BB), maïs irrigué (modèle STICS système MI), colza (modèle STICS, système MBCB), tournesol et sorgho (STICS, système TBSB), vigne (STICS, système VS), pin (modèle GREACO, système FCM) et fétuque (modèle PASIM, système G).

Période FP – Période PR								
	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-Étienne	**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**

Période FL – Période PR								
	Blé	Maïs	Colza	Tournesol	Sorgho	Vigne	Pin	Fétuque
Avignon	~~0,358~~	**-1,498**	~~0,226~~	~~0,556~~	~~0,197~~	~~-0,089~~	**-0,44**	~~0,31~~
Bordeaux	*0,909*	**-1,540**	~~-0,369~~	*0,420*	0,561	~~0,163~~	**-0,46**	~~-0,16~~
Clermont-Theix	~~0,244~~	**8,228**	**1,727**	**3,895**	**6,291**	**4,104**	**-0,45**	**1,92**
Colmar	*1,698*	**-1,280**	**0,886**	~~0,050~~	~~0,532~~	**0,842**	**-0,49**	~~0,30~~
Dijon	*1,496*	**-0,760**	**0,952**	~~0,148~~	0,673	**0,726**	**-0,60**	*0,77*
Lusignan	~~0,140~~	**-1,107**	*0,821*	~~0,349~~	~~0,513~~	**0,481**	**-0,84**	*-0,54*
Mirecourt	1,303	**3,449**	**2,519**	**3,177**	**5,715**	**4,220**	**-0,06**	**1,05**
Mons	*0,974*	**2,503**	~~-0,122~~	**2,204**	**4,671**	**3,187**	**-0,52**	~~0,06~~
Rennes	~~-0,305~~	~~-0,224~~	~~0,562~~	**1,576**	**4,001**	**1,880**	**-0,30**	~~-0,43~~
St-Étienne	**2,643**	**-1,558**	**1,507**	~~-0,001~~	~~-0,168~~	0,270	**-0,66**	*-0,80*
Toulouse	*1,472*	**-1,846**	~~0,241~~	~~-0,284~~	-1,169	**-0,448**	**-0,91**	~~-0,36~~
Versailles	*0,841*	**0,854**	~~0,278~~	**1,583**	**3,802**	**2,276**	**-0,29**	~~-0,34~~
Tous	**0,981**	**0,435**	**0,769**	**1,139**	**2,135**	**1,468**	**-0,50**	**0,150**

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

Le point certainement le plus important à noter est qu'un effet jugé significatif globalement peut cacher des évolutions localement contrastées ou localement non significatives. C'est le cas par exemple du maïs irrigué, dont le rendement peut significativement baisser ou augmenter selon les sites considérés, alors que l'effet global sur les douze sites étudiés est statistiquement positif. Le résultat global ne doit cependant pas être extrapolé à l'ensemble du territoire, car les sites ne représentent pas toutes les régions de culture. Il faut également souligner que les effets constatés peuvent dépendre du modèle agronomique choisi, comme cela sera illustré dans certaines des fiches cultures. Ces précisions étant faites, les tableaux ci-dessus permettent de faire les observations générales suivantes :

- le sens de variation des effets, lorsqu'il y en a, est conservé entre le FP et le FL, sauf pour la fétuque (cf. fiche PRAIRIES pour plus de détails) ;
- on constate une baisse de rendement du maïs irrigué dès le FP, fortement accentuée en FL, dans les grandes régions de culture actuelle (Sud-Est, Sud-Ouest, Ouest et Nord-Est). En revanche, on observe une hausse du rendement dans les marges actuelles : Centre-Nord et Nord-Est ;
- on peut s'attendre à une hausse du rendement de la vigne, sauf à Toulouse où il baisse et à Bordeaux et Avignon où il n'y a pas de tendance significative ;
- colza, sorgho et tournesol voient leur rendement augmenter de façon significative dans les sites du Nord ou en montagne. Dans les sites du Sud, on n'observe pas d'effet significatif, sauf à Toulouse où on constate une baisse significative du rendement ;
- le pin est un cas à part. On observe une baisse significative du rendement pour tous les sites (sauf à Mirecourt en FP). Ce résultat tout à fait singulier est dû à la physiologie de cette culture, pour laquelle l'impact du climat perdure durant plusieurs années et qui ne bénéficie pas de l'effet anti transpirant du CO_2 (cf. fiche FORÊT). L'élévation des températures est défavorable au rendement du pin ; sa physiologie entraîne que les rendements en périodes futures sont systématiquement inférieurs à la moyenne de la période de référence. La baisse de rendement est donc jugée fortement significative ;
- d'une façon générale, les sites qui voient les rendements augmenter pour plusieurs cultures sont plutôt dans les zones Nord-Est, Centre-Nord et Ouest (Mirecourt, Mons-en-Chaussée, Rennes), ou en montagne (Clermont).

E L'incertitude liée aux modèles agronomiques

Des modèles de culture construits avec des objectifs et/ou des partis pris de modélisation différents aboutiront, pour des conditions identiques, à des variables de sortie différentes. Si ces modèles varient dans le même sens pour des variations identiques des conditions, les résultats obtenus par ces modèles se renforcent. La variabilité liée aux modèles agronomiques sera illustrée dans le cas du rendement du blé pour trois modèles (CERES, STICS et PANORAMIX), du confort hydrique d'un peuplement de conifère (ETR/ETM) pour deux modèles de forêts (GREACO et BILJOU) et de PERCOL (cf. fiche EAU) sur la vigne pour deux modèles (BHV et STICS). Le sol, le climat (A1B ARPÈGE TT), les choix variétaux et les pratiques sont rigoureusement identiques entre les modèles.

Évolution du rendement du blé, vu par différents modèles

Pour toutes les périodes étudiées, on peut constater (fig. 3) une variabilité plus élevée pour les modèles CERES et STICS que pour PANORAMIX ; cette différence s'accentue dans le futur. Le modèle PANORAMIX est peu sensible aux variations de période ou de site. En rapprochant cette figure de la figure 1, on note que les différences entre les modèles de culture sont du même ordre de grandeur que celles entre les différents modèles de climats ou de régionalisation.

En règle générale, CERES prédit un rendement plus élevé que PANORAMIX, lui-même supérieur à STICS. Cela entraîne qu'à l'exception de PANORAMIX, CERES et STICS prédisent sur les deux sites des évolutions concordantes, à la fois en médiane et en variabilité. Dans ce cas, la variabilité des modèles, loin de nous empêcher de conclure, renforce la significativité de la tendance.

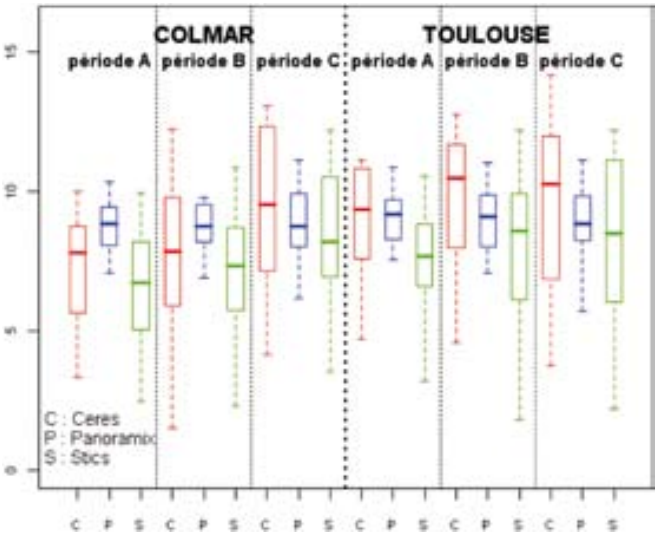


***Figure 3** : boxplots du rendement du blé à Colmar et Toulouse, pour les 3 périodes (A=PR, B= FP et C= FL) et trois modèles.*

Le confort hydrique ETR/ETM pour deux modèles de forêts

Nous voyons dans ce cas-ci (fig. 4) que la variabilité des deux modèles est assez comparable. Le modèle GRAECO prédit des valeurs ETR/ETM supérieures au modèle BILJOU (sauf à Colmar en FL). Dans ce cas à nouveau, les deux modèles évoluent de façon similaire, renforçant la significativité de la tendance.

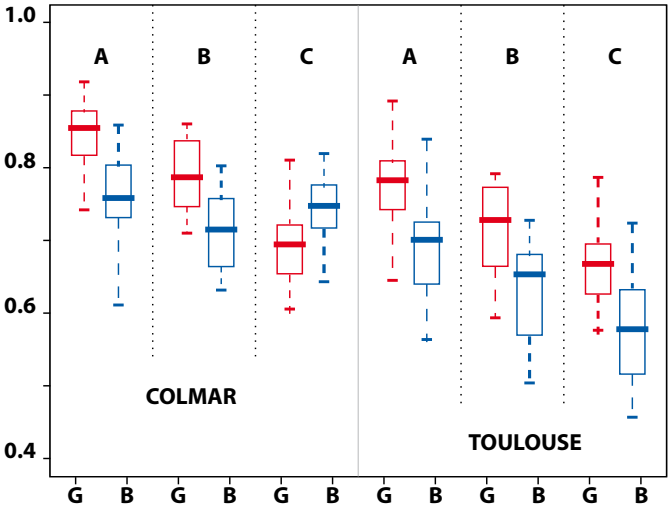


Figure 4 *: boxplots de la variable ETR/ETM en deux sites (Colmar et Toulouse), pour les trois périodes et pour deux modèles de pins : GRAECO (G) et BILJOU (B).*

La restitution d'eau aux nappes pour deux modèles de vigne

La figure 5 présente la variable PERCOL pour deux modèles de vigne, BHV et STICS. Malgré le fait que STICS et BHV diffèrent, il est intéressant de noter qu'ils prédisent tous deux une diminution de l'alimentation en eau des nappes dans le futur, avec un seuil de comportement qui se situe entre PR et FP pour Colmar et entre FP et FL pour Toulouse.

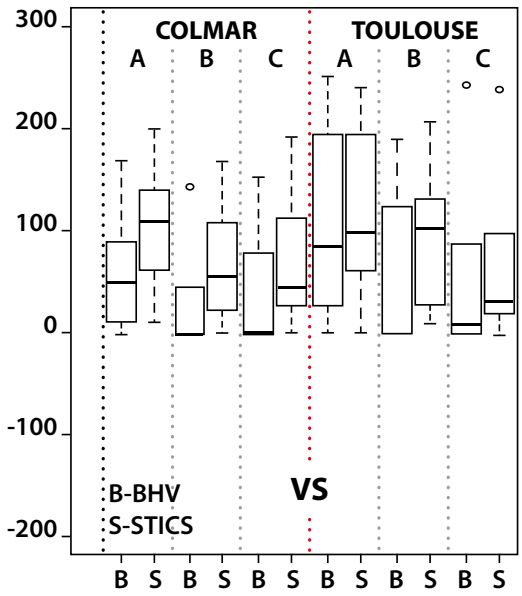


Figure 5 *: boxplots de la variable PERCOL en deux sites pour les trois périodes et deux modèles de vigne conduite en pluvial : BHV (B) et STICS (S).*

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

Dans cette dernière partie consacrée aux incertitudes, nous allons hiérarchiser les facteurs de la variabilité, en mettant en exergue la part de variabilité due au changement climatique qui est en interaction avec d'autres sources de variabilité. Cette étude sera menée sur le rendement obtenu pour le modèle PANORAMIX avec le scénario climatique standard (A1B ARPÈGE TT) pour les 30 années des trois périodes, PR, FP et FL. On considère trois types de sol, huit dates de semis (du 20/09 au 10/11) et les douze sites.

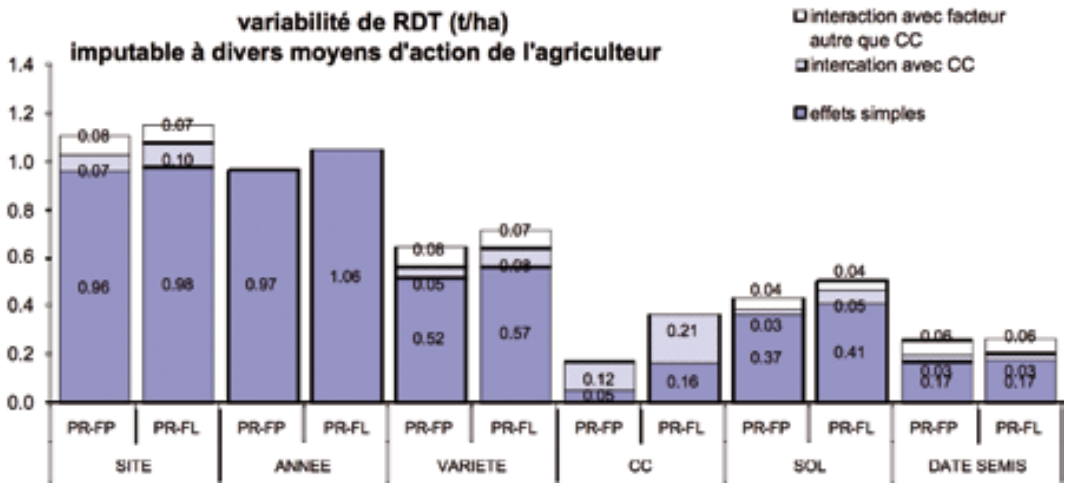


***Figure 6** : analyse de la variance pour le rendement de blé simulé avec PANORAMIX. Pour chaque facteur, en bleu uni la part de variance correspondant à l'effet simple ; en bleu hachuré, la part de l'interaction avec la période (CC) ; en transparence, la part de l'interaction avec d'autres facteurs que la période. Le CC a été considéré séparément pour l'horizon proche (FP) et l'horizon lointain (FL).*

La variabilité représentée est la somme des carrés des effets simples, plus la part de la somme des carrés correspondants aux interactions (par exemple un tiers de la somme des carrés correspondant à une interaction triple est attribué à chacune des variables). Au sein des interactions, on distingue les interactions avec l'effet période (en bleu hachuré) des autres (transparents). On observe que :

- les variabilités principales sont bel et bien la variabilité interannuelle et la variabilité géographique ; même en contexte de changement climatique, il restera des différences importantes d'une année à l'autre, et entre le Nord et le Sud ;
- au second ordre, apparaissent les variabilités liées à d'autres facteurs : variété, sol, date de semis et période ; une part importante de la variabilité de la période (autour de la moitié environ) est en interaction avec d'autres facteurs ; c'est dans ces interactions que résident les principales possibilités d'adaptation de l'agriculteur ; au premier chef, apparaît le facteur site.

Ces éléments de conclusion sont valables pour le modèle PANORAMIX et, compte tenu de sa faible réactivité au changement climatique (voir § E), nous avons conduit la même analyse avec le modèle CERES. La grande sensibilité du modèle CERES aux accidents climatiques et sa réactivité à l'évolution tendancielle du climat (fig. 3) aboutit à un classement différent des sources de variabilité (fig. 7). Le choix du sol prend de l'importance tandis que le choix variétal devient secondaire. Si le changement climatique atteint 10 % de la variance, son poids est, comme précédemment, à relativiser par rapport aux poids cumulés des effets année et site.

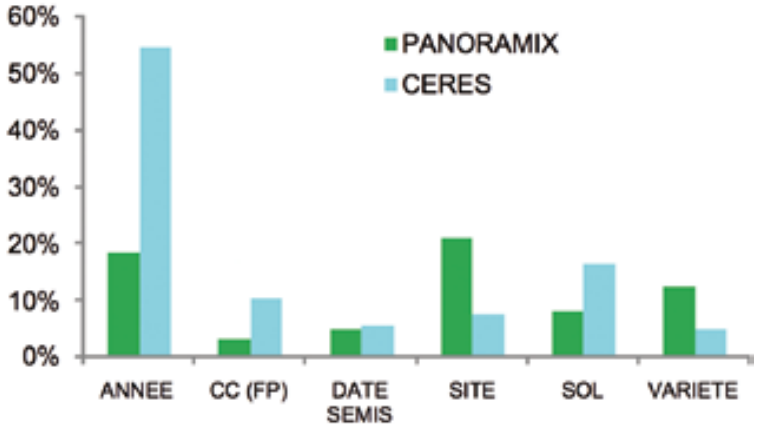


***Figure 7** : comparaison de PANORAMIX et STICS en termes de hiérarchisation des sources de variabilité (même protocole que pour fig. 6), exprimée en % de la variance totale, les modalités pour le changement climatique étant uniquement PR et FP.*

Ces résultats dépendent donc des modèles, des variables et des systèmes considérés ici. Ils ne peuvent en aucun cas être généralisés tels quels à tous les systèmes et/ou toutes les variables. Des analyses plus détaillées, pour des systèmes et des variables particuliers, se trouvent dans les fiches dédiées.

Ce qu'il faut retenir

- ✓ Trois méthodes ont été retenues pour explorer et quantifier les incertitudes et sources de variabilité. L'analyse en boxplot 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, avec leur significativité et par une hiérarchisation des sources de variabilité, y compris l'effet résiduel de la variabilité interannuelle.
- ✓ Ces méthodes ont été appliquées dans le cadre de quatre questionnements permettant de cerner comment les incertitudes relatives au CC se positionnent par rapport aux autres sources d'incertitudes et de variabilité.
- ✓ En ce qui concerne l'ensemble des composantes de l'incertitude climatique, 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 dû au choix du scénario domine largement les effets dus à la méthode de régionalisation.
- ✓ L'analyse des effets du changement climatique décomposée par site 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.
- ✓ 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.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ Considérer l'ensemble des incertitudes et sources de variabilité dans un croisement exhaustif de leurs modalités n'a pas été matériellement possible.
- ✓ Ainsi pour l'étude climatique, l'analyse a été réalisée sur deux sites seulement (Toulouse et Colmar). Toutefois ses conclusions peuvent être généralisées aux autres sites, sous l'hypothèse que la variabilité due aux séries climatiques est transposable aux autres sites.

Pour en savoir plus…

Flécher, C., P. Naveau, D. Allard, and N. Brisson (2010) - A Stochastic Daily Weather Generator for Skewed Data. *Water Resour. Res.*, doi:10.1029/2009WR008098, in press.

IPCC, 2007 - *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* Cambridge, UK: Cambridge University Press.

RexHyss, 2009 - Projet GICC. http://www.sisyphe.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/

B

Les thèmes

Les thèmes

B

Cette partie traite de façon transversale des effets du changement climatique sur les productions végétales, dans un regard qui se veut complémentaire des logiques de filières ou des logiques géographiques. Six enjeux agricoles et environnementaux forts sont traités.

- **B1 - Timing**
  Modification des calendriers culturaux en réponse (pour l'essentiel) à l'accroissement des températures.

- **B2 - Eau**
  Évolution de l'alimentation en eau des cultures et de la reconstitution des aquifères en réponse aux modifications des précipitations et d'évapotranspiration.

- **B3 - Irrigation**
  Avenir de l'irrigation en lien avec les modifications de bilan hydrique et l'accélération des rythmes phénologiques.

- **B4 - Matière organique**
  Évolution du stock de matière organique (donc de carbone) dans les sols en lien notamment avec les conditions de température et d'humidité.

- **B5 - Santé**
  Pression phytosanitaire sur les espèces cultivées en lien avec l'évolution des condition d'humidité et de température notamment.

- **B6 - Rendement**
  Tendances d'évolution des rendements, variable intégrative par définition, en lien avec l'ensemble des conditions pédoclimatiques ayant prévalu durant chaque cycle cultural.

Ces fiches, qui permettent des développements importants sur les mécanismes en jeu, offriront au lecteur une meilleure compréhension des interactions entre changement climatique et croissance et développement des plantes.

Anticipation des stades phénologiques et raccourcissement des phases

B 1
Timing

Philippe Gate, Nadine Brisson

A Le développement* des plantes

La température est le moteur du développement

La vitesse de développement des plantes dépend de la température dans une gamme qui varie avec l'espèce considérée. La température minimale à partir de laquelle le développement se manifeste est appelée « zéro de végétation » (il correspond à 0 °C pour le blé, 4.8 °C pour le tournesol, 6 °C pour le maïs, 10 °C pour la vigne, 12 °C pour la canne à sucre et 14 °C pour la banane). À partir du zéro de végétation, la vitesse de développement est proportionnelle à la différence « température journalière–zéro de végétation » jusqu'à un seuil maximal souvent proche de 30 °C pour de nombreuses espèces cultivées (notion de sommes de dégrés-jours : Durand, 1967). Pour l'ensemble des espèces, le principal moteur du développement est donc la température : face à une élévation des températures attendue par le changement climatique*, on peut donc s'attendre à une anticipation* des stades phénologiques*. Cette anticipation des stades aura des conséquences variables sur la durée des cycles, selon qu'il s'agit de plantes annuelles ou pérennes. Pour certaines espèces comme le maïs, le sorgho, le tournesol et la vigne, le zéro de végétation élevé peut être aujourd'hui un frein aux semis très précoces dans certaines régions.

Ce rôle général de la température peut être modulé en fonction de certaines spécificités.

Frein du rôle moteur de la température selon les espèces

L'action de la température peut être freinée par la photopériode (durée entre le lever et le coucher du soleil) pour certaines espèces, comme les céréales à pailles en général et le blé en particulier, les graminées fourragères ou le colza. Ainsi, une élévation des températures à un moment où la durée du jour est limitante (automne, hiver, début de printemps) aura moins d'impact sur l'anticipation des stades, et ce d'autant plus que la variété est photosensible (exigeante en durée du jour) et que le semis est précoce à l'automne.

Pour certaines espèces, le passage de l'état végétatif à l'état floral exige un séjour à des températures basses, avec un effet retardant des températures trop basses ou trop élevées. Ainsi, paradoxalement, des températures trop élevées pendant cette phase végétative du cycle, qui permet à la plante de passer à un état dit « vernalisé », peuvent se traduire par un allongement de la période végétative. Ce scénario peut se produire pour les espèces comme le blé, les graminées fourragères ou le colza, mais aussi pour la vigne où l'on parlera plutôt de « dormance ».

Positionnement calendaire du cycle

Nous travaillons sur trois grands types d'espèces : des espèces d'hiver, semées à l'automne, dont le cycle s'étale de la fin août (colza) ou tout début octobre (blé) jusqu'à l'été (juin à mi-août), des espèces de printemps semées, selon les régions, entre avril et mai avec des récoltes de fin septembre à fin octobre, et enfin des espèces pérennes comme la vigne dont la période entre floraison et maturité est positionnée de façon intermédiaire entre les deux types précédents. En ce qui concerne les cultures pérennes récoltées pour leur biomasse (prairies, forêt), l'ensemble de l'année est mis à profit et c'est plutôt les capacités de croissance* des plantes qui doivent être prises en compte.

Situation géographique

L'offre thermique locale, que l'on peut calculer comme une statistique sur plusieurs années, est différente d'une région à l'autre. Il existe, en effet, un gradient Nord-Sud mais également un gradient Ouest-Est lié au caractère plus ou moins continental de notre climat* hexagonal. En fonction des saisons, les températures sont donc plus ou moins proches des températures cardinales des espèces pour le développement (zéros de végétation, seuil maximal). Cet élément local est important, car l'anticipation consécutive au changement climatique dépendra à la fois du réchauffement estimé mais aussi de cet état initial. Par ailleurs, pour les espèces photosensibles, la latitude est à prendre en compte.

B Comportement attendu et variables étudiées

L'ensemble de ces éléments va se traduire par des différences de comportement entre les espèces comme l'indique la figure 1. En effet, compte tenu du positionnement calendaire de leur cycle, les espèces de printemps vont être confrontées à la fois à l'anticipation des stades et au raccourcissement de la phase de remplissage du grain (tournesol, maïs, sorgho). Cela est lié au fait que ces cultures ont un cycle à cheval sur le maximum thermique annuel et donc l'anticipation de la floraison va conduire la plante à effectuer son remplissage à une période où la température est plus proche du maximum thermique, accentuant ainsi l'effet du réchauffement moyen. Comparativement, les espèces d'hiver n'ont pas les mêmes problèmes, car, le cycle étant tout entier inclus dans la période de température croissante, l'anticipation permet aux phases de se dérouler à des températures voisines. Cependant, ces considérations étant à dates de semis fixes, on peut s'attendre à des modifications de ce schéma en ajustant les combinaisons entre la date de semis et la précocité variétale.

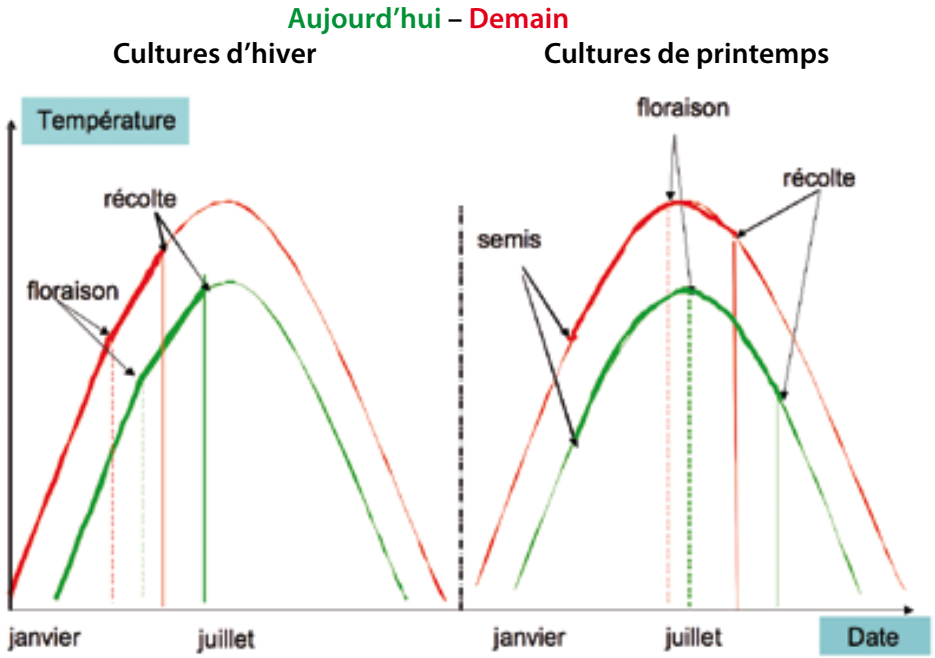


***Figure 1** : schéma du principe de la différence d'impact du réchauffement climatique sur les cultures d'hiver et les cultures de printemps, à date de semis fixe.*

Pour analyser ces comportements, nous avons retenu trois variables clés : la floraison, la récolte et la durée entre ces deux stades qui représente la durée de remplissage des organes récoltés pour les cultures annuelles et la vigne, cultures sur lesquelles seront focalisées nos analyses. En plus de la variabilité entre espèce et sites, une attention particulière sera portée à l'incertitude induite soit par les modèles agronomiques, soit par les méthodes de régionalisation* du climat.

C 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 qui a des conséquences importantes à la fois sur les choix techniques de l'agriculteur, y compris pour ses calendriers de travaux, et sur le comportement écophysiologique des cultures qui vont connaître un décalage entre leurs phases de développement et les contraintes du milieu.

Spécificités des cultures et des sites

L'anticipation de la date de récolte (à date de semis inchangée) est très variable entre les cultures (tab. 1) et la hiérarchie entre celles-ci est conforme aux indications données précédemment. En effet, ce sont les cultures d'hiver vernalisantes et photosensibles (blé et colza) qui subissent l'anticipation la plus modeste avec un ordre de grandeur de 8 jours pour le futur proche (FP*) et de 16 pour le futur lointain (FL*). En matière de variabilité géographique, on notera le comportement relativement stable du blé par rapport à celui du colza pour lequel l'anticipation semble plus forte au sud qu'au nord.

Périodes	FP						FL					
Sites	Blé	Maïs	Colza	Tournesol	Sorgho	Vigne	Blé	Maïs	Colza	Tournesol	Sorgho	Vigne
Avignon	**-7.9**	**-12.0**	**-10.0**	**-9.5**	**-8.3**	**-12.9**	**-12.7**	**-22.8**	**-13.4**	**-18.3**	**-17.2**	**-22.9**
Bordeaux	**-8.0**	**-19.4**	**-10.3**	**-14.4**	**-14.2**	**-12.6**	**-14.3**	**-34.5**	**-19.2**	**-26.4**	**-26.0**	**-25.4**
Clermont	**-10.3**	-	-	-	-	-	**-19.2**		-	-	-	-
Colmar	**-9.4**	**-25.8**	-	**-14.4**	**-18.5**	**-15.4**	**-17.9**	**-39.4**	-	**-24.1**	**-30.6**	**-28.2**
Dijon	**-9.5**	**-29.2**	-	**-15.7**	**-20.7**	**-16.5**	**-18.6**	**-44.7**	-	**-26.5**	**-34.3**	**-30.1**
Lusignan	**-9.2**	**-22.8**	**-6.8**	**-15.0**	**-19.7**	**-15.0**	**-17.6**	**-37.4**	**-15.9**	**-26.9**	**-33.8**	**-29.3**
Mirecourt	**-9.2**	-	-	-	-	-	**-18.3**		-	-	-	-
Mons	**-9.5**	**-43.7**	*-2.2*	**-12.4**	**-15.8**	**-33.7**	**-18.7**	**-65.5**	**-10.8**	**-29.0**	**-35.1**	**-49.3**
Rennes	**-9.1**	**-26.6**	**-8.5**	**-13.4**	**-16.2**	**-26.1**	**-17.0**	**-44.6**	**-15.1**	**-27.5**	**-33.3**	**-40.4**
St Étienne	**-8.7**	**-21.0**	**-9.0**	**-14.4**	**-17.9**	**-15.6**	**-17.4**	**-34.8**	**-17.0**	**-24.3**	**-29.6**	**-27.9**
Toulouse	**-8.9**	**-19.1**	**-12.7**	**-13.5**	**-13.2**	**-13.8**	**-14.6**	**-34.2**	**-18.4**	**-25.0**	**-24.4**	**-25.5**
Versailles	**-9.3**	**-32.9**	*-3.3*	**-15.3**	**-16.0**	**-29.3**	**-18.1**	**-51.9**	**-14.4**	**-28.6**	**-33.7**	**-43.4**
Tous sites	**-9.0**	**-25.3**	**-7.4**	**-13.8**	**-16.1**	**-19.1**	**-16.7**	**-41.0**	**-14.5**	**-25.7**	**-29.8**	**-32.2**

Tableau 1 : *évolution de la date de récolte de 5 cultures (à date de semis fixe) dans le cadre de leur conduite actuelle (variétés à cycle long à Toulouse, Bordeaux et Avignon et court ailleurs). La significativité de l'évolution par rapport à la variabilité interannuelle est notée de la façon suivante :* **Gras** *($p < 0.01$), Italique ($p < 0.05$). Le blé est simulé avec le modèle CERES et les autres cultures avec le modèle STICS, la méthode de régionalisation est TT.*

À l'opposé, on trouve les cultures de printemps, au premier rang desquelles le maïs subit la plus forte anticipation (de l'ordre de 25 jours en FP et 41 jours en FL), en particulier au nord. La vigne est également largement affectée en dépit de son caractère pérenne qui lui permet d'anticiper le débourrement et donc le démarrage de la végétation.

En tendance, on note que l'anticipation sera d'autant moins prononcée que le site est initialement chaud.

Pour deux sites qui se comportent de façon opposée, Toulouse et Versailles, la figure 2 permet d'analyser la décomposition entre anticipation de la floraison et réduction du remplissage. Nous retrouvons le fait que les cultures d'hiver subissent essentiellement une anticipation de la floraison et que la diminution du remplissage excède rarement 5 jours (elle peut même être allongée chez le colza). En revanche, pour les cultures de printemps, il faut s'attendre à une réduction sensible de durée du remplissage, préjudiciable au rendement, de l'ordre de 10 à 20 jours pour le maïs en FP (les réductions les plus importantes se localisant au nord) et de l'ordre de 8 jours pour le tournesol (moins sensible à la variabilité géographique). En ce qui concerne la vigne, l'anticipation de la floraison, plus importante que celle du maïs, engendre une réduction de la durée de

maturation plus faible que celle du maïs. Ce résultat s'explique par le fait que les températures en automne et en hiver ont provoqué un débourrement plus précoce et donc un déplacement plus important du cycle vers le printemps, ce qui limite la diminution de la durée de remplissage par rapport au maïs. C'est un exemple intéressant qui préfigure comment pourrait être modifié le cycle du maïs en anticipant les dates de semis.

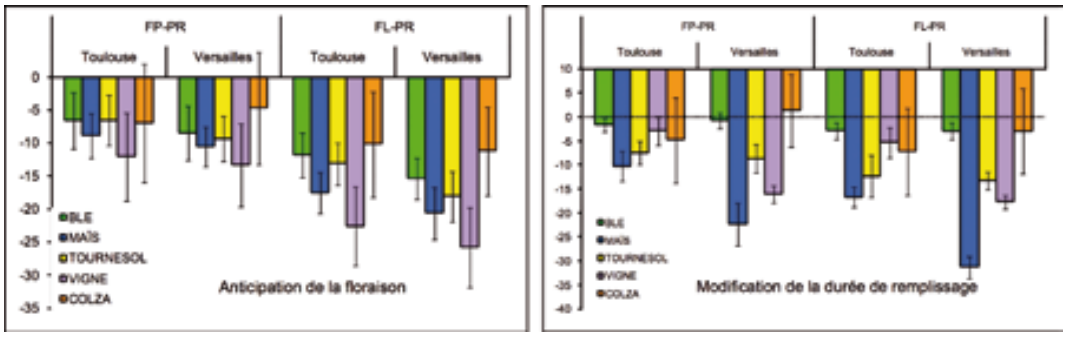


***Figure 2** : anticipation de la floraison (gauche) et modification de la durée du remplissage (droite) et variabilité interannuelle pour cinq cultures et deux sites (variabilité adaptée à chacun d'eux) avec la méthode de régionalisation TT (blé simulé par CERES et autres cultures par STICS) et les deux périodes FP et FL.*

L'effet des variétés

En ce qui concerne l'anticipation de la floraison, une analyse du rôle exercé par les variétés montre que ce dernier s'avère marginal pour le blé (les différences d'anticipation sont de l'ordre de la journée entre les variétés Soissons, Charger et Arminda), les écarts restant faibles même pour les espèces semées au printemps.

Concernant la maturité, les résultats mettent en évidence des différences variétales plus prononcées. Par exemple, pour le tournesol, le choix variétal se traduit par des écarts d'anticipation d'environ 10 jours entre Prodisol, la variété précoce, et Mélody, la variété tardive qui anticipe davantage. De façon générale, pour les espèces de printemps, l'anticipation est plus forte pour les variétés à cycle long. C'est également vrai pour la vigne, même si l'effet est plus modeste : le grenache, cépage le plus tardif, anticipe un peu plus que le chardonnay et le merlot. À contrario, pour les cultures d'hiver, on note la tendance inverse, avec toutefois une amplitude plus réduite : l'anticipation est légèrement plus élevée pour les variétés précoces (précocité à la montaison). 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 : elles profitent donc moins de l'opportunité des fortes températures.

Les incertitudes

Quels que soient les espèces, les modèles et les situations géographiques, la méthode de régionalisation QQ donne systématiquement un niveau d'anticipation plus faible (fig. 3). C'est une source d'incertitude non négligeable, la plupart du temps plus importante que la différence entre modèles (fig. 4).

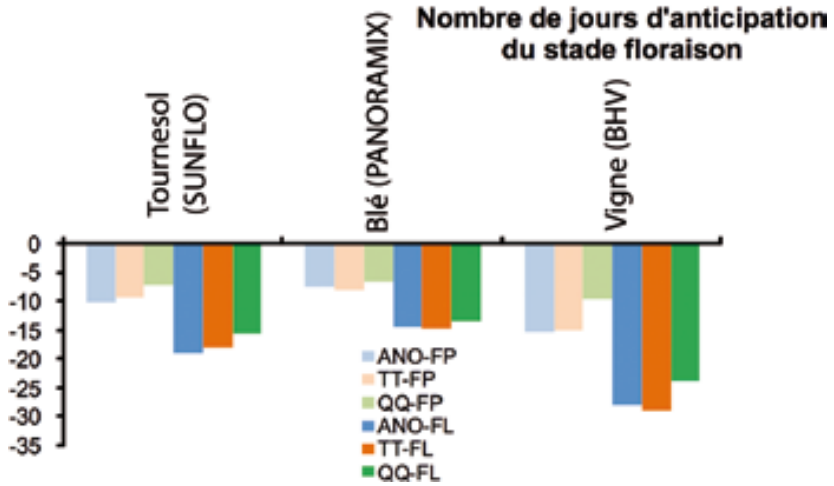


Figure 3 *: valeurs médianes de l'anticipation de la floraison en jours (pour l'ensemble des variétés étudiées) pour trois cultures simulées par trois modèles différents.*

Les écarts liés aux modèles phénologiques utilisés dans les différents modèles agronomiques sont réduits, avec toutefois des tendances systématiques : par exemple pour le blé, STICS est systématiquement plus précoce que CERES ou PANORAMIX.

En ce qui concerne la vigne, la grande différence entre les modèles STICS et BHV s'explique par le fait que le premier calcule la date de récolte sur la base de la teneur en sucre accumulée dans la baie de raisin alors que, pour le second, elle résulte juste d'une accumulation de degrés-jours (en base 10) depuis la floraison.

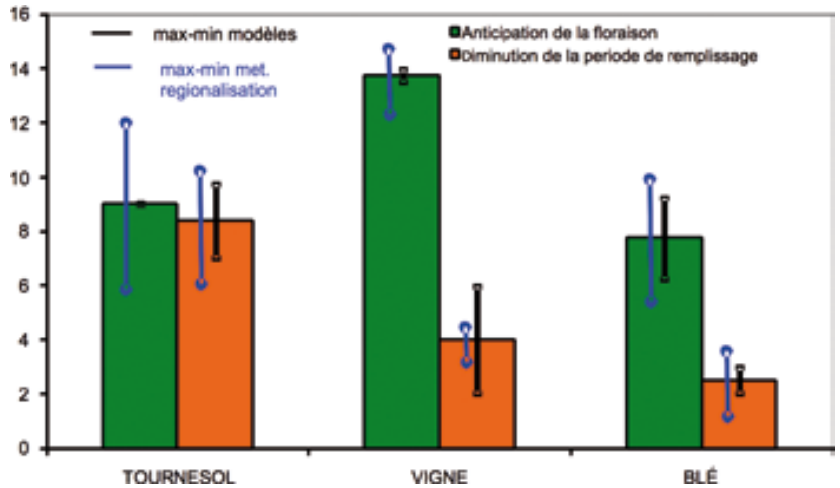


Figure 4 *: anticipation de la floraison et raccourcissement du remplissage pour le tournesol, la vigne et le blé à Toulouse. Incertitudes liées aux modèles agronomiques (STICS, SUNFLO, BHV, PANORAMIX) et aux méthodes de régionalisation des modèles climatiques.*

D Le réchauffement : moteur de l'anticipation

Cherchant à mieux cerner la source d'incertitude liée aux méthodes de régionalisation du climat, qui représentent bien la gamme des incertitudes de type climatique (cf. fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS), 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. Ceci présente l'intérêt de relier directement l'anticipation des stades au réchauffement annuel, caractéristique des scénarios climatiques futurs (et en particulier ceux du GIEC*) la plus utilisée. Par exemple pour le stade floraison (fig. 5), le modèle STICS prévoit une anticipation moyenne de 5,8 jours par degré de réchauffement annuel pour le blé, cette valeur étant de 8,6 jours pour la vigne avec BHV.

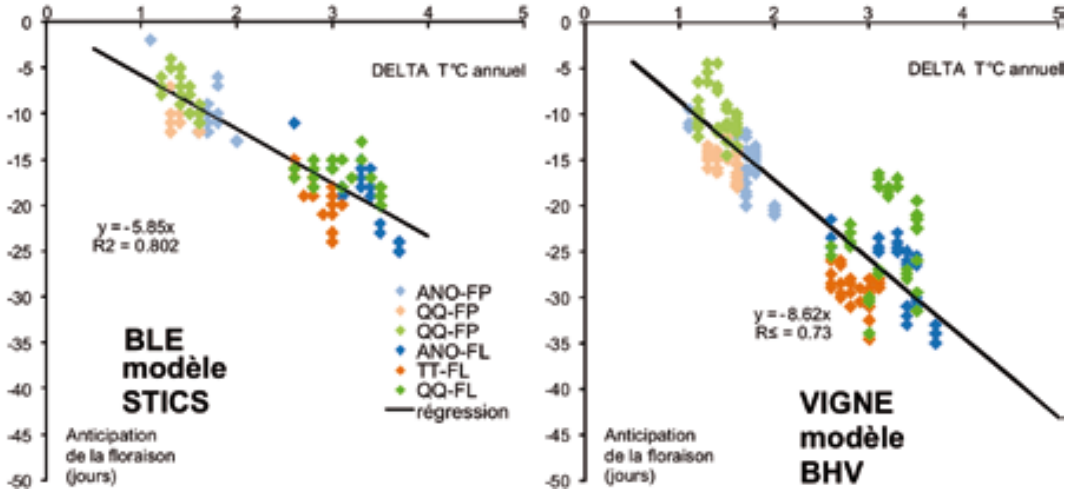


Figure 5 : *relation entre l'anticipation du stade floraison (j) en fonction du réchauffement moyen annuel (en °C) par période et par site (pour l'ensemble des variétés). À droite pour le blé avec le modèle STICS et à gauche pour la vigne avec le modèle BHV.*

La bonne qualité des ajustements (r2 élevés) autorise une utilisation de ces références pour estimer de manière simple l'ordre de grandeur de l'anticipation en fonction du réchauffement moyen annuel. Par ailleurs, introduire dans le calcul l'ensemble des méthodes de régionalisation et des variétés procure une certaine robustesse aux tendances établies.

Une synthèse entre les modèles, les méthodes de régionalisation et les variétés donne les ordres de grandeur du tableau 2 pour les anticipations de floraison et de récolte.

Culture	D floraison en j/°C	D récolte en j/°C
Blé	5	6
Maïs	5	15
Tournesol	4	9
Vigne	8	10

Tableau 2 : *ordres de grandeur des anticipations pour la floraison et la récolte en fonction du réchauffement annuel subi par les cultures, établies en faisant une moyenne de l'ensemble des résultats du projet pour le blé, le maïs, le tournesol et la vigne.*

E Les conséquences physiologiques de l'anticipation

L'anticipation des stades permet aux cultures de moins souffrir de la détérioration des conditions hydriques (cf. fiche EAU), ce qu'illustre la différence de comportement entre des variétés précoces et des variétés tardives. En effet, la précocité variétale intervient significativement sur l'évolution du confort hydrique*. Par exemple, pour le blé, le confort hydrique de la variété précoce Soissons est moins détérioré que celui de la variété tardive Arminda (fig. 6) : à même date de récolte, la variété précoce a subi moins de stress hydrique* que la variété tardive et ce, même en sol profond à forte RU. Si aujourd'hui l'enjeu de la précocité variétale est faible, notamment en sol profond, il deviendra de plus en plus important au fil du temps, avec 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.

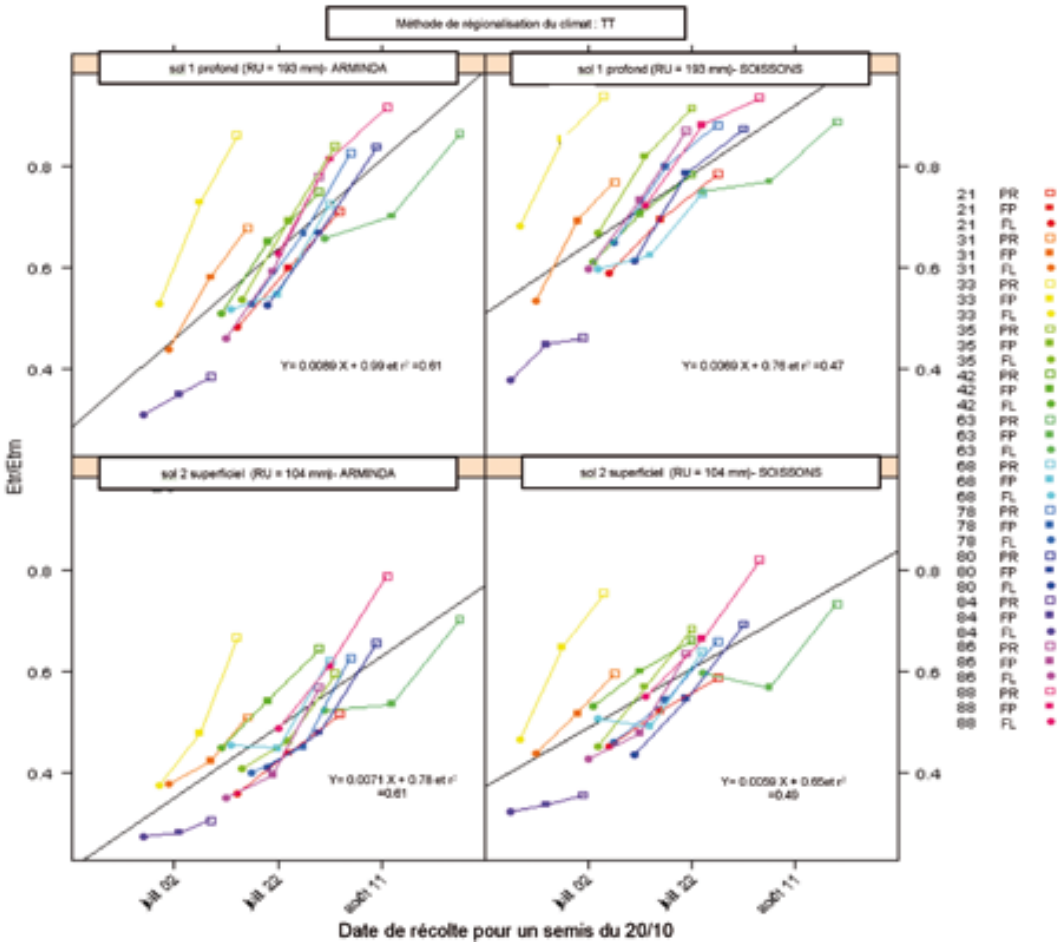


Figure 6 : *évolution comparée du confort hydrique, représenté par le rapport ETR/ETM pendant le remplissage, entre une variété précoce (Soissons) et tardive (Arminda) pour 2 types de sol avec la méthode de régionalisation TT. La variabilité des sites et des climats est représentée par la date de récolte en abscisse et les sites sont repérables par leur numéro de département.*

Nous retrouvons des résultats semblables pour les cultures de printemps et la vigne, ce qui, compte tenu de la moindre durée de remplissage pour les variétés précoces, n'assure pas forcément un meilleur rendement.

Il existe un second effet bénéfique de l'anticipation pour les céréales, à paille qui sera largement développé dans le paragraphe suivant. Il s'agit de la réduction des risques d'échaudage thermique* de fin de cycle permise, par le déplacement de la phase de remplissage.

F Adaptation par calage du cycle

Les résultats précédents nous conduisent naturellement à envisager une modification des dates de semis afin d'obtenir un calage du cycle optimal par rapport à la nouvelle donne climatique. 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 engendrés. L'étude des possibilités techniques d'implantation et de récolte pour une large gamme de dates de semis nous éclairera enfin sur la faisabilité de ces modifications dans le cadre d'une exploitation de grande culture standard.

Évolution des risques climatiques lors de phases sensibles ou risque « phénoclimatique »

Qu'ils remettent en cause l'intégrité des plantes ou qu'ils limitent fortement les composantes du rendement, les risques climatiques étudiés sont toujours dommageables au rendement en quantité mais aussi en qualité (cf. fiche VIGNE).

Températures sub-optimales ou gélives

Pour le blé, c'est à la fois le risque de gel hivernal (températures létales) et de gel d'apex (température minimale inférieure à –4 °C, après le stade épi à 1 cm) qui diminuent. Toutefois, au sujet du gel d'apex, on note l'exception de la station d'altitude (Clermont-Theix) pour laquelle le risque d'avoir des épis gelés en cours de montaison demeure élevé. Pour l'ensemble des autres situations, on peut conclure que ce type de risque va tendre à disparaître dans le FL, avec une fréquence d'apparition devenant souvent inférieure à 2 années sur 10, dès le FP, y compris en semis très précoces.

Pour le tournesol, une analyse similaire a été réalisée quant à l'occurrence des températures sub-optimales à des phases sensibles : température minimale inférieure à 8 °C pendant la phase végétative ou inférieures à 15 °C entre les stades « bouton floral » et « floraison ». Ces tendances à la diminution, surtout fortes pour le FL, s'avèrent en revanche insuffisantes pour le FP où ce type de risque augmente en situation de semis précoce. Ces événements constitueront donc des freins à la mise en place de stratégies d'esquive* *via* des semis et des variétés plus précoces.

Températures supra-optimales ou « échaudantes »

La fréquence de températures supra-optimales en fin de cycle (autour de la floraison et au cours du remplissage) s'accroît très fortement en dépit de l'anticipation des stades. Ainsi pour le blé, le nombre de jours échaudants (température maximale supérieure à 25 °C) augmente de 15 à 30 % entre le PR et le FP et de l'ordre de 40-50 % entre le PR et le FL. Le recours à des semis plus précoces n'atténue que faiblement ce type de risque. La figure 7 illustre, pour le tournesol, l'évolution du nombre de jours échaudants pendant le remplissage, pour différentes dates de début de remplissage à Toulouse. On note de manière très nette une forte augmentation de ce risque avec le changement climatique, les augmentations attendues pour le tournesol s'avérant encore plus prononcées que celles du blé.

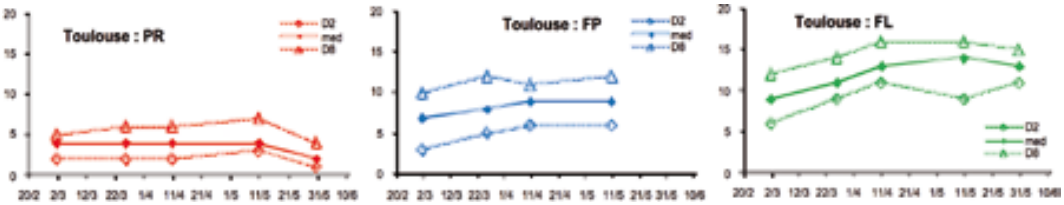


Figure 7 : *évolution de l'occurrence des températures excessives (température maximale supérieure à 32 °C) lors du remplissage des graines de tournesol pour les 3 périodes, le site de Toulouse et la méthode de régionalisation TT.*

Rôle de l'anticipation des stades dans la réduction du risque d'échaudage

On se propose de chiffrer la contribution stricte de l'anticipation des stades sur la limitation du risque d'échaudage du blé. La figure 8 illustre la façon dont nous estimons cette contribution : à dates d'épiaison échelonnées (liées aux semis eux-mêmes échelonnés) correspond un nombre de jours échaudants d'autant plus élevé que l'épiaison est tardive ; à même date d'épiaison, le réchauffement climatique (courbe rouge) devrait provoquer une augmentation très forte de ce risque ; cependant, l'anticipation des stades limite cette augmentation en avançant l'épiaison (flèche noire) ; on voit donc clairement la contribution de l'anticipation dite « naturelle » (en vert) et ce qui manque (en rouge) pour revenir à des risques semblables aux risques actuels. Il est aisé également d'identifier la date d'épiaison qui, dans le futur, permettrait de retrouver le même niveau de risque et d'en estimer l'anticipation correspondante.

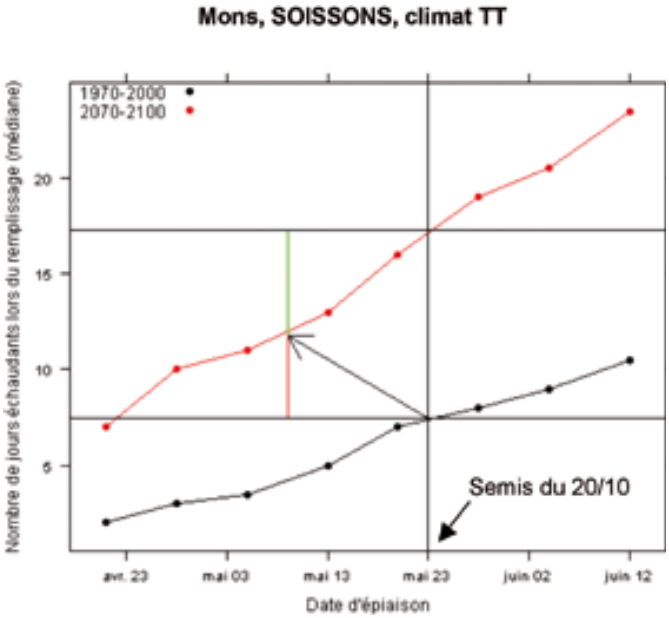


Figure 8 : *relation entre la date d'épiaison et l'occurrence du risque médian d'échaudage thermique (nombre de jours où la température maximale est supérieure à 25 °C au cours du remplissage) : PR (en noir), FL (en rouge). Exemple pour la station de Mons (80), méthode de régionalisation TT.*

Avancée du stade de 14 jours : soit une réduction du risque de 5,53. Restent 4,27 pour un retour au risque actuel : soit une anticipation actuelle supplémentaire de 18 jours.

La mise en application de la méthode précitée pour l'ensemble des sites et de deux méthodes de régionalisation est synthétisée sur la figure 9. On note que, pour le FP, l'anticipation naturelle s'avère suffisante avec la méthode QQ, alors qu'elle est insuffisante avec la méthode TT, illustrant, une fois de plus, le poids de la méthode de régionalisation climatique sur une éventuelle décision agricole. Pour le FL, l'anticipation naturelle des stades est loin d'être suffisante quelle que soit la méthode de régionalisation. En termes de variabilité géographique, on note que, dans les sites de la zone Ouest (31, 33, 86), le risque s'accroît très fortement.

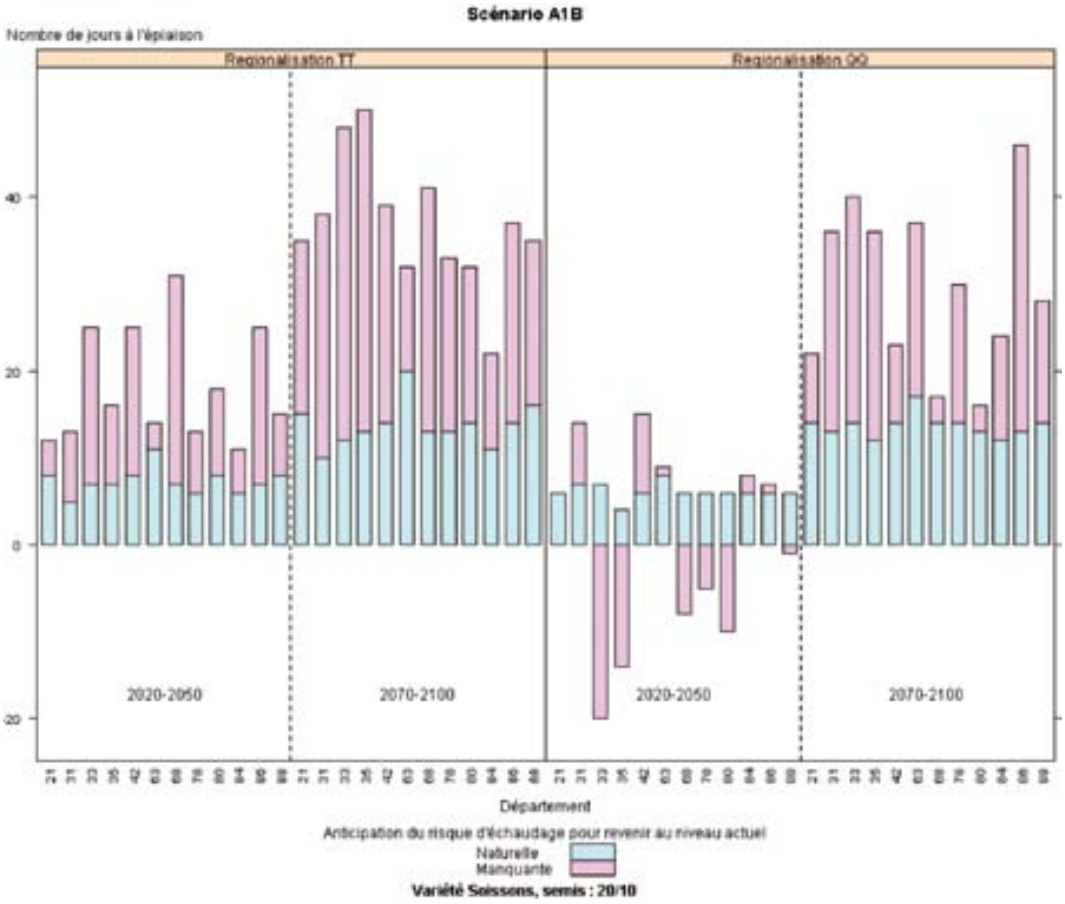


Figure 9 *: réduction du risque d'échaudage thermique au cours du remplissage des grains* via *l'anticipation (nombre de jours) ; réduction à réaliser en complément pour retrouver un niveau de risque équivalent à celui de la période actuelle. Valeurs médianes, scénario A1B (méthode de régionalisation TT et QQ), variété Soissons semée le 20/10, sites repérés par leur numéro de département.*

Évolution des dates des interventions techniques (semis et récolte)

Les jours disponibles* pour les opérations de semis et de récolte ont été estimés en utilisant le simulateur OTELO pour les espèces d'hiver (choix du blé) et de printemps (choix du maïs) et en faisant l'hypothèse d'une exploitation de grande culture pratiquant une rotation maïs-blé-colza-blé. OTELO juge de l'opportunité des travaux agricoles par rapport à la capacité des sols à supporter les engins agricoles sans subir de détérioration pénalisante (tassement, par exemple). Pour les simulations, nous avons supposé que cette exploitation disposait d'un matériel standard pour une exploitation céréalière de 400 hectares avec deux Unités de Travail Annuel (2 tracteurs, 2 charrues, une moissonneuse batteuse…). OTELO détermine les jours disponibles à partir de règles de décision portant d'une part sur le taux de remplissage de la réserve utile de la couche travaillée (on n'entre pas dans les parcelles si le sol est trop humide) et d'autre part sur la pluviométrie du jour et des 2 ou 3 jours qui précèdent l'opération (pas d'intervention tant que le sol n'est pas suffisamment ressuyé). Le logiciel calcule également des débits de chantiers (en tenant compte de contraintes horaires sur les temps de travaux des ouvriers), ce qui permet d'établir le calendrier de réalisation des travaux. Les résultats produits sont donc reliés à l'organisation des chantiers dans l'exploitation, à la répartition saisonnière des pluies et à l'évolution de l'humidité du sol ; il n'est, en revanche, pas tenu compte dans les règles de décision des cas où un sol trop sec pourrait constituer un obstacle pour les travaux du sol.

Nous avons, dans un premier temps, étudié l'évolution du nombre de jours disponibles en faisant l'hypothèse que la gamme des dates de semis et de récolte restait inchangée dans le futur. Nous fixons une plage de temps de 20 jours de part et d'autre de la date de semis moyenne et calculons le nombre de jours disponibles dans ce laps de temps. Dans un second temps, nous avons évalué par modélisation les dates de semis et de récolte anticipés et vérifié, toujours en calculant le nombre de jours disponibles dans la période de 20 jours encadrant la date de semis (ou de récolte) rectifiée, si le changement modifiait les possibilités d'intervention.

Pour apporter quelques compléments d'information sur les possibilités de semis, des calculs de dates de semis ont été réalisés avec STICS. Ces calculs d'optimisation des dates de semis tiennent compte de la physiologie de la germination et de la plantule en termes d'humidité et de température du lit de semence (température requise pour la croissance, absence de gel, lit de semence pas trop sec) ainsi que des contraintes techniques pour éviter le tassement (sol pas trop humide).

La récolte

En ce qui concerne la récolte du blé, on vérifie que, dans le PR, les jours disponibles ne sont pas limitants : toujours supérieurs à 15 jours (pour une période de 20 jours), quels que soient les sites. Pour les deux périodes futures, ce nombre se rapproche des 20 jours pour toutes les méthodes de régionalisation.

Pour le maïs, dans le PR, le nombre de jours disponibles diminue de l'ordre de 7 jours quand on passe d'une récolte de début septembre à une récolte de début novembre, passant de 17 à 10 jours. Dans le futur, cette situation sera nettement améliorée grâce d'une part à l'augmentation du nombre de jours disponibles à même date de récolte (on gagnera de 2 à 3 jours en moyenne pour la récolte la plus tardive, quelle que soit la méthode de régionalisation du climat) et d'autre part à l'anticipation des récoltes.

Le semis

L'anticipation des semis constituant un fort enjeu dans le cadre de l'adaptation* au changement climatique, nous nous y attarderons davantage.

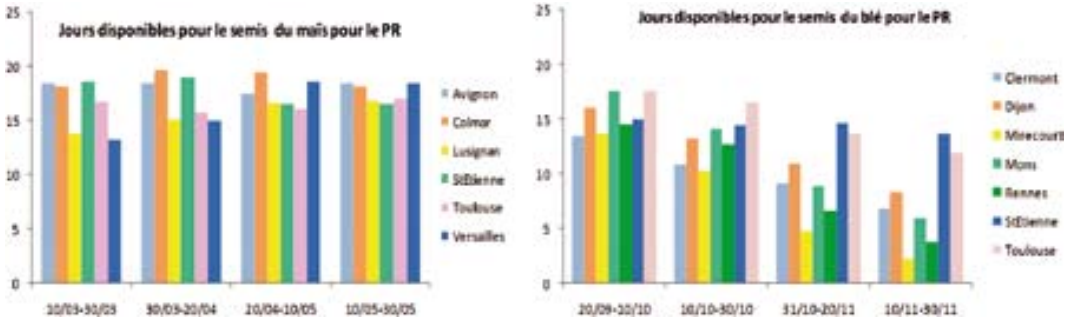


Figure 10 : *nombre moyen de jours disponibles dans la période de 20 jours encadrant la date figurant en abscisse pour les semis de blé et de maïs dans le PR (données climatiques mesurées) pour quelques sites d'intérêt en fonction de larges périodes préconisées.*

La figure 10 fournit une image de l'évolution des jours disponibles pour le semis du maïs et du blé dans le PR, pour une large gamme de périodes de semis. Si retarder les semis de maïs a tendance à augmenter le nombre de jours disponibles pour réaliser l'opération, et vice-versa pour le blé, il existe toutefois de fortes disparités géographiques, favorisant les sites à faible pluviométrie.

La figure 11 nous indique que le fait de semer plus tôt le maïs ne posera pas de problème de jours disponibles pour son implantation 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. Il existe une légère différence entre les méthodes de régionalisation, qui s'explique par des occurrences de pluies différentes. Toutefois, les deux méthodes indiquent une tendance à l'augmentation des jours disponibles entre le FP et le FL.

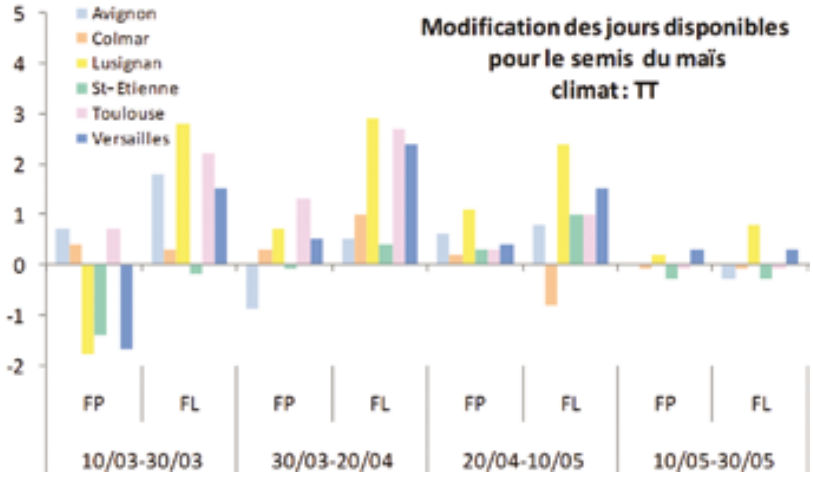


Figure 11 : *modification (par rapport au passé récent) du nombre de jours disponibles moyen pour le semis du maïs dans le FP et le FL pour la méthode de régionalisation climatique TT et quelques sites d'intérêt en fonction de larges périodes préconisées.*

Si, à présent, on utilise un autre modèle pour calculer la date de semis optimale vis-à-vis de l'implantation d'une autre culture de printemps, le tournesol (fig. 12), on observe également une précocification tant que celle-ci ne conduit pas à des conditions trop sèches : cas de Toulouse dans le FL où l'anticipation des semis est limitée par la sécheresse hivernale.

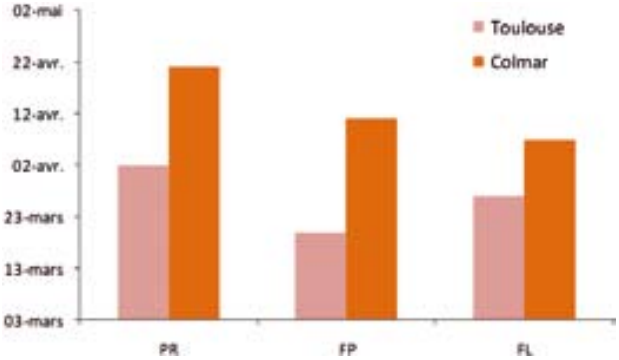


Figure 12 : *dates moyennes de semis du tournesol, calculées par STICS pour optimiser l'implantation.*

En ce qui concerne le semis du blé, OTELO prédit une augmentation du nombre de jours disponibles, en semis précoce, de l'ordre de 1 à 5 jours selon les sites, dès le FP pour la méthode de régionalisation TT, alors qu'il faut attendre le FL pour bénéficier de cet avantage pour la méthode QQ. Ces résultats auraient tendance à nous conduire, un peu hâtivement, à conclure à l'absence de contrainte pour avancer les dates de semis de blé. En réalité, la figure 13 montre que les conditions de sécheresse du sol à l'automne amèneront probablement à retarder les semis et qu'en tout cas les tendances perçues sont négligeables par rapport à la variabilité interannuelle et les sources d'incertitude climatique.

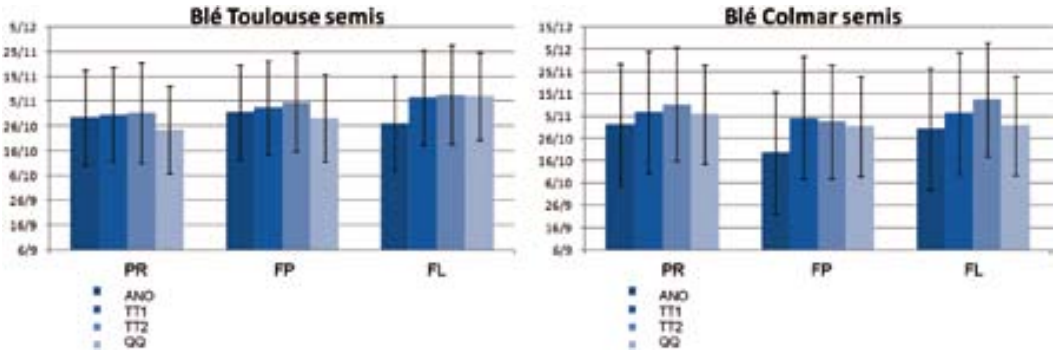


Figure 13 : *dates moyennes de semis du blé, calculées par STICS pour optimiser l'implantation à Toulouse (à droite) et Colmar (à gauche) pour quatre sources d'incertitude climatique (cf. fiches CLIMAT et INCERTITUDES ET VARIABILITÉS) en indiquant la variabilité interannuelle (écart-type).*

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. De façon pragmatique, 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 (échaudage, en particulier). Les risques de gel tendent à diminuer pour le blé mais restent préjudiciables 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 aux problèmes de sécheresse du sol, qui pénalisent l'implantation, pour les cultures d'hiver. 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.

Ce qu'il faut approfondir…

✓ Le choix d'une phénologie adaptée semble une voie à privilégier en priorité. Par conséquent, on pourrait imaginer un travail complémentaire permettant d'identifier, par site, les combinaisons date de semis x type de précocité minimisant les risques climatiques terminaux (sécheresse et fortes températures). Les modèles de culture utilisés sont encore perfectibles en termes de développement : sensibilité génétique à la durée du jour, prise en compte des phénomènes de « dévernalisation », rôle de la teneur en CO_2 sur le développement. De plus, la méconnaissance de la valeur exacte des températures-seuil maximales peut se traduire par des erreurs d'estimation, dès lors que la fréquence des températures journalières excédant ces seuils devient plus significative. S'agissant des impacts entrevus sur le rendement, l'effet de l'interaction entre les très fortes températures au cours du remplissage des grains et l'augmentation de la teneur en CO_2 est à étudier en détail. Dans le domaine des jours disponibles, l'impact de la sécheresse du sol est un critère décisionnel à introduire. Nous attendons également beaucoup de l'amélioration des estimations climatiques en matière, notamment, d'amplitudes thermiques journalières et de séquences de jours consécutifs chauds, pluvieux… Autant de critères qui, on l'a vu, pèsent lourd sur les estimations.

Pour en savoir plus…

Brisson, N., Delécolle, R., 1992 - *Développement et modèles de simulation de cultures.* Agronomie, 12 : 253-263.

Durand, R., 1967 - *Action de la température et du rayonnement sur la croissance.* Ann. Physiol. Veg., 9,5-27.

Gate, P., 2007 - *Le blé face au changement climatique.* Perspectives Agricoles 336, 20-56.

Papy, F., and L. Servettaz. 1986 - *Jours disponibles et organisation du travail.* Bulletin technique agricole 412-413:693-702.

Papy, F., C. Aubry, and J. Mousset. 1990 - *Éléments 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.

Vocanson, A. 2006 - *Évaluation* ex ante *d'innovations variétales en pois d'hiver (Pisum sativum L.) : approche par modélisation au niveau de la parcelle et de l'exploitation agricole.* Thèse Ina P-G, Paris, France. 294 p.

Confort hydrique et restitution d'eau aux nappes

Bernard Itier

B 2
Eau

A Les enjeux

Les prévisions des modèles en matière de précipitations

Le changement climatique* est souvent assimilé au seul réchauffement lié à l'effet serre. Il ne faut toutefois pas oublier qu'il se caractérisera aussi par un changement de pluviométrie (en valeur absolue et en variabilité) lié au changement de température et de nébulosité. Sur le plan hydrique, il y aura donc changement de l'offre (précipitations) et de la demande (évapotranspiration potentielle*). Pour ce qui concerne les précipitations, les prévisions des modèles climatologiques sont beaucoup moins certaines que pour ce qui concerne la température. De façon globale, les différents modèles prédisent une augmentation de précipitations aux hautes latitudes et dans la zone intertropicale et une diminution en zone méditerranéenne. Ils divergent sur la limite entre zones d'augmentation et zone de diminution de la pluviométrie, qui pour certains modèles passe au Centre-Nord de la France et pour d'autres dans le Midi.

Dans le cadre de CLIMATOR, nous avons utilisé la variabilité* des prévisions induite par les méthodes de régionalisation* du modèle ARPÈGE* de Météo France (cf. fiche CLIMAT), qui couvre la gamme des incertitudes* climatiques (cf. fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS). Or, quelle que soit la méthode, on observe une tendance à la diminution sur l'ensemble du territoire. Cette diminution est plus marquée dans le Sud pour la période du futur proche (FP)* et plus marquée dans l'Ouest pour la période du futur lointain (FL)*, la partie est du territoire bénéficiant alors de remontées maritimes. C'est le Sud-Ouest qui sera alors la région la plus affectée, compte tenu de la tension sur l'eau qui existe occasionnellement d'ores et déjà.

Besoins en eau des couverts et disponibilité de l'eau pour d'autres usages : deux questions importantes en matière agri-environnementale

À l'instar de l'expertise collective « Sécheresse et Agriculture » de l'INRA (Amigues *et al.*, 2006), le projet CLIMATOR s'est intéressé à la double relation de l'agriculture à la ressource en eau.

- **Dépendance de la ressource en eau :** il s'agit d'analyser l'incidence de la baisse de pluviométrie sur le confort hydrique* des plantes, sachant que les besoins en eau seront conditionnés aussi par les autres éléments du changement climatique, que ce soit par la demande climatique elle-même (qui évoluera avec la nébulosité, la température et la teneur en CO_2 atmosphérique) ou par le positionnement du cycle végétatif (dépendant de la température) par rapport à la variation annuelle de la demande climatique.
- **Incidence sur les ressources en eau :** il s'agit d'analyser comment évoluera la consommation, par l'agriculture, d'une ressource en partage avec d'autres acteurs de la société. Cette estimation ne peut être faite qu'au niveau des systèmes de cultures et non pour des cultures seules. Elle passe par la notion de restitution au milieu* qui, sur le long terme, correspond à la différence entre précipitations et eau consommée par les systèmes de cultures (ou les milieux naturels). Elle concerne les systèmes irrigués comme les systèmes pluviaux.

B Les variables étudiées, les concepts utilisés et les mécanismes mis en jeu

Pour appréhender le confort hydrique et la restitution d'eau au milieu, il est nécessaire, en préambule, de définir diverses variables agronomiques et environnementales. En ce qui concerne l'évapotranspiration des couverts végétaux, nous utiliserons :

- l'évapotranspiration potentielle, ET0* (autrefois appelée ETP) : la variation d'ET0 d'une année à une autre (et donc d'une période à une autre) dépendra des effets antagonistes des changements de rayonnement, de CO_2 et de température (cf. influence du CO_2 sur ET0 dans la fiche MODÈLE ;
- l'évapotranspiration maximale, ETM* : à l'échelle annuelle, la phénologie* de la culture joue un rôle important. Le réchauffement climatique jouera donc aussi sur l'ETM *via* les déplacements et raccourcissements des cycles phénologiques. Selon les modèles, des réductions drastiques du feuillage, induites par le stress hydrique* en phase végétative, pourront également diminuer l'ETM. D'autres différences dans le calcul de l'ETM sont signalées dans la fiche MODÈLE ;
- l'évapotranspiration réelle, ETR*.

Le confort hydrique sera estimé à partir du rapport ETR/ETM pendant la période de production (floraison-maturation pour les cultures annuelles et la vigne, du 1er mai au 30 octobre pour les feuillus et toute l'année pour les conifères), alors que le déficit hydrique, ou besoin en irrigation potentielle, sera estimé à partir de la différence ETM – ETR, calculée sur la même période. Ces deux valeurs, confort hydrique et déficit hydrique, seront comparées à l'indice agroclimatique, P – ET0, représentant la différence entre l'offre climatique (P, la pluie) et la demande climatique (ET0) à l'échelle annuelle.

La restitution au milieu sera définie comme la quantité d'eau, provenant des précipitations, non consommée par le couvert végétal ou les milieux naturels. Pour situer les choses, disons qu'à l'échelle du territoire français, sur 900 mm de pluie annuelle en moyenne, 600 mm sont évapotranspirés et 300 mm sont restitués au milieu, c'est-à-dire nourrissent les nappes phréatiques et les rivières. Bien entendu, l'eau d'irrigation doit être prise en compte dans ce calcul, car elle participe au cycle de l'eau à l'échelle du bassin versant, si elle est prélevée dans des nappes ou dans des rivières non alimentées par de l'eau extérieure au bassin versant lui-même.

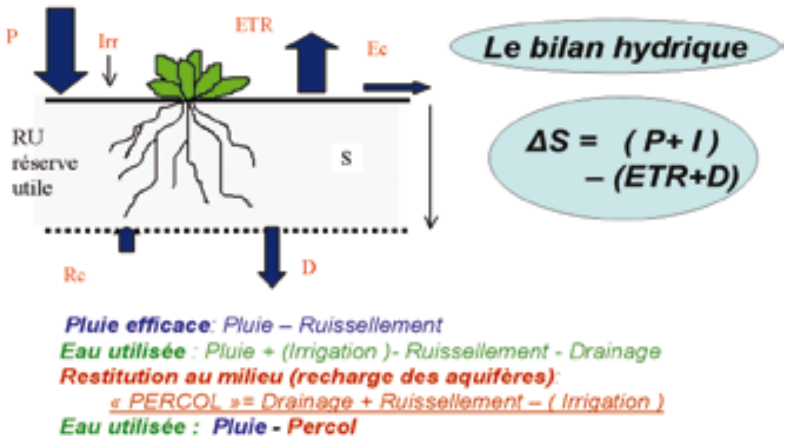


Figure 1 : *schéma du bilan hydrique d'une parcelle.*

La figure 1 permet de représenter les différents flux d'eau affectant une parcelle de couvert végétal. Entre deux dates, les variations de stock en eau dans la zone racinaire (DS) résultent du bilan des entrées-sorties dans le sol. Les flux d'entrée sont : la pluie (P), l'irrigation pour les systèmes de cultures irrigués (Irr) et, le cas échéant si la sécheresse est accusée, les remontées capillaires. Les sorties sont l'évapotranspiration réelle (ETR), l'eau s'écoulant latéralement par ruissellement

(Ruis) et l'eau percolant à travers le sol vers les nappes phréatiques, appelée le plus souvent drainage (D). La variation de stock en eau du sol s'écrit donc (Cf Itier *et al.,* 1997) :

$$\Delta S = P (+ Irr) - ETR - Ruis - D \quad (1)$$

La restitution au milieu du système de culture (le plus souvent estimée à l'échelle annuelle) sera appelée PERCOL*.

$$PERCOL = D + Ruis (- Irr) \quad (2)$$

Sur une longue période de temps (par exemple, les 30 ans de simulation des « périodes » du projet CLIMATOR), on peut estimer que PERCOL est la différence entre la somme des précipitations et celle de l'eau consommée par les systèmes de culture :

$$PERCOL \sim (P - ETR) \quad (3)$$

L'écriture de la relation (3) pour la période de référence, ou passé récent (PR)*, et pour l'une des périodes de projection, futur proche (FP*) ou futur lointain (FL*), conduit à la relation :

$$\Delta PERCOL \sim (\Delta P - \Delta ETR) \quad (4)$$

où Δ correspond à la différence entre une des périodes de projection et le PR. Cela permet de dire que toute baisse de pluviométrie (ΔP), consécutive au changement climatique, se répartira entre une baisse de consommation en eau par les cultures et les végétations naturelles (ΔETR) et une baisse de la restitution au milieu (ΔPERCOL) qui, comme l'illustre la figure 2 et comme nous le verrons plus tard, est supérieure au premier terme.

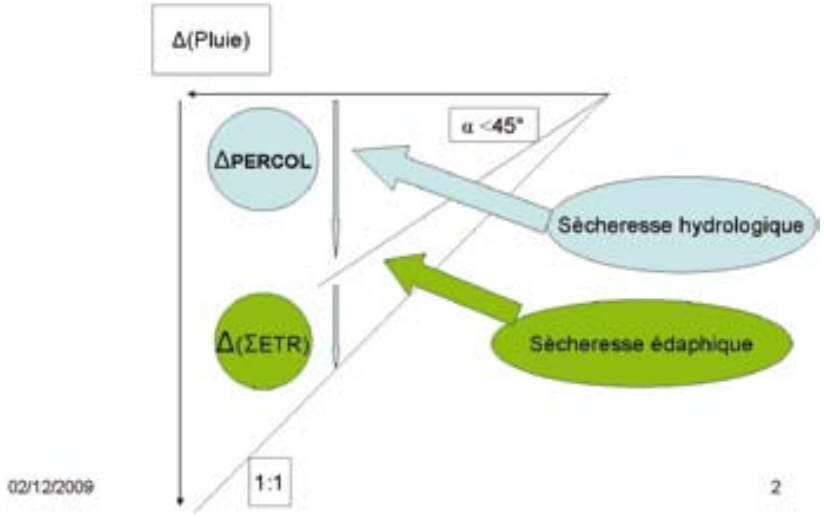


Figure 2 : *répartition de la baisse de pluviométrie entre eau verte (sécheresse édaphique) et eau bleue (sécheresse hydrologique).*

Le changement climatique, caractérisé le plus souvent sous nos latitudes par une baisse de pluviométrie, aura ainsi une double traduction qu'il s'agira de renseigner système de culture par système de culture :

- baisse de disponibilité en eau pour la consommation des plantes (sécheresse édaphique) ;
- baisse de restitution en eau au milieu (sécheresse hydrologique).

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

Évolution du confort hydrique

Le confort hydrique présente une tendance à la diminution. La vigne, culture pérenne, a une diminution relativement faible dans les zones méridionales où elle est déjà « stressée » (fig. 3), tandis que cette diminution est plus forte pour les zones septentrionales où elle est aujourd'hui en situation plus confortable. Le confort hydrique du blé, culture d'hiver, change peu, très certainement en raison du décalage phénologique en début de printemps (cf. fiche TIMING) combiné avec un léger raccourcissement du cycle. Pour le tournesol, culture de printemps, l'évolution est faible au nord mais la diminution est importante au sud (Avignon et Toulouse).

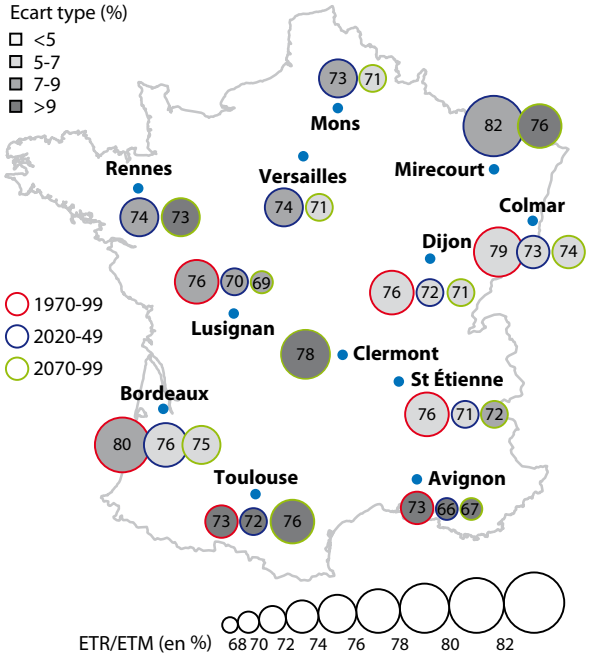


Figure 3 : *évolution du rapport ETR/ETM de la vigne sur sol à faible réserve utile (73 mm).*

La figure 4, qui donne l'évolution du rapport ETR/ETM pour les conifères et les feuillus, obtenue au moyen du modèle BILJOU, en fonction de P – ET0, montre une décroissance équivalente. La gamme des valeurs parcourue par les feuillus est inférieure à celle parcourue par les conifères, car le confort hydrique n'est pas calculé sur les mêmes périodes (cf. § B).

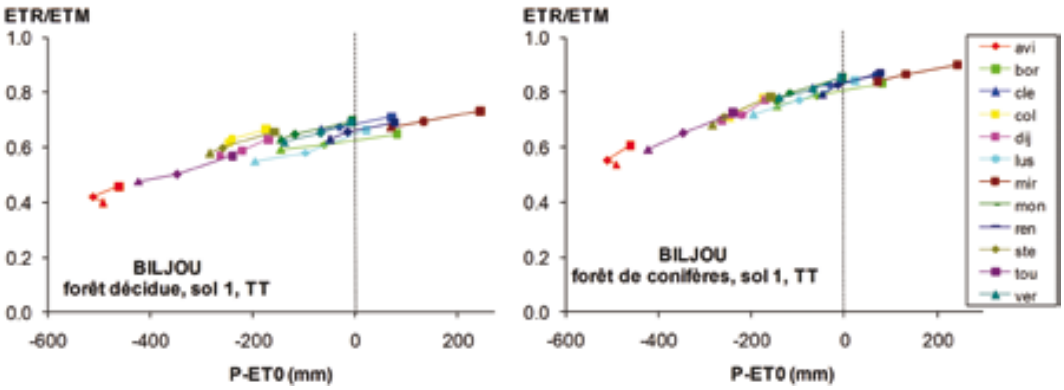


Figure 4 *: évolution avec BILJOU du rapport ETR/ETM pour les conifères (à droite) et les feuillus (à gauche) en fonction de l'indice agroclimatique (P – ET0).* ■ *passé récent,* ◆ *futur proche,* ▲ *futur lointain pour douze sites du territoire français (en abrégé sur l'étiquette de droite).*

Évolution du déficit hydrique des divers systèmes de culture

Le déficit hydrique, ETM – ETR, peut être rapproché d'un besoin d'irrigation potentiel. Nous ferons ici l'analyse de son déterminisme et verrons dans la fiche IRRIGATION les conséquences pratiques en terme de modifications des apports d'eau aux cultures. Ce déficit dépend de l'évolution de l'ETM et du rapport ETR/ETM vu précédemment :

$$ETM - ETR = ETM \times (1 - ETR/ETM)$$

La tendance à la diminution du confort hydrique, ETR/ETM, conduit à une légère augmentation de (1 – ETR/ETM).

Quatre éléments vont jouer sur l'évolution d'ETM pendant la période floraison-maturation (période de calcul du confort hydrique pour la majorité des espèces) : ET0, le coefficient cultural (kc) qui représente l'influence du feuillage, la durée de la période floraison-maturation et son positionnement calendaire par rapport à la demande climatique. La valeur d'ET0, à une date calendaire donnée, a tendance à s'accentuer à cause de l'augmentation des températures et du rayonnement. Cette augmentation est, toutefois, freinée par l'effet antagoniste du CO_2, en particulier chez les plantes en C3 (blé, tournesol, fétuque, vigne, conifères et feuillus), en raison de la propriété qu'ont celles-ci de réduire leur transpiration en réponse à l'accroissement de la teneur en CO_2 ; chez les plantes en C4 (maïs, sorgho), ce frein est très peu actif. La valeur du coefficient cultural peut diminuer dans des conditions d'extrême sécheresse en phase végétative, affectant l'indice foliaire*; ce qui peut se produire pour les cultures de printemps conduites en pluvial sur des sols superficiels. En conséquence, c'est le positionnement calendaire de la période floraison-maturation, *via* le déplacement du cycle global, et le raccourcissement des phases résultant de l'augmentation de la température, qui joueront le rôle majeur :

- pour les cultures d'hiver, on aura une anticipation* du cycle avec une faible réduction de la durée des phases. L'effet principal viendra de ET0 qui est plus faible plus tôt en saison, car le rayonnement est plus faible : ET0 journalier pendant la période floraison-maturation sera plus faible ;
- pour les cultures de printemps, on aura à la fois une anticipation du cycle et une réduction importante de la durée de la phase de remplissage (cf. fiche TIMING). L'anticipation du cycle jouera peu sur ET0, car le décalage phénologique déplacera la phase de remplissage davantage en période croissante de température (contrairement aux cultures d'hiver : cf. fiche TIMING) ; en revanche, la réduction des phases induira une forte diminution : ET0 journalier équivalent mais période floraison-maturation plus courte.

Donc, quel que soit le système de cultures, ETM présentera une tendance à la décroissance. Dans ces conditions, ETM – ETR, qui représente le besoin potentiel d'irrigation, sera sujet à deux effets antagonistes que seule la simulation par les modèles de cultures pourra départager.

Le résultat obtenu pour les cultures annuelles par les différents modèles utilisés conduit à une croissance du déficit hydrique entre le PR et le FP, suivie par une décroissance entre le FP et le FL malgré la poursuite de l'augmentation de l'écart entre P – ET0 sur tous les sites géographiques de l'indice (cf. fig. 5 pour le blé et le tournesol).

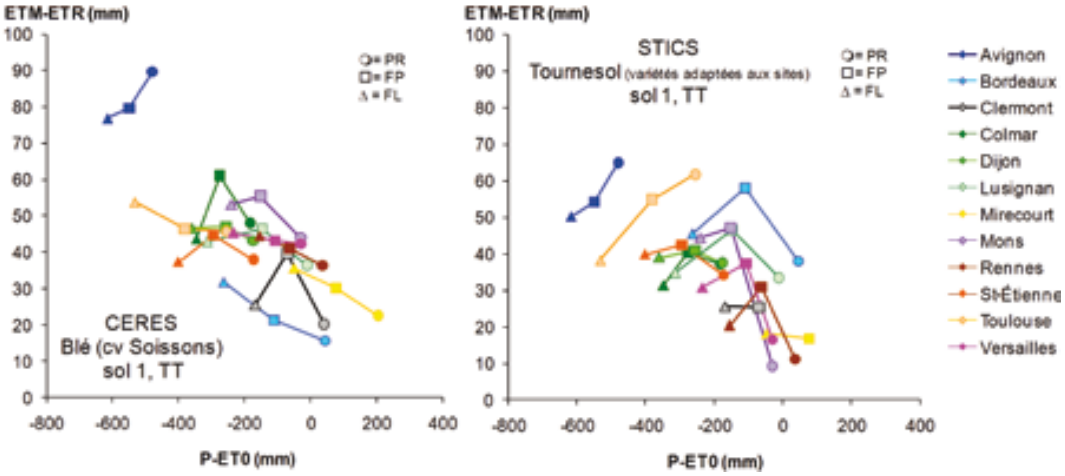


Figure 5 : *évolution de la différence ETM – ETR sur blé (CERES) et tournesol (STICS) en fonction de l'indice agro-climatique P – ET0 :* ● *passé récent,* ■ *futur proche,* ▲ *futur lointain.*

La figure 6 montre, en conséquence, pour les différentes cultures, une baisse de la régression globale du déficit hydrique, ETM – ETR, en fonction de P – ET0. Cela rendra quelque peu moins aiguë la question de l'eau en situation de baisse de précipitation, et ce résultat est cohérent avec les cartes de doses d'irrigation requises pour conduire le maïs à 80 % de l'ETM qui indiquent une baisse d'irrigation dans le FL (cf. fiche IRRIGATION). Une fois encore, cela souligne le lien étroit entre le fonctionnement thermique et le fonctionnement hydrique des cultures.

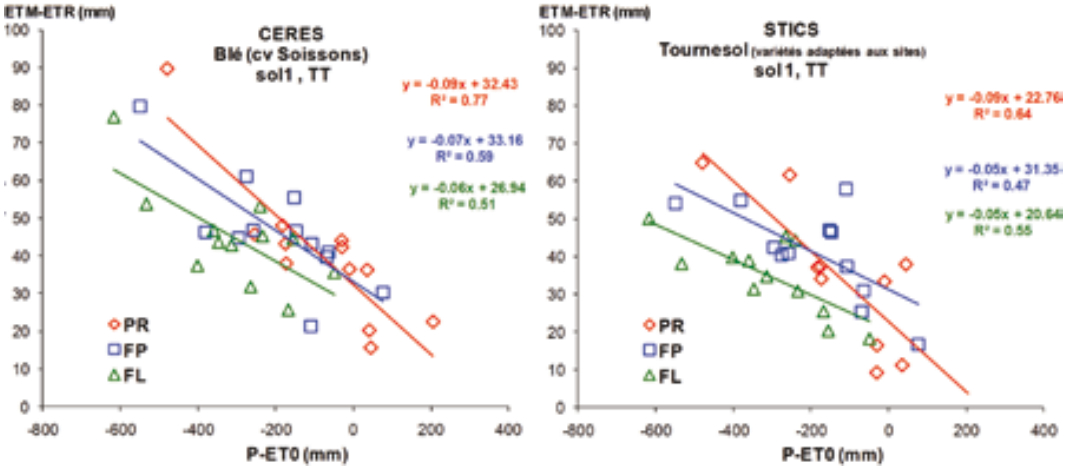


Figure 6 : *relations entre le déficit hydrique, ETM – ETR, et l'indice agroclimatique, P – ET0, obtenues pour des monocultures de blé avec CERES (à gauche) et de tournesol avec STICS (à droite) pour l'ensemble des sites et les trois périodes d'intérêt (PR, FP, FL).*

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

L'eau est une ressource en partage entre différents acteurs. Les différents systèmes de cultures et les végétations naturelles ont chacun un comportement particulier en matière de restitution d'eau au milieu. Cela est illustré par la figure 7 qui compare les relations (régressions linéaires) entre PERCOL et P, la pluviométrie annuelle, obtenues pour la période de référence (PR) sur les douze sites du territoire français pour cinq systèmes de culture (monocultures de blé, de tournesol, de maïs irrigué à 80 % de l'ETM, de vigne et de fétuque) avec le modèle STICS et deux systèmes forestiers (feuillus et conifères) avec le modèle BILJOU. Sur cette figure, plus une droite de régression caractéristique d'un couvert est haute et plus ce couvert restitue d'eau au milieu. Cette figure illustre donc l'intérêt environnemental des pérennes à feuilles caduques (feuillus, vigne) par rapport aux végétations à caractère sempervirent (fétuque, conifères) qui restituent moins d'eau au milieu. Pour les systèmes de cultures annuelles, elle montre clairement qu'une culture d'hiver (le blé) restitue plus d'eau au milieu que les cultures de printemps. Si ce résultat est assez intuitif pour le maïs irrigué (puisque l'eau d'irrigation est comptée négativement dans le bilan), il l'est moins pour le tournesol pluvial. Il s'explique par le fait que, comme le maïs, la période de sol nu dans un système de monoculture de tournesol est une période longue, d'averses fréquentes où l'eau est consommée par évaporation directe du sol.

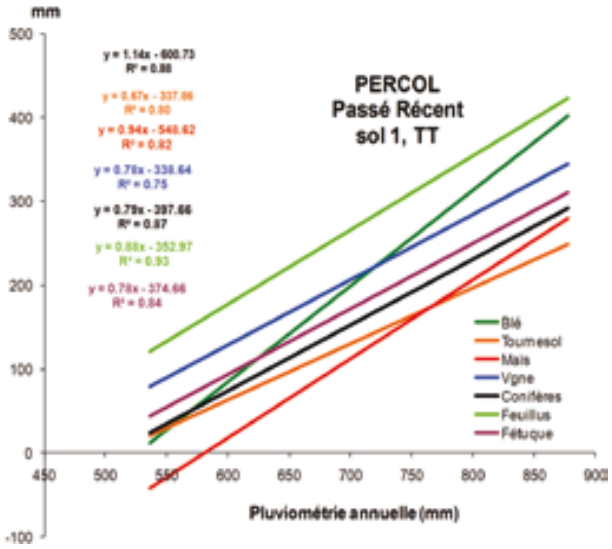


Figure 7 : *régressions linéaires entre la recharge des aquifères (PERCOL) et la pluviométrie annuelle établies pour différents systèmes de culture ou végétations naturelles dans le passé récent à partir des 12 sites.*

Les régressions de la figure 7, établies à partir de modèles spécifiques et sous les conditions climatiques du PR des douze sites, soulèvent plusieurs questions.

- Pour chaque système, d'autres modèles confirment-ils ces relations (cf. paragraphe sur les incertitudes et variabilités) ?
- Les relations établies pour un changement de pluviométrie lié à l'espace se conserveront-elles pour des changements de pluviométrie liés au changement climatique, c'est-à-dire au temps ?

L'évolution dans le temps de la restitution au milieu peut être approchée de deux façons :

- soit en comparant système par système l'évolution de la relation de PERCOL à P pour les deux périodes futures ;
- soit en établissant système par système la relation entre ΔPERCOL et ΔP, où Δ représente la différence entre une des périodes futures et le PR (fig. 3).

De façon très générale, la relation PERCOL *versus* P ne varie pas énormément, sauf dans le cas du maïs irrigué pour le futur lointain. Elle est du type $PERCOL_{passé} = a \times P_{passé} - b$ et évolue vers $PERCOL_{futur} = a' \times P_{futur} - b'$ avec $a' = a - \alpha$ et $b' = b - \beta$. Cette évolution peut être illustrée par la figure 8 pour le tournesol avec SUNFLO et pour la vigne avec BHV. Ainsi, pour une même valeur de P, on peut estimer $\Delta PERCOL = -\alpha P + \beta$.

Leurs valeurs obtenues pour α et β sur les différents systèmes de culture sont suffisamment proches les unes des autres pour permettre de définir des relations moyennes.

- Entre PR et FP : ΔPERCOL = – 0,114 P + 73,5 ; soit + 16,5 à 500 mm, + 5 à 600 mm et – 6,5 à 700 mm.
- Entre PR et FL : ΔPERCOL = – 0,1825 P + 121,5 ; soit + 30 à 500 mm, + 12 à 600 mm et – 6 à 700 mm.

La valeur plus élevée de PERCOL, à même pluviométrie, traduit l'influence positive du raccourcissement phénologique. Toutefois, il ne s'agit là que d'une composante car nous savons, par ailleurs, que la baisse de pluviométrie agira dans le sens d'une réduction de PERCOL (voir ci-après en figure 9, le lien entre la baisse de pluviométrie et l'évolution de PERCOL en un lieu donné).

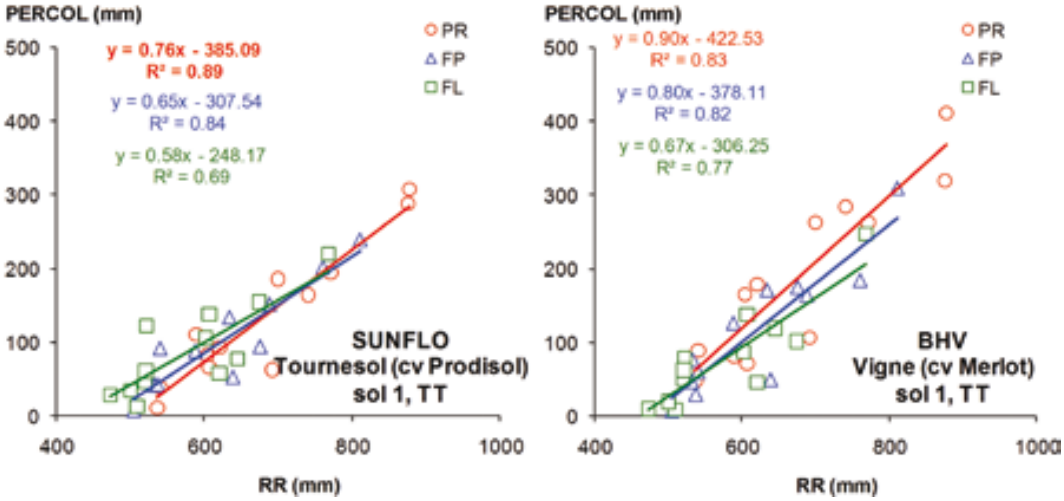


Figure 8 : *relation entre recharge des aquifères (PERCOL) et pluie pour le tournesol (cv Prodisol) avec SUNFLO (à gauche) et la vigne (cv merlot) avec BHV (à droite), pour les trois périodes sur sol commun avec méthode de régionalisation TT*.*

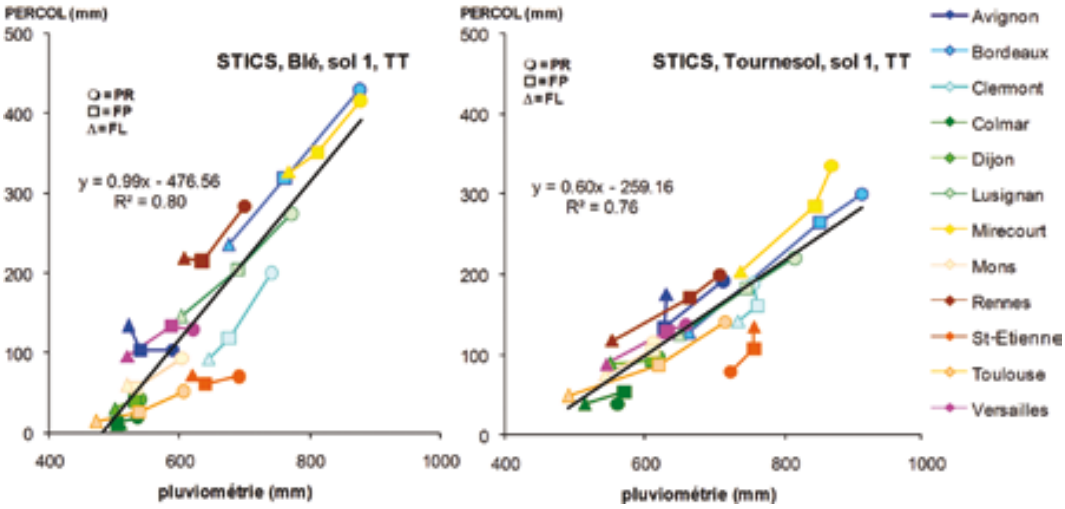


Figure 9 *: évolution de la recharge des aquifères (Percol) en fonction de la pluie, en différents lieux, pour le blé et le tournesol avec STICS (● passé récent, ■ futur proche, ▲ futur lointain).*

Dans le cas du maïs irrigué, on obtient, avec STICS, pour la variété Méribel (précoce), la relation :

Δ PERCOL = 0,008 P + 41 entre PR et FL, soit 45 mm pour P = 500 mm. Céréale de printemps, le maïs connaît un fort décalage du cycle phénologique avec diminution de la durée des phases (cf. fiche TIMING) qui induit, *ipso facto,* une diminution de l'ETM, ce qui permet une moindre diminution de la restitution au milieu à pluviométrie décroissante.

Si, à présent, l'on s'intéresse à l'évolution de la relation PERCOL *vs* P pour un système donné et un lieu donné, on peut voir sur la figure 9 que l'évolution temporelle est très voisine de l'évolution spatiale (une même couleur représentant le même site aux trois périodes). Ce résultat est confirmé par la figure 10 qui montre l'évolution de ΔPERCOL en fonction de ΔP pour FP et FL, pour les mêmes cultures. Notons que la baisse de restitution au milieu est toujours supérieure de l'ordre de 50 % à la baisse de pluviométrie ; ce qui posera un problème pour la recharge des aquifères qui, dans certains cas, sont utilisés directement pour l'irrigation et qui participent dans tous les cas à l'alimentation des rivières. L'avantage des cultures d'hiver sur les cultures pluviales d'été, en termes de restitution d'eau au milieu, diminuera dans le futur. Il ne faut pas en conclure que l'on aura intérêt à remplacer celles-ci par celles-là, car les cultures d'hiver en pluvial continueront à être faisables tandis que la production des cultures d'été en pluvial aura du mal à se maintenir (cf. fiches SORGHO et TOURNESOL).

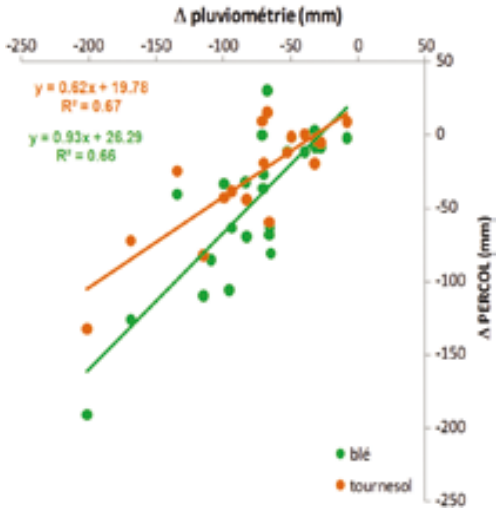


Figure 10 : *décroissance de la recharge des aquifères en fonction de la différence de pluie entre futur (FP et FL) et PR sur blé et tournesol pour différents sites avec le modèle STICS. Méthode de régionalisation TT et sol 1.*

E Poids des incertitudes (méthodes de régionalisation, modèles agronomiques) et de la variabilité (sols, variétés, pratiques) sur les résultats

Les incertitudes (cf. fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS)

L'incertitude climatique, approchée à partir des méthodes de régionalisation TT et QQ, a été analysée sur PERCOL et nous avons constaté que les relations obtenues pour les cultures pluviales avec les deux méthodes de régionalisation étaient tout à fait comparables (écarts inférieurs au 1/10e de la pluie) et rigoureusement identiques pour les cultures irriguées (maïs, vigne).

Il en est de même pour les modèles de culture* qui fournissent des valeurs très proches de PERCOL pour un même système de culture*, dès lors que les processus constitutifs sont bien pris en compte (drainage, ruissellement et irrigation).

Pour ETR/ETM, compte tenu de la divergence des calculs pour ETM au sein des modèles de culture, la comparaison des modèles se restreindra à BILJOU et GRAECO pour les conifères sur la figure 11 qui montre des évolutions dans le temps et l'espace identiques.

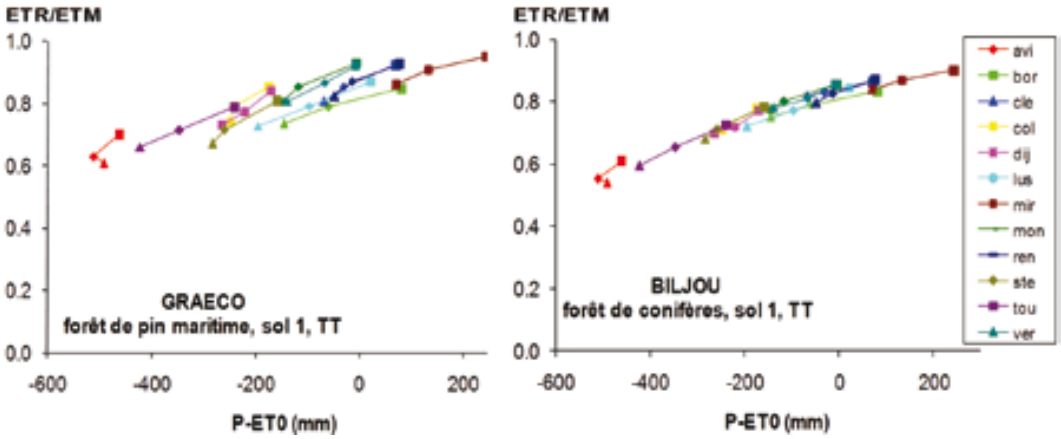


Figure 11 : *évolution comparée du rapport ETR/ETM des conifères avec BILJOU et GRAECO.*

Les sources de variabilité*

Il est important de situer la variabilité interannuelle, inhérente au climat, parmi les autres sources de variabilité. L'estimation de la variabilité imputable à plusieurs sources (équivalent d'un écart-type), pour le FP et le FL analysés séparément, montre que la variabilité interannuelle est une source majeure de variabilité pour PERCOL et qu'elle correspond à plus de 90 mm par an. La variabilité géographique et la variabilité entre systèmes sont toujours supérieures aux effets du changement climatique.

L'influence relative des sols sur PERCOL est faible pour les systèmes irrigués (tant sur l'évapotranspiration que sur la recharge des aquifères). En revanche, elle peut être conséquente pour les systèmes pluviaux : un sol à faible RU conduira systématiquement à des états hydriques déficients et une recharge d'aquifères supérieure. Cette relation inverse à la réserve hydrique se vérifie de façon systématique sur blé, tournesol, vigne, prairies, feuillus et conifères, quels que soient le modèle agronomique utilisé et la méthode de régionalisation. À titre d'illustration, on a porté sur le tableau 3 la valeur de la recharge supplémentaire sur un sol à faible réserve utile* (RU = 104 mm pour les cultures annuelles, 73 mm pour la vigne, 92 mm pour la prairie, 126 mm pour les feuillus et 103 mm pour les conifères) par rapport à un sol de forte réserve utile* (RU = 226 mm), obtenue sur différents systèmes de cultures par différents modèle pour trois valeurs de pluviométrie.

Culture	Modèle	ΔRU	Écart à 500	Écart à 600	Écart à 700
Monoculture blé	CERES	122	37	35	33
Monoculture blé	STICS	122	77	47	17
Monoculture tournesol	STICS	122	74	74	74
Monoculture tournesol	SUNFLO	122	74	76	78
Vigne pluviale	STICS	153	26	19	12
Vigne pluviale	BHV	153	56	49	41
Graminées fourragères	PASIM	134	47	42	37
Conifères	GRAECO	123	37	38	39
Conifères	BILJOU	123	56	56	57
Feuillus	BILJOU	100	56	51	46

Tableau 3 : *écarts (en mm) de recharge entre un sol à faible RU, variable selon les systèmes, et un sol à forte RU (226 mm), la différence de RU (en mm) étant fournie en colonne 3, à différentes valeurs de pluie pour différents systèmes de cultures.*

Pour ETR/ETM, l'incidence de la réserve hydrique du sol est particulièrement marquée pour le tournesol, culture de printemps, et la vigne, tandis qu'elle est moins marquée pour le blé, les feuillus et les conifères.

L'influence des pratiques est illustrée par le changement de densité sur vigne conduite sur sol nu. Que ce soit avec STICS ou avec BHV, PERCOL est supérieur à faible densité, dès lors que ETR est plus faible qu'à forte densité : pour P = 600 mm, les deux modèles donnent des écarts de l'ordre de 30 mm entre une densité de 3 000 et une densité de 9 000 pieds/ha.

L'influence de la durée de rotation* des conifères, analysée par GRAECO, montre que la recharge des aquifères décroît avec la durée de la rotation : pour P = 600 mm, l'écart de PERCOL entre rotation longue (80 ans) et rotation moyenne (50 ans) est de l'ordre de 15 mm.

L'effet des variétés est particulièrement probant sur le confort hydrique. Par exemple, la figure 12 montre comment la précocité de la variété Soissons permet, par esquive, une meilleure réponse à la sécheresse que la variété Arminda, quelle que soit la période (écart pouvant aller jusqu'à 10 %). Sur vigne, cet effet est également visible sur sol à faible réserve utile entre les cépages merlot et grenache. Chez les graminées, les valeurs d'ETR/ETM de la fétuque et du ray grass sont voisines aux faibles valeurs de P – ET0, tandis que la différence se creuse au détriment de la fétuque pour les fortes valeurs (0,8 pour la fétuque pour 0,9 pour le ray grass, à Avignon et Toulouse).

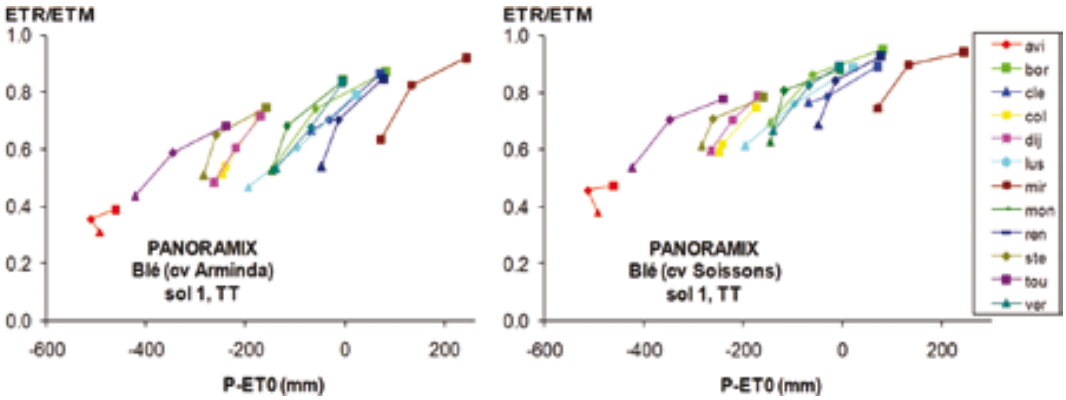


Figure 12 : *évolution du confort hydrique sur 12 sites et 3 périodes pour deux variétés de blé : Arminda (tardive) à gauche et Soissons (précoce) à droite.*

F Dangers et opportunités : différences entre régions

L'eau jouera dans le futur un rôle conséquent dans les possibilités d'adaptation au changement climatique. Ainsi les adaptations à l'augmentation de température seront conditionnées par la capacité de la ressource hydrique à y faire face. Ceci concernera aussi bien les cultures pluviales que les cultures irriguées.

- Pour les cultures pluviales, il faudra que la pluviométrie soit suffisante pour permettre la réalisation du cycle phénologique dans des conditions compatibles avec une production rentable.
- Pour les cultures irriguées, il faudra qu'il y ait suffisamment d'eau pour irriguer. Sans aller jusqu'à la remise en question des capacités de fourniture d'eau par les barrages en amont des zones cultivées, il faut bien se poser la question des capacités d'irrigation des zones qui sont sous la dépendance de leurs propres aquifères. C'est, grosso modo, le cas de tout le grand Sud-Ouest. Comme le Sud-Ouest est la zone la plus touchée par la baisse de pluviométrie, on peut se poser la question des possibilités futures en termes de cultures irriguées dans les zones déjà fragiles structurellement, en gros, au moins le périmètre de l'agence Adour-Garonne (cf. fiches RÉGIONS, fiches IRRIGATION et MAÏS-SORGHO).

Le quart nord-est de la France bénéficiera quant à lui d'une augmentation de température sans avoir à subir de baisse importante de pluviométrie. On peut, à ce propos, faire état d'une opportunité de réalisation de cultures, aujourd'hui limitée par des questions thermiques (cf. fiche TIMING). Ne peut-on dès lors se poser la question du repositionnement à terme de certaines filières ?

Y aura-t-il un effet du changement climatique sur la qualité de l'eau ?

On ne peut répondre simplement à cette question, car les modifications attendues du climat vont provoquer des effets contradictoires. En effet, la diminution de la quantité d'eau percolant à travers le profil a tendance à diminuer le lessivage des nitrates, tout en favorisant une concentration accrue de ceux-ci dans la lame d'eau percolée. Dans le même temps, l'augmentation des températures, favorisant l'activité microbienne (cf. fiche MATIÈRE ORGANIQUE), augmentera la disponibilité d'azote minéral pour la plante mais aussi pour le lessivage.

Ces effets contradictoires expliquent que les tendances puissent s'inverser entre les périodes FP et FL. L'analyse des différentes sources de variabilité montre que les systèmes de cultures, les sites, les sols et surtout la variabilité interannuelle du climat pèsent beaucoup plus lourd sur le lessivage que le changement tendanciel du climat. Ceci est illustré par les différences entre sites ou entre sols (fig. 13). Le fort niveau d'interaction qui caractérise le changement climatique signifie que des effets pourront exister, mais simplement pour certaines combinaisons de site x sol x systèmes.

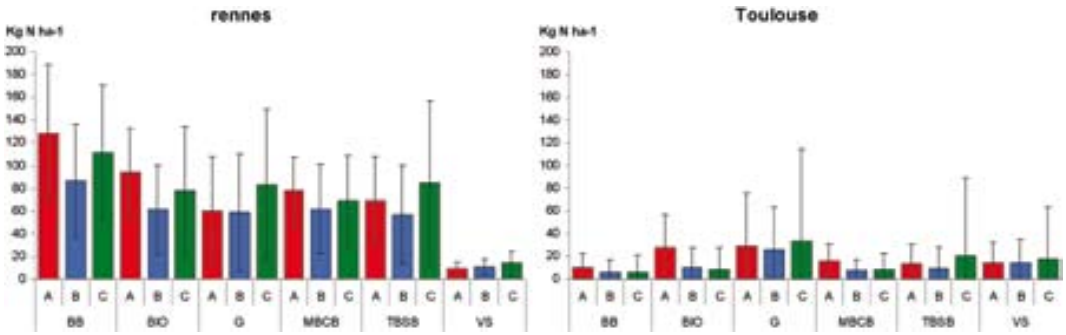


Figure 13 : *comparaison du lessivage d'azote obtenu par STICS à Rennes et à Toulouse, sous différents systèmes de cultures, pour les trois périodes (A = PR, B = FP, C = FL) et le sol commun.*

Parmi les systèmes de culture, le système prairial semble être le plus variable, car il offre de fortes quantités de résidus produisant par minéralisation beaucoup d'azote qui, en cas de détérioration des conditions de croissance (ex. de Toulouse), ne seront pas absorbés par les plantes.

Ce qu'il faut retenir

✓ Le changement climatique va provoquer une baisse de pluviométrie (offre) couplée avec une augmentation de l'évapotranspiration de référence (demande climatique). Cela sera tout particulièrement marqué dans l'Ouest affectant des zones déjà structurellement fragiles (Sud-Ouest). Ce déséquilibre accru entre l'offre et la demande, matérialisé par l'augmentation de l'indice P – ET0, se fera sentir :

- d'une part sur le confort hydrique des cultures pluviales. Le rapport ETR/ETM décroîtra sur l'ensemble des systèmes étudiés, tandis que le besoin virtuel d'irrigation (ETM – ETR) croîtra dans le futur proche avant de décroître dans le futur lointain, en raison du raccourcissement des phases phénologiques,
- d'autre part sur les capacités d'irrigation des cultures irriguées (cf. fiche IRRIGATION). En effet, la restitution d'eau au milieu (drainage + ruissellement – irrigation) de l'ensemble des systèmes (pluviaux comme irrigués) décroîtra (grosso modo les 2/3 de la baisse de pluie affecteront l'eau « bleue »*) tandis que les doses d'irrigation nécessaires aux cultures irriguées augmenteront. Cette augmentation des doses d'irrigation sera toutefois tempérée par la diminution de l'ETM, résultant du raccourcissement des phases phénologiques.

✓ Ces résultats dépendent peu des méthodes de régionalisation utilisées et sont concordants d'un modèle de culture à un autre, quel que soit le système de culture. 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). Notons, toutefois, que la variabilité interannuelle qui reste prépondérante peut masquer ces évolutions à long terme.

✓ L'ensemble permet de nourrir la problématique régionale au travers des dangers (comme la capacité à poursuivre une monoculture irriguée dans le Sud-Ouest) et des opportunités (comme les perspectives offertes au Nord-Est pour la culture du maïs, dès lors qu'à des températures suffisantes ne s'opposeront pas des pluviométries déficientes) (cf. fiches RÉGION).

Ce qu'il faut approfondir…

✓ Pour parvenir à mieux cerner dans le futur les questions relatives à l'état quantitatif de la ressource en eau et au confort hydrique des cultures, Il importe de progresser dans différents domaines connexes au projet CLIMATOR. Ce sera notamment le cas de l'amélioration de la prévision des précipitations à l'échelle régionale et l'amélioration de la connaissance de l'impact de l'organisation des systèmes de cultures sur la ressource à l'échelle du bassin versant (Itier *et al.,* 2009).

✓ Pour ce qui concerne les thématiques propres à CLIMATOR, le point principal à fouiller dans le futur concerne l'incidence de l'optimisation des pratiques, principalement pour les cultures de printemps qu'une pénurie d'eau pénalise de deux façons :

- forte diminution de la productivité pour les cultures pluviales (alors que les cultures d'hiver bénéficient naturellement de l'esquive à la reprise de végétation) ;
- augmentation des doses d'irrigation pour les cultures irriguées dans un contexte de diminution de la disponibilité de la ressource en raison de la baisse de restitution au milieu de l'ensemble des couverts végétaux, mais aussi d'un moindre apport exogène lié à la baisse de précipitations sur les massifs environnants.

✓ Des semis optimisés (en fait plus précoces) laissent espérer une atténuation de cette pénalisation (en complément de l'amélioration génétique de l'efficience de l'eau). Quelques simulations préliminaires ne permettent pas de conclure aujourd'hui. Il faudra systématiser l'approche dans une suite à CLIMATOR.

Pour en savoir plus…

Amigues, J.-P., Debaecke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F. and Thomas, A. (eds.), 2006. *Sécheresse et agriculture : réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau.* Expertise scientifique collective, synthèse du rapport d'expertise réalisé par l'INRA à la demande du Ministère de l'Agriculture et de la Pêche, INRA, Paris. 72 p.

Itier B., Brisson N., Doussan C., Tournebize R. 1997 - Bilan hydrique en agrométéorologie.

In: *« Du couvert végétal à la région »*, Lagouarde J.-P., Cruiziat P. (eds.), École-Chercheurs INRA en Bioclimatologie, Le Croisic, 25-29/03/1996, INRA Département de Bioclimatologie, tome 2, 383-397.

Itier B., Le Bissonais Y., Merot P., Allain S., Brisson N., Caballero Y., Chanzy A., Gascuel C., Ferrand N., King C., Pauwels H., Sierra G., Walter C. 2009 – ARP/ANR – ADAGE, Tâche 13 : *« EAU et SOL »*

Évolution des besoins en irrigation des cultures

Frédéric Levrault, Bernard Itier, Nadine Brisson

B 3
Irrigation

A L'irrigation en France

Historiquement présente dans le Sud-Est de la France, à un degré moindre dans le Sud-Ouest, l'irrigation s'est fortement développée à partir des années 1970 en raison de son intérêt économique (rendements accrus et stabilisés), de la densité de nos ressources en eau, des épisodes climatiques secs au tournant des années 1990 et de la PAC qui a institué des aides directes aux cultures irriguées. De 1970 à 2000, la surface irriguée a ainsi triplé (passant de 500 000 à 1 500 000 hectares, selon Agreste). Depuis, face à une réticence sociale qui s'accentue, et dans un cadre législatif devenu plus contraignant, elle régresse un peu. En 2007, la surface irriguée était de 1 414 000 hectares (5,6 % de la SAU) et la surface équipée de 2 508 000 hectares (10 % de la SAU), ce qui place la France dans la moyenne mondiale.

L'irrigation est ainsi devenue en quarante ans un fait majeur de l'agriculture française : sur les 326 000 exploitations agricoles professionnelles que comptait la France métropolitaine en 2007, 74 000 (23 %) étaient équipées pour l'irrigation et 64 500 (20 %) irriguaient réellement. L'irrigation se pratique peu ou prou dans toutes les régions et le seuil des 5 % de la SAU équipés pour l'irrigation est dépassé dans 55 départements (fig. 1).

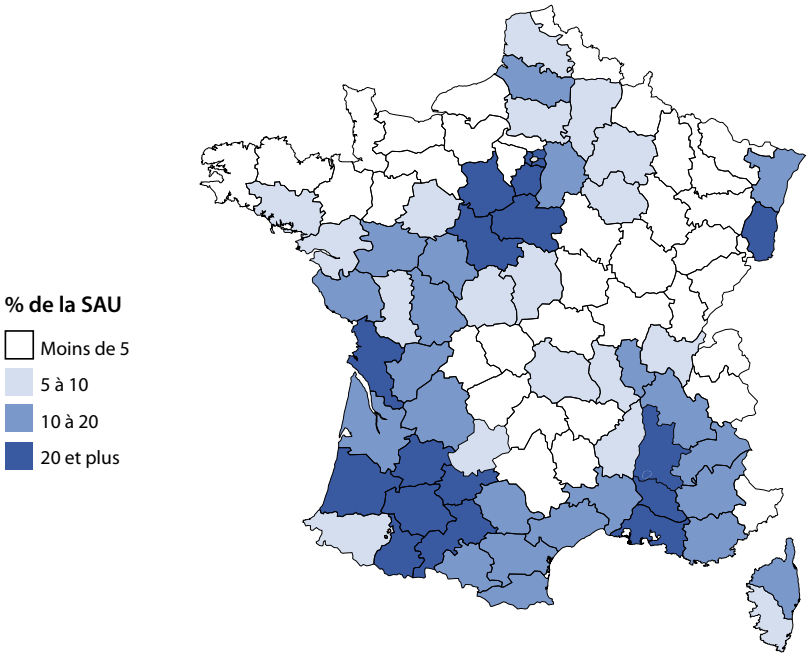


Figure 1 *: part de la SAU équipée pour l'irrigation en 2007 (source Agreste).*

L'irrigation concerne une large gamme de productions végétales : maïs, cultures fourragères, arboriculture, cultures légumières, céréales (hors maïs), oléoprotéagineux, betterave, pomme de terre… Cependant, le maïs (fourrage inclus) représente la moitié des surfaces irriguées (fig. 2 à gauche), ce qui concentre sur cette céréale les interrogations et débats. Quatre régions représentent à elles seules les trois-quarts de la surface de maïs irrigué : Aquitaine, Midi-Pyrénées, Centre et Poitou-Charentes (fig. 2 à droite). C'est dans ces mêmes régions que les déséquilibres « ressources/prélèvements » sont les plus sensibles.

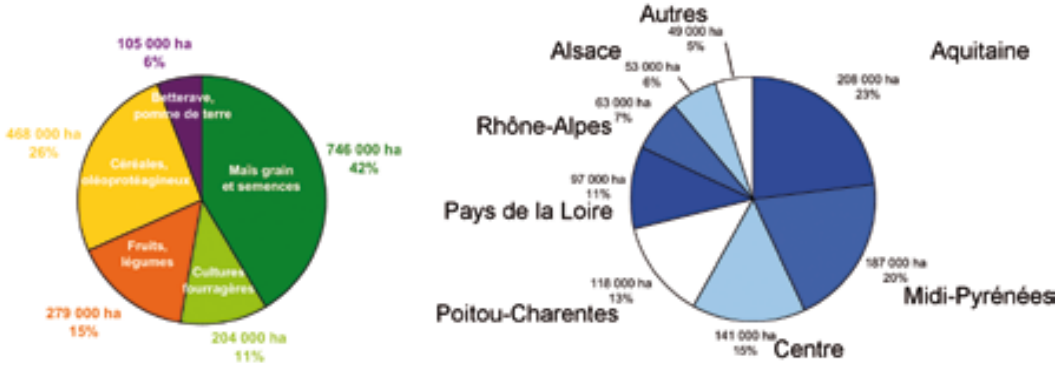


Figure 2 *: répartition par culture des surfaces irriguées en France en 2003 (à gauche) et surface de maïs irrigué par région en 2007 (à droite) pour un total de 916 000 hectares (source Agreste).*

Si le poids économique de l'irrigation est considérable, son effet sur le milieu ne l'est pas moins : sur les 32,6 milliards de m³ d'eau prélevés au milieu en 2006 en France (fig. 3), l'irrigation représente le troisième poste avec 4,8 milliards de m³ (11 %) derrière la production d'énergie (19,1 milliards de m³) et la production d'eau potable (5,9 milliards de m³). Rapporté à la surface irriguée, cela représente environ 3000 m³ par hectare soit 300 mm. Lorsque l'on analyse les volumes d'eau non restitués au milieu (consommation), l'irrigation représente le premier poste. Les dispositifs de gestion mis en place à partir des années 1990, et révisés depuis, visent année après année à établir un équilibre entre disponibilité de la ressource et besoins pour l'irrigation (fig. 4). On observe que les volumes d'eau utilisés pour l'irrigation varient nettement d'une année sur l'autre en fonction des conditions climatiques : en moyenne nationale pour le maïs, 1600 m³ par hectare en 2002, 2 400 m³ par hectare en 2003 et 2 700 m³ par hectare en 2005 (source Agreste).

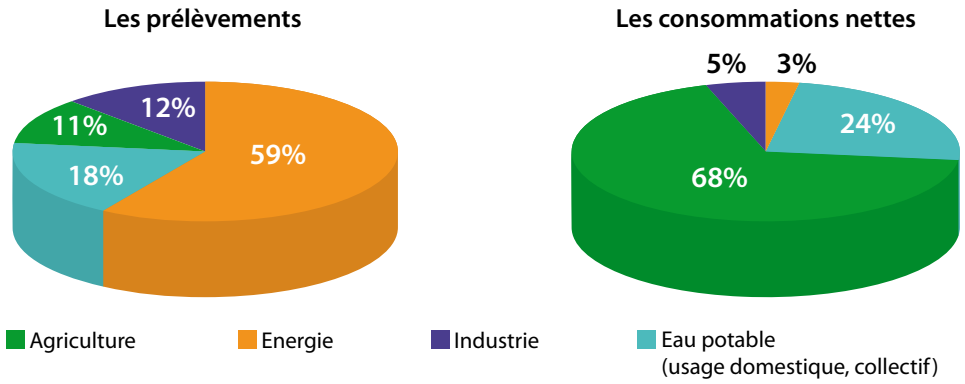


Figure 3 *: part des différents acteurs dans le prélèvement et la consommation d'eau à l'échelle du territoire français (in Leenhardt, 2007).*

Ces quelques repères économiques, géographiques et environnementaux montrent que l'impact du changement climatique* sur l'irrigation est un sujet majeur pour l'agriculture française. Étudier dès à présent ces effets facilitera les choix d'adaptation* au changement climatique* concernant ce moyen de production.

État des arrêtés de limitation des usages :

☐ **Néant**
Aucun arrêté

Mesures planifiées
Mesures de limitation des usages non effectives mais des mesures ont été planifiées à long terme en cas de nécessité (arrêtés de cadre)

Mesure effectives
Niveau 1- mesures limitées : toutes mesures de limitation des usages inférieures ou égales à 1j/7 ou à 15% du volume sur au moins un bassin versant

Niveau 2 - mesures fortes : mesures de limitation des usages supérieures ou égales à 1 j/7 sur au moins un bassin versant mais inférieures à 7j/7

Niveau 3 - restrictions totales : restriction totale sur au moins un bassin versant

Nouveaux départements concernés (delta hebdomadaire)

Source des données : Préfectures
Fonds cartographiques : IGN - BD GÉOFLA©

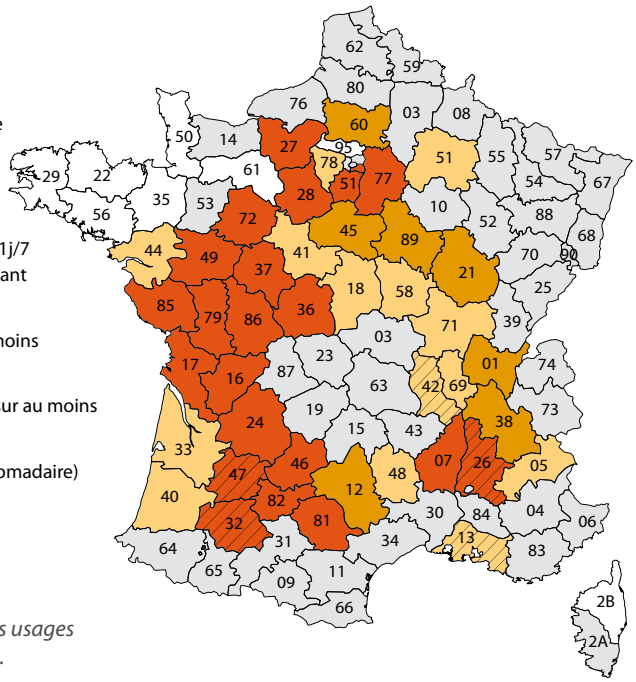


Figure 4 : *arrêtés préfectoraux de limitation des usages de l'eau au mois d'août 2009 (Source : MEEDM).*

B Enjeux du changement climatique pour l'irrigation

L'irrigation a une large distribution géographique. Les déclinaisons régionales du changement climatique doivent donc être prises en compte : il ne faut pas raisonner en termes « de l'effet » mais « des effets » du changement climatique.

L'irrigation du maïs concentre beaucoup de questions. Mais d'autres cultures sont aujourd'hui irriguées (blé, tournesol, sorgho…) qui ne doivent pas être oubliées. On peut même s'interroger sur l'intérêt de l'irrigation pour des cultures actuellement non irriguées (vigne, prairie, colza).

Le changement climatique aura des effets sur les besoins en eau d'irrigation des cultures, et ces besoins peuvent être étudiés tels quels. Cependant, la capacité à délivrer cette eau, qui est liée à la disponibilité de la ressource elle-même, reste une donnée fondamentale du problème.

Enfin, si les questions sur l'irrigation se posent en termes de volume, elles se posent aussi en termes de calendrier, car cela n'est pas sans lien avec la dynamique temporelle (charge/décharge) des aquifères.

C Évolution des besoins en irrigation des cultures actuellement irriguées

La question du besoin en irrigation peut s'examiner de différentes façons : on peut privilégier une analyse « au potentiel » qui évite toute limitation de l'alimentation hydrique des plantes (ETR* = ETM*) (cf. fiche EAU fig. 6), ou bien intégrer une réalité hydrologique et agricole qui se caractérise par une indisponibilité plus ou moins marquée de la ressource en eau (ETR < ETM). Nous avons choisi ce deuxième cas, avec une irrigation permettant la couverture de 80 % des besoins en eau de la culture dans le cas du maïs, de 70 % dans le cas du blé et 50 % dans le cas du sorgho (irrigation dès que ETR atteint respectivement 0,8, 0,7 et 0,5 ETM). Nous distinguons le cas des cultures pour lesquelles l'irrigation est « centrale », typiquement le maïs, de celui des cultures pour lesquelles l'irrigation n'intervient qu'en fin de cycle, typiquement le blé ou les cultures pour lesquelles il s'agit d'une irrigation d'appoint, comme le sorgho ou le tournesol.

Le maïs

La figure 5 présente l'évolution des doses d'irrigation nécessaires pour conduire le maïs à 80 % de l'ETM en fonction de la différence entre la pluie et la demande climatique représentée par ET0. On peut constater à peu près partout une augmentation entre le passé récent et le futur proche, suivie par une diminution entre le futur proche et le futur lointain. Ce résultat, issu de la méthode de régionalisation TT et tout à fait concordant avec celui présenté dans la fiche EAU sur l'écart ETM – ETR, s'explique par les corrélations entre baisse de pluviométrie et augmentation de température. En effet, la diminution des doses d'irrigation requises dans la deuxième partie du siècle est liée au raccourcissement du cycle phénologique. Si ce raccourcissement a un effet bénéfique sur l'irrigation, n'oublions pas qu'il diminue la quantité totale de rayonnement intercepté par la culture et réduit la durée de remplissage des grains, ce qui, sans changement variétal, aura aussi des conséquences sur le rendement (cf. fiche MAÏS-SORGHO).

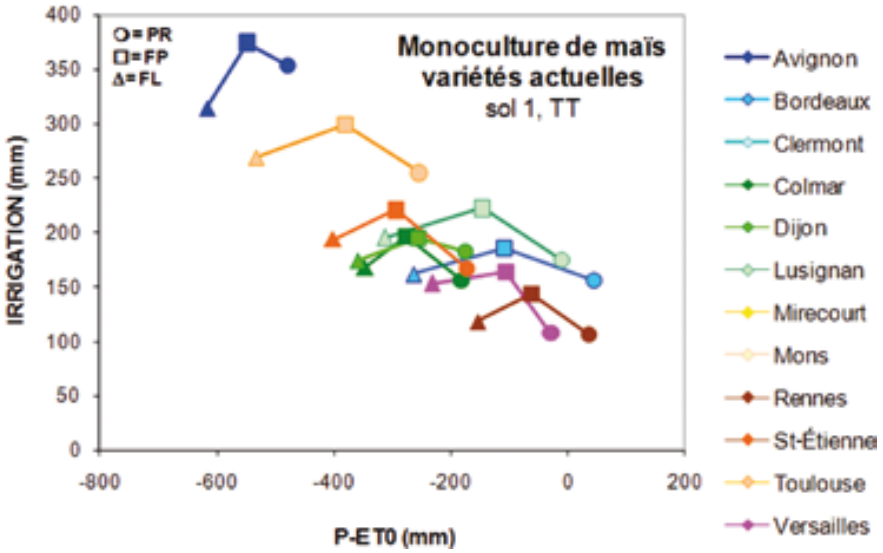


Figure 5 *: évolution de la dose d'irrigation nécessaire pour la conduite d'une culture de maïs à 80 % de l'ETM en fonction du déficit climatique (P – ET0) en divers lieux de France. Variétés utilisées : DKC5783 dans les sites* du Sud et Méribel ailleurs. Sol à forte RU* et méthode de régionalisation du climat TT.*

Cette réduction du cycle se traduit par une relation différente entre la dose d'irrigation et l'indice agroclimatique annuel (P – ET0) comme l'indique la figure 6. Cette différence de relation explique, en particulier, l'augmentation de la relation entre recharge des aquifères et pluie sous maïs irrigué pour la fin du siècle (cf. fiche EAU), qui rendra moins aiguë la tension sur la ressource à pluviométrie décroissante (à condition de ne pas utiliser des variétés à cycle encore plus long !).

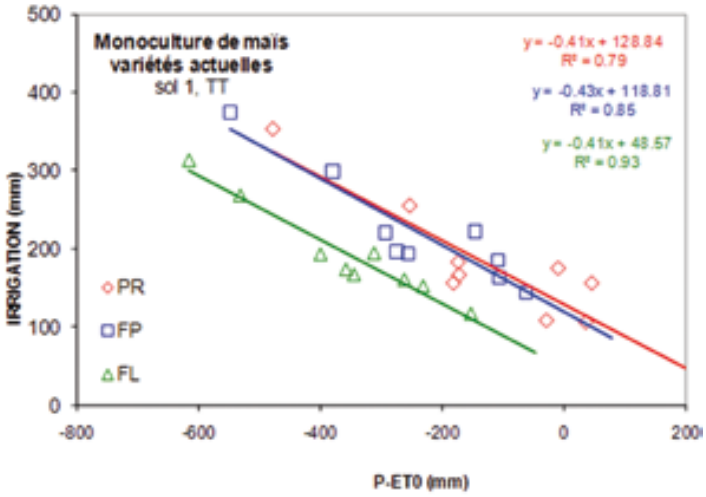


Figure 6 *: relation entre besoin en eau d'irrigation du maïs et déficit climatique (P – ET0) pour les trois périodes (rouge : passé récent, bleu : futur proche et vert : futur lointain).*

Cela étant, la demande en eau pour l'irrigation du maïs va augmenter dans le futur proche comme le montre la figure 7, quelle que soit l'incertitude climatique représentée par deux méthodes de régionalisation (TT* et QQ*). On peut situer ce besoin supplémentaire aux alentours de 40 mm.

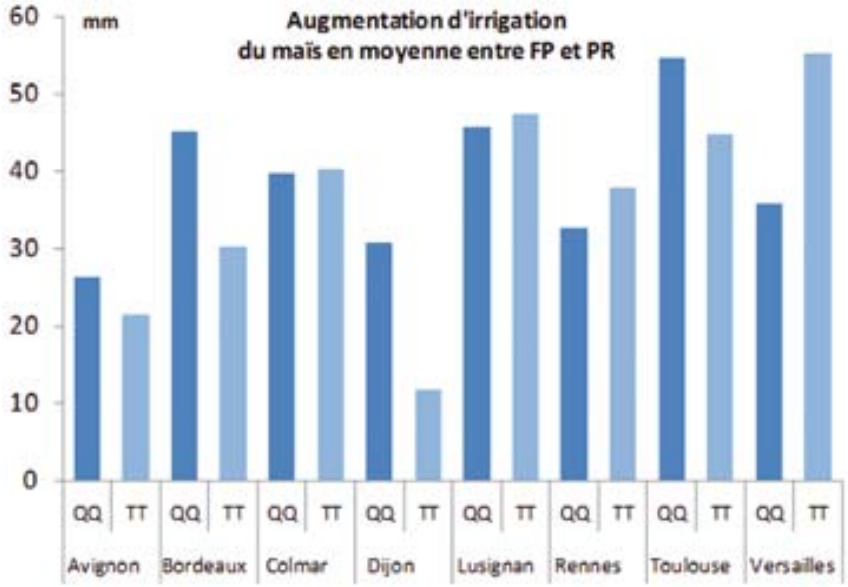


***Figure 7** : comparaison des différences de doses d'irrigations du maïs entre FP et PR selon deux méthodes de régionalisation (sol 1 à forte RU).*

Cependant, le poids de la variabilité interannuelle et du choix du sol reste prépondérant : on les estime pour un sol profond à environ 60 mm.

Le blé

Sur un sol limoneux profond (fig. 8 à gauche), les besoins en irrigation n'évolueront pas, restant en moyenne dans une gamme 40-60 mm par an et surtout focalisés sur la phase terminale du cycle. En revanche, une évolution apparaît pour les sites du Sud (Toulouse et Avignon) et de l'Est (St-Étienne, Colmar, Dijon) sur les sols à faible RU (fig. 8 à droite) avec des irrigations nécessaires avant la floraison. Mis à part pour le site de Toulouse, on n'observe pas de diminution significative en fin de siècle, comme pour le maïs, car l'anticipation* des stades de développement* ne s'accompagne pas, chez le blé, d'une réduction de la phase soumise au déficit hydrique (cf. fiche TIMING). Par ailleurs, on note que l'augmentation des besoins en irrigation est plus importante avec la méthode de régionalisation* TT qu'avec la méthode QQ.

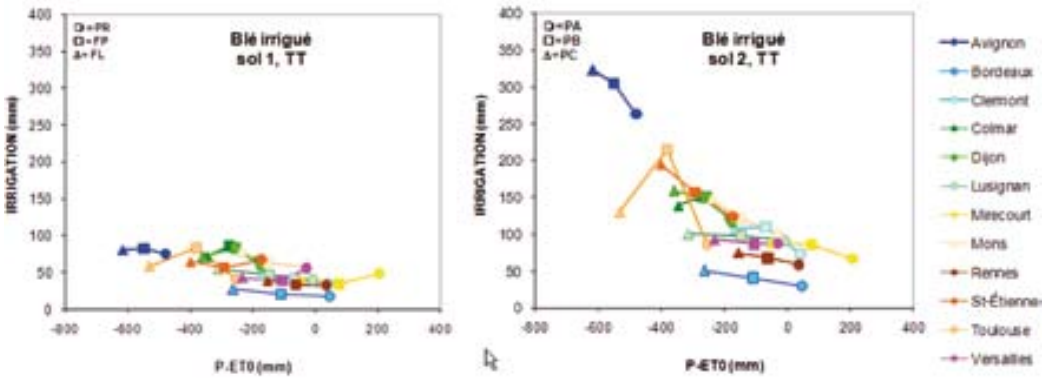


***Figure 8** : évolution de la dose d'irrigation nécessaire pour la conduite d'une culture de blé à 70 % de l'ETM en fonction du déficit climatique (P – ET0) en divers lieux de France sur deux sols de grande culture, l'un à forte RU (223 mm) à gauche et l'autre à faible RU (104 mm) à droite.*

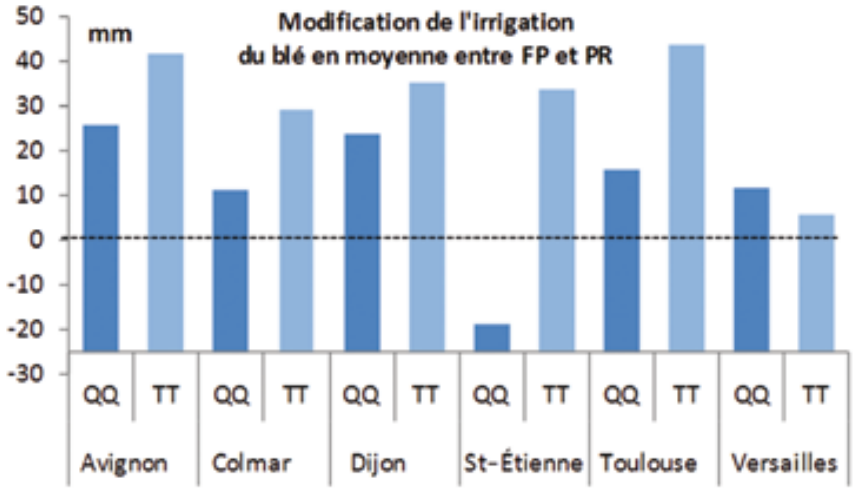


Figure 9 *: comparaison des différences de doses d'irrigations du blé entre FP et PR selon deux méthodes de régionalisation (sol 2 à faible RU).*

Le sorgho

L'irrigation d'appoint du sorgho à Toulouse montre une évolution semblable à celle du maïs avec une augmentation dans le FP de l'ordre de 20 %, suivie par une diminution dans le futur lointain (fig. 10). Contrairement au maïs, cette évolution n'a pas de conséquence sur le rendement* (cf. fiche MAÏS-SORGHO). On note, cependant, une augmentation de la variabilité de l'irrigation et si les valeurs moyennes sont, à la fin du siècle, du même ordre de grandeur que dans le PR, les 200 mm d'irrigation seront dépassés plus fréquemment.

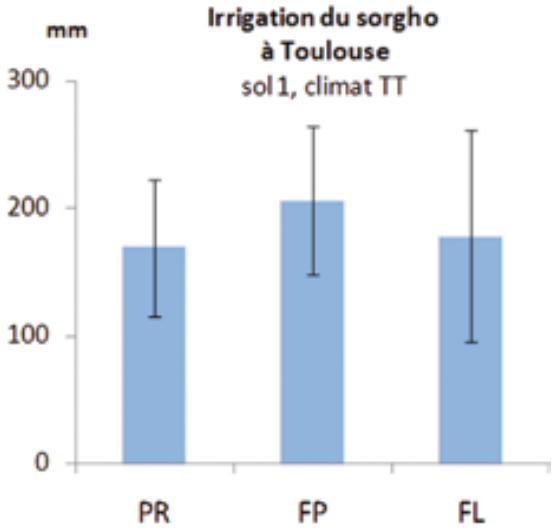


Figure 10 *: évolution des besoins en irrigation du sorgho conduit en irrigation de complément (50 % de ses besoins) à Toulouse. Sol 1, méthode de régionalisation du climat TT.*

D Nouveaux besoins en irrigation

La vigne

L'irrigation de la vigne est très controversée, mais, dans le cadre de notre étude prospective, nous avons analysé l'évolution des doses d'irrigation nécessaires à la conduite de la vigne à 30 % de l'ETM sur un sol de faible réserve utile (RU = 73 mm) et au goutte-à-goutte, comme on en rencontre souvent dans les vignobles.

On observe (fig. 11) qu'hormis à Avignon où les besoins sont plutôt stables puis décroissants dans le FL, il y a une augmentation des besoins en eau d'irrigation de la vigne. Toutefois, comme pour le maïs, les augmentations sont surtout importantes entre PR et FP. Compte-tenu de la persistance du feuillage de la vigne pendant toute la saison à forte demande climatique, cet infléchissement en seconde partie du siècle est plutôt le résultat de l'effet antitranspirant du CO_2, actif chez les plantes en C3 (comme la vigne) et très peu chez les plantes en C4 (comme le maïs).

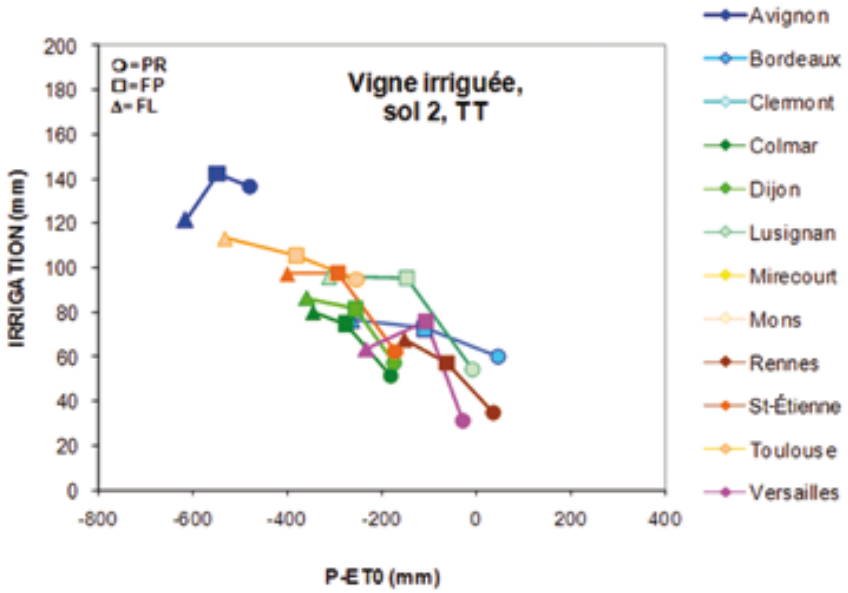


Figure 11 *: évolution de la dose d'irrigation nécessaire pour la conduite d'une culture de vigne à 30 % de l'ETM en fonction du déficit climatique (P – ET0) en divers lieux de France sur un sol de faible réserve utile (RU = 73 mm).*

La prairie

Sauf dans quelques contextes très ponctuels (prairies de Crau par exemple, bien représentées par le site d'Avignon), la prairie n'est pas irriguée actuellement. La figure 12 montre qu'effectivement, dans le PR, la ressource pluviométrique de sites fourragers traditionnels, comme Clermont-Theix, Mirecourt ou Rennes, permettait d'approcher 80 % des besoins en eau du couvert.

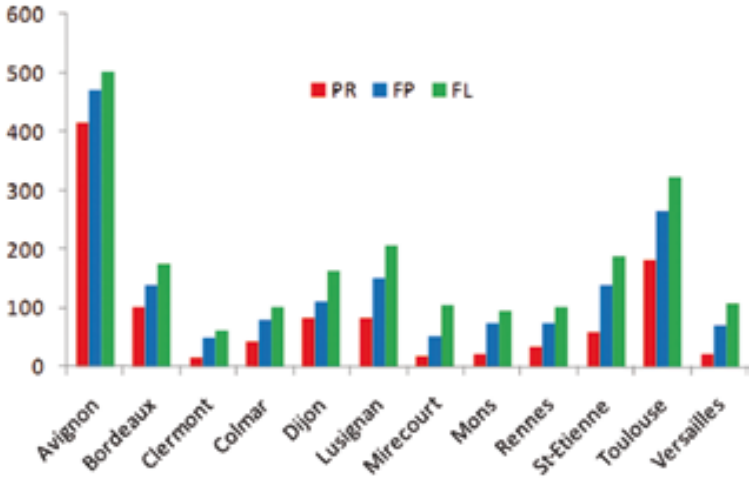


Figure 12 *: évolution des besoins en irrigation moyens d'une prairie de fétuque pour couvrir 80 % de ses besoins en eau (RU = 92 mm) simulé avec le modèle PASIM et la méthode de régionalisation TT.*

Or l'augmentation du déficit hydrique climatique dans les périodes futures peut générer des besoins en irrigation non négligeables pour continuer à assurer la production fourragère. Ainsi, dans le FL, les besoins en irrigation nécessaires pour couvrir 80 % des besoins en eau, sur un sol prairial typique, seront presque partout supérieurs à 100 mm en moyenne.

Les irrigations « starter »

Même pour les cultures traditionnellement pluviales, comme le colza, le tournesol ou le sorgho, la modification des conditions d'implantation pourra nécessiter d'avoir recours à une irrigation de début de cycle (irrigation « starter ») afin d'assurer le démarrage de la culture.

On voit ainsi à Toulouse (fig. 13), à partir des années 2030, se détériorer l'humidité du lit de semence, mais aussi une nette diminution de la couche sous-jacente qui risque de pénaliser la croissance* de la plantule.

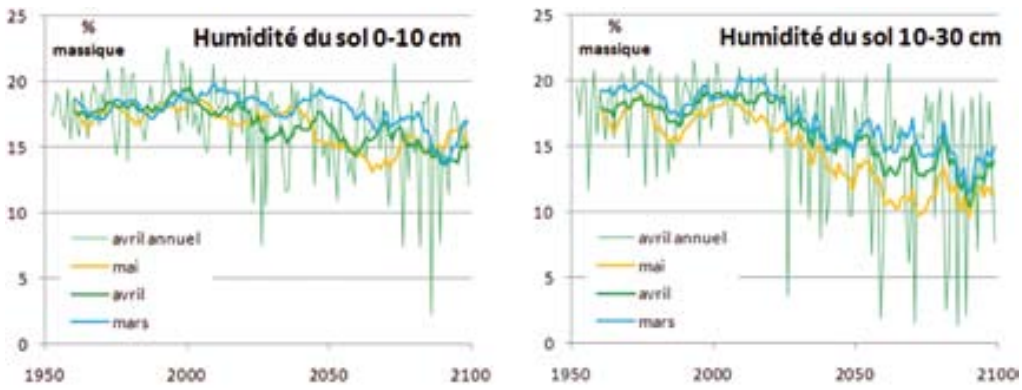


Figure 13 *: évolution de l'humidité pondérale d'un sol de grande culture à Toulouse, en moyenne, pour les mois de semis possible pour les cultures de printemps (mars, avril, mai) avec à gauche la couche superficielle et à droite la couche 10-30 cm. Les données ont été lissées (moyennes glissantes sur 10 ans), sauf pour le mois d'avril, afin de montrer la variabilité interannuelle.*

Pour le colza (exemple de Versailles en figure 14), le problème d'installation de la culture sera particulièrement important dans le futur proche (cf. fiche COLZA) et, sans apport d'eau supplémentaire, l'alimentation en azote de la culture risque d'être déficiente.

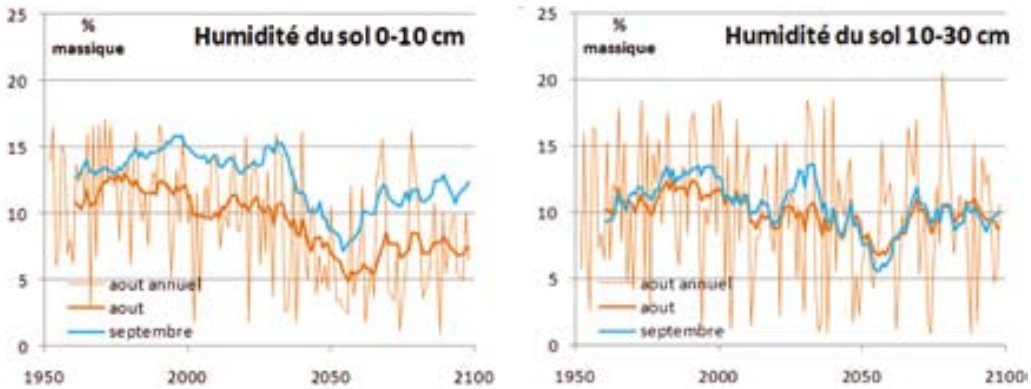


Figure 14 *: évolution de l'humidité pondérale d'un sol de grande culture à Versailles, en moyenne, pour les mois de semis possible pour le colza (août, septembre) avec à gauche la couche superficielle et à droite la couche 10-30 cm. Les données ont été lissées (moyennes glissantes sur 10 ans), sauf pour le mois d'août, afin de montrer la variabilité interannuelle.*

E Dynamique intra-annuelle des prélèvements d'eau (exemple du maïs)

Une difficulté à laquelle est confrontée l'irrigation – lorsque les prélèvements se font dans le milieu sans stockage intermédiaire – réside moins dans les volumes annuellement prélevés que dans la période (printemps et été) et l'intensité de ces prélèvements, au moment même où les aquifères sont vulnérables (situation dite d'étiage).

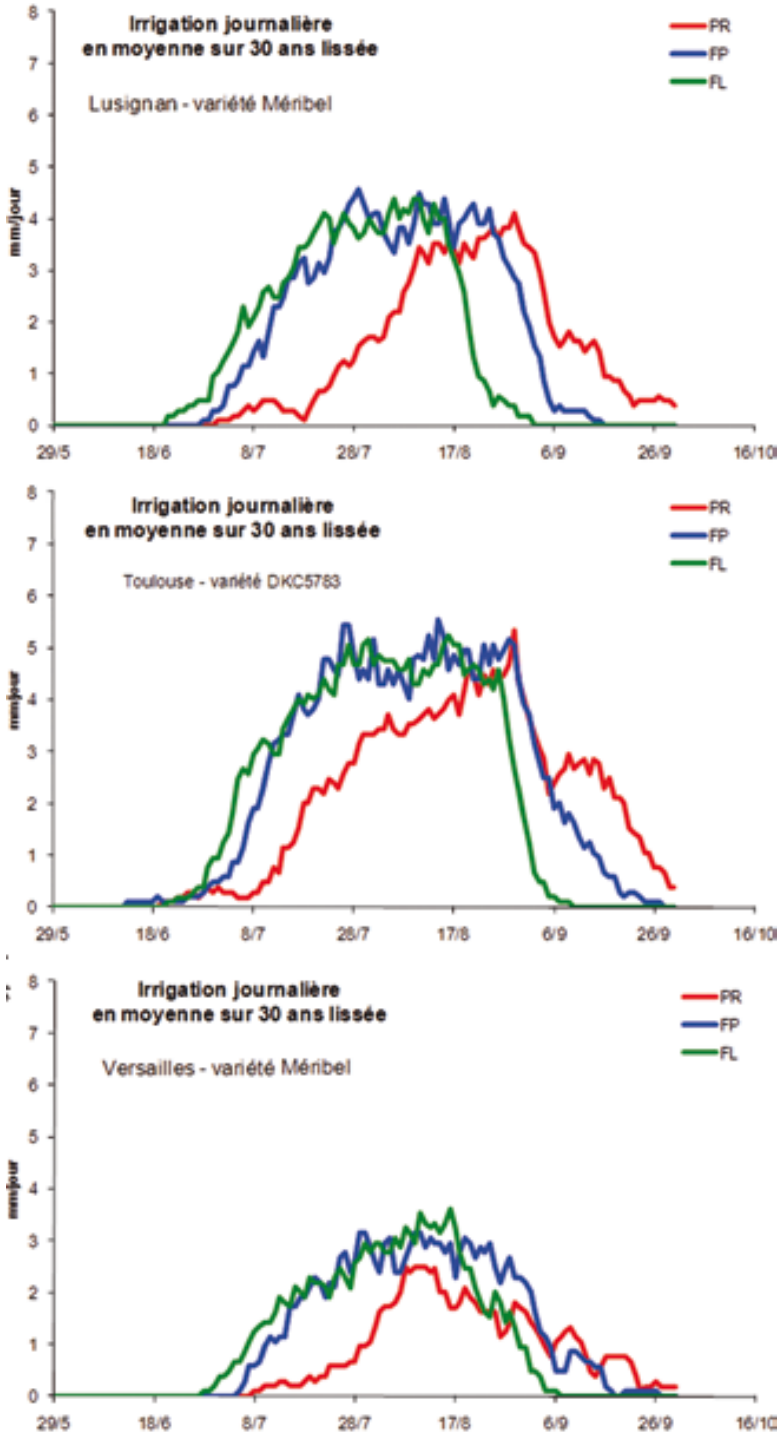


Figure 15 *: besoins journaliers en irrigation (moyennes sur trente ans, lissage par pas de 7 jours) d'un maïs irrigué à 0,8 ETM (pour Lusignan variété précoce, Toulouse variété tardive et Versailles variété précoce).*

Dans ce contexte, il est important d'étudier comment l'avancement prévu des cycles phénologiques se répercutera sur les calendriers d'irrigation, donc sur les dynamiques intra-annuelles de prélèvement d'eau. Nous examinons pour cela le cas du maïs irrigué dans trois situations géographiques : Toulouse (var. tardive DKC5783), Lusignan et Versailles (var. précoce Méribel). Les mêmes critères de déclenchement et le même sol (RU = 226 mm) sont utilisés pour l'ensemble de ces simulations.

On observe que la modification des rythmes d'irrigation (mm/jour en moyenne par période de 30 ans) s'opère sur l'ensemble de la période d'irrigation (fig. 15).

Sur la date de démarrage de l'irrigation
Elle change peu à Toulouse, mais avance d'une dizaine de jours à Lusignan et Versailles entre le passé récent et le futur lointain (cet effet ne pourra être qu'accentué par l'optimisation des dates de semis, c'est-à-dire à semis plus précoce : rappelons que nous avons effectué toutes les simulations à « pratiques fixées »).

Sur l'accroissement des besoins en début de cycle
Cet accroissement est lié essentiellement à l'augmentation de la surface foliaire. Il est plus bref et plus marqué (pente plus forte) pour les trois sites, cela dès le futur proche. Les températures accrues sont à l'origine d'une augmentation plus précoce et plus rapide de la surface foliaire de la culture.

Sur le maximum des besoins en irrigation
Il est constant à Toulouse, légèrement supérieur à Lusignan (+ 0,5 mm/j), nettement supérieur à Versailles (+ 1 mm/j). Avec les variétés utilisées, les maxima de surface foliaire sont atteints dans le passé récent à Toulouse et Lusignan, pas à Versailles.

Sur la décroissance des besoins en irrigation en fin de cycle
Elle est légèrement plus précoce et nettement plus rapide à Toulouse, plus précoce et plus rapide à Lusignan, un peu plus tardive et nettement plus rapide à Versailles.

Globalement, les besoins en irrigation restent plus élevés dans le sud que dans le nord de la France, mais, en relatif, les modifications les plus fortes sont observées à Versailles. Pour être étayés, ces résultats devront être complétés d'une analyse des bilans hydriques incluant le climat* et le sol, d'une prise en compte de l'avancement des dates de semis, de l'analyse d'un plus grand nombre de sites.

Le caractère « local » de ces résultats est frappant, lié notamment aux déclinaisons géographiques du changement climatique et à la diversité des pratiques agricoles/dates de semis et choix de variétés en particulier. En outre, ces résultats doivent être mis en comparaison avec l'évolution (sous l'effet du changement climatique) de la disponibilité de la ressource en eau (cf. § suivant).

En complément d'études sur le bien-fondé d'un stockage d'eau accru, l'enjeu de comparaisons « irrigation/disponibilité de la ressource » sera de préciser :

- à quel point cet avancement prévu des calendriers d'irrigation compensera les étiages plus précoces et plus sévères prévus par les hydrologues, du fait du changement climatique ;
- quelles adaptations des pratiques d'irrigation doivent être mises en place pour amplifier les effets positifs de l'avancement phénologique (dates de semis, choix de variétés plus précoces) et limiter ainsi les prélèvements en période d'étiage.

F À l'échelle de périmètres de gestion de l'eau

L'étude de l'effet du changement climatique sur l'adéquation entre disponibilité du milieu et prélèvements d'eau pour l'irrigation (y compris pour le remplissage hivernal de réserves artificielles) nécessiterait l'emploi de modèles d'aquifères (absents de CLIMATOR) couplés à des modèles climatiques.

À côté de la modification des ressources liées à la pluviométrie en amont des bassins versants concernés, les simulations conduites dans CLIMATOR ont montré (cf. fiche EAU) que la restitution aux aquifères par les différents systèmes du bassin versant lui-même baisserait d'une quantité de l'ordre des deux tiers de la baisse de pluviométrie. Cet élément revêt une importance première

non seulement dans les bassins qui ne peuvent s'appuyer que sur leurs propres aquifères (ex : Beauce), mais aussi pour ceux dont les ressources exogènes sont faibles (ex : Gascogne). Pour une baisse de pluviométrie de l'ordre de 100 mm sur la plupart des sites de l'ouest et du centre de la France, cela représentera un déficit de recharge de l'ordre de 60-70 mm/an

Ainsi, le problème majeur auquel seront confrontés les gestionnaires de bassin sera la conjonction de la baisse de la recharge avec l'augmentation de la demande pour les cultures de printemps (voisine de 40 mm pour le maïs), ce qui, si l'on en reste à l'occupation actuelle du territoire, conduit à un déficit global de l'ordre de 100 mm pour ces cultures.

Ce qu'il faut retenir

- ✓ Les besoins en irrigation des cultures actuellement irriguées vont augmenter. S'agissant du maïs, il faut s'attendre à une augmentation de l'ordre de 40 mm en moyenne dans les zones de production actuelles du maïs irrigué (Toulouse, Lusignan) entre le PR et le FP, ce qui correspond à un à deux tours d'eau avec les pratiques culturales actuelles. L'augmentation de l'irrigation du blé ne concernera que les situations particulièrement défavorables de sols superficiels avec des apports d'eau nécessaires avant la floraison. En matière d'irrigation de complément (exemple du sorgho), il faut s'attendre à devoir irriguer de l'ordre de 20 % en plus dans le FP par rapport au PR. Dans le FL, des effets de raccourcissement du cycle pour les cultures de printemps engendrent une stabilisation, voire une diminution, des apports d'eau qui ne seront effectives que si les variétés restent inchangées, conduisant les agriculteurs à accepter des baisses substantielles de rendement. S'il existe une forte incertitude entre méthodes de régionalisation, la tendance à l'augmentation n'est pas remise en cause. Elle est soumise à une variabilité interannuelle qui peut la cacher.
- ✓ De nouveaux besoins vont apparaitre ponctuellement pour la vigne, la prairie (pour un approvisionnement plus régulier du fourrage tout au long de l'année) ou pour des cultures annuelles comme le colza ou le tournesol. En effet, pour ces dernières, des irrigations « starter » pourront devenir nécessaires pour assurer la mise en place du peuplement et la croissance végétative.
- ✓ L'avancement des calendriers d'irrigation lié au réchauffement, renforcé par des choix variétaux plus précoces, apparaît comme une adaptation efficace à la moindre disponibilité en eau. La baisse probable des précipitations hivernales, généralisée dans le futur lointain, entraînera des difficultés de recharge des aquifères. Les projets d'accroissement des capacités de stockage d'eau pour l'irrigation devront en tenir compte.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ Les besoins en irrigation des cultures doivent être étudiés, non plus à confort hydrique fixé, mais à rendement maintenu, ce qui peut permettre d'identifier des marges d'économie d'eau.
- ✓ L'effet des dates de semis et des choix de précocité doit être étudié avec attention dans la mesure où cela semble représenter une voie intéressante d'économie d'eau, tout particulièrement pour le maïs.
- ✓ Un couplage avec une modélisation des aquifères est à faire, pour identifier les possibilités de remplissage d'ouvrages de stockage dédiés à l'irrigation.

Pour en savoir plus

Amigues J.-P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F., Thomas A., 2006 - Sécheresse et agriculture : réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. *Expertise scientifique collective, Rapport, INRA* (France), 380 pages + annexes.

Cabelguenne M. *et al.*, 1998 - Simulation de l'extraction d'eau et de la réponse des cultures en présence de contraintes hydriques diversifiées : Application aux grandes cultures du Sud-Ouest (blé, maïs, tournesol, soja, sorgho) In *Comptes-rendus de l'Académie d'agriculture de France*, vol 84-6, pp. 119 - 134.

Debaeke P., Amigues J.-P., 2008 - Face à la sécheresse et à la pénurie d'eau, quelles mesures pour ajuster la demande agricole à l'offre de ressource en eau ? *La Houille blanche* n°3.

Ducharne A., 2009 - Impact du changement climatique sur les ressources en eau et les extrêmes hydrologiques dans les bassins de la Seine et de la Somme. *Présentation au Colloque de restitution du programme GICC* http://www.sisyphe.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/DOCS/gicc_resti09_ducharne.pdf

Gleyses G., Rhieu T., 2004 - *L'irrigation en France. État des lieux 2000 et évolution*. 60p CEMAGREF.

Gresillo, J.-M. *et al.*, 2007 - Changement climatique et évènements extrêmes : crues, inondations, sécheresses. Que peut-on dire aujourd'hui ? *Revue française de géotechnie*, 120 - 121, pp. 27 - 34.

Leenhardt D., 2007 - Usage agricole et autres usages de l'eau : comment mieux partager l'eau ? Conférence de l'association *« Les eaux et les hommes »* Vittel, 17 10 2007.

Lorgeou J. *et al.*, 2009 - Conséquences de l'évolution des conditions climatiques des vingt dernières années sur la production de maïs grain et stratégies d'adaptation. In Colloque *« Changement climatique : conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore »*, Paris Octobre 2009, 35 - 49.

Sauquet E., 2009 - Climat et aménagements de la Garonne : quelles incertitudes sur la ressource en eau en 2030 ? *Présentation du projet IMAGINE 2030.* http://www.rdtrisques.org/programme/seminairemiparcoursrdt2marseille19et20mars2009/presentationsdesprojets/session3/SAUQUETRDTMARSEILLE.pdf/file_view

Stockage/déstockage de carbone dans les sols

Jorge Sierra

B 4

Matière organique

A Concepts et définitions

La matière organique (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 le stockage d'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). La teneur en C organique dans un sol est le produit d'un bilan d'entrées et de sorties pendant une période donnée. Ce bilan peut être positif (stockage), négatif (déstockage) ou nul. Des variations dans le bilan à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation, à cause d'un changement d'occupation ou des pratiques, affectent toutes les fonctions agro-environnementales citées ci-dessus et, en conséquence, la qualité physique, chimique et biologique du sol dans son ensemble. À l'échelle planétaire, la quantité de C organique dans les sols représente environ trois fois celle stockée dans la végétation et deux fois celle présente dans l'atmosphère. Cela implique qu'une variation de sa teneur dans les sols, à cause par exemple du changement climatique*, peut avoir des impacts considérables sur le C atmosphérique, impliquant une accentuation (déstockage) ou, au contraire, une atténuation (stockage) du réchauffement.

La qualité et la quantité des entrées du bilan sont déterminées par la végétation et la gestion du système de culture*. Par exemple, en agriculture, les entrées principales correspondent aux résidus de récolte, les racines et les amendements organiques (compost, fumier, etc.). Dans une prairie, les entrées correspondent aux déjections animales (prairie pâturée) et aux racines mortes et recyclées suite au pâturage ou à une fauche. Ces entrées de C subissent les processus de minéralisation* et d'humification*, dont les vitesses dépendent de la qualité* des résidus et des amendements. Les sorties du bilan de la MO du sol correspondent principalement à sa minéralisation et, dans certains cas, à l'érosion et à la lixiviation* des composés organiques solubles. La minéralisation et l'humification sont réalisées par la microfaune (insectes, vers de terre, etc.) et la microflore du sol (bactéries et champignons), et sont affectées par les conditions physique et physico-chimique du sol (température, teneur en eau et en argiles, pH, etc.).

Quel est l'impact du changement climatique en termes de stockage/déstockage de C ? Quelles sont les variables qui contribuent à la vulnérabilité du sol ? Quels facteurs ou processus peuvent nuancer une tendance au déstockage ? Est-ce que l'on peut s'attendre à un gradient géographique de l'impact du changement climatique ? Ce sont les questions auxquelles nous essayerons de répondre dans ce chapitre, après avoir revisité les mécanismes majeurs impliqués dans la réponse de la MO du sol au changement climatique.

B Mécanismes en jeu

La figure 1 représente, sous forme simplifiée, le bilan de C dans un système de culture affecté par le changement climatique. Le bilan, pour une période donnée, correspond à la différence entre le stock de C final et initial. Toutes les variables climatiques affectent, à des degrés divers, les entrées et les sorties de C.

Ainsi, le niveau des entrées dépend en premier lieu de la production de biomasse végétale, laquelle est fonction du type de végétation (par exemple, les plantes en C3*, telles que les graminées fourragères tempérées, le blé, le tournesol, le colza, la banane ou la vigne, répondent mieux à l'augmentation du CO_2 que les plantes C4* telles que le maïs, le sorgho ou les graminées fourragères tropicales : cf. fiche RENDEMENT), de la durée du cycle (par exemple, l'augmentation de la température raccourcit le cycle, ce qui peut réduire la quantité de biomasse totale : cf. fiche TIMING), de la vitesse de croissance* (par exemple, l'augmentation de la température et du CO_2 augmente la croissance journalière des cultures d'hiver pendant leur phase végétative), et

des pratiques (telles la fertilisation, l'irrigation, la gestion des résidus, etc.). Finalement, le niveau des restitutions (quantité de C effectivement humifié) dépend directement de la production de biomasse et de la qualité des résidus et des amendements (par exemple, l'humification est plus grande pour les résidus de meilleure qualité).

En ce qui concerne les sorties, elles sont fortement dépendantes des facteurs qui contrôlent l'activité biologique du sol dont la minéralisation, notamment la température et la teneur en eau. La température joue un rôle majeur dans le processus de minéralisation : en l'absence de facteurs limitants d'une autre nature, une augmentation de 10 °C peut doubler sa vitesse. L'effet de la température sur la minéralisation explique la plus faible teneur en MO couramment retrouvée dans les sols tropicaux (minéralisation continue tout au long de l'année) par rapport aux sols tempérés (minéralisation faible en période hivernale). Mais les micro-organismes peuvent s'adapter progressivement au réchauffement climatique et augmenter leur température optimale de fonctionnement, ce qui aurait pour conséquence de réduire leur réponse à l'accroissement de la température. Également, la dynamique annuelle de recouvrement du sol (par exemple, cultures pérennes *vs* annuelles) et les pratiques (par exemple, irrigation) ont un effet sur la minéralisation, par l'intermédiaire de la modification de la température du sol et de sa teneur en eau.

Dans les systèmes naturels ou non fertilisés, l'azote issu de la minéralisation est l'un des facteurs qui limite la production de biomasse végétale (ligne verte à tirets dans la figure 1). En revanche, dans les systèmes de culture plus intensifs, où l'azote est apporté majoritairement sous la forme d'engrais, la production de biomasse dépend peu du taux de minéralisation. Dans ce cas, les entrées et les sorties de C du système fonctionnent comme des flux presque indépendants l'un de l'autre.

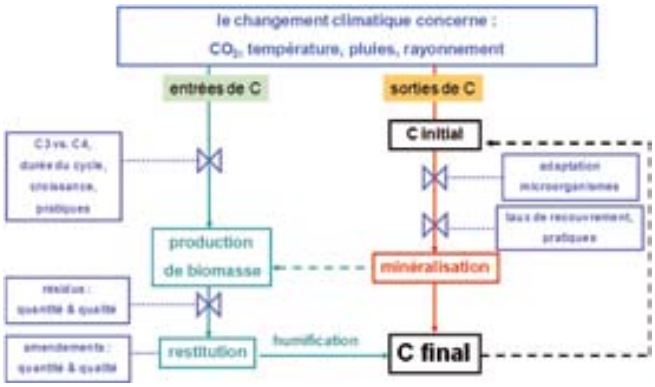


Figure 1 *: facteurs et processus impliqués dans le bilan de C du sol.*

Les quelques exemples cités mettent en évidence que l'impact du changement climatique sur la teneur en C et la vulnérabilité du sol résultent d'un ensemble complexe d'interactions (par exemple, interaction climat/sol/plante ou interaction température/CO_2). Ainsi, le changement d'un facteur climatique donné (par exemple, augmentation de la température) peut avoir simultanément des effets positifs (par exemple, augmentation de la biomasse végétale) et négatifs (par exemple, augmentation de la minéralisation) sur le bilan.

C Les évolutions en tendance : effet du système de culture et du site*

Le tableau 1 détaille la notation utilisée pour chaque système de culture. La figure 2 montre la variation de la MO dans le futur proche* (FP) et le futur lointain* (FL). Les valeurs positives et négatives de variation indiquent une augmentation ou une diminution de la teneur en MO, respectivement. En considérant les valeurs moyennes de stockage/déstockage, les systèmes de culture peuvent être classés en : stockant, correspondant notamment aux rotations (TBSB, BIO et MBCB) et à GS dans le FL, plutôt stockant (BB), neutres (VS3 et MI hexagonal), plutôt déstockant (TT), et déstockant, correspondant aux systèmes de culture tropicaux (MI et BA). Afin de comprendre ces comportements, il faut préciser certains choix, concernant la gestion des résidus, qui ont été réalisés lors des simulations. Le tableau 1 détaille les résidus considérés enfouis pour chaque système de culture. Les pailles non enfouies ont été supposées exportées pour l'élevage.

Système	TT Monoculture de tournesol	MI Monoculture de maïs irrigué	VS3 Vigne sans irrigation	BB Monoculture de blé	GS Prairie de fétuque sans irrigation
Résidu	pailles + racines	chaumes + racines (pailles + racines pour MI tropical)	bois	chaumes + racines	racines biomasse sénescente

Système	MBCB Rotation maïs-blé tendre-colza-blé dur	BIO Rotation blé tendre-fétuque-fétuque-pois	TBSB Rotation tournesol-blé tendre-sorgho-blé dur	BA Bananeraie
Résidu	chaumes pour B tendre et M pailles pour C et B dur + racines	chaumes pour B tendre pailles pour P + racines (B, P, F)	pailles + racines	biomasse aérienne + racines

Tableau 1 : *notation et résidus enfouis dans chaque SdC.*

La gradation observée dans la capacité de stockage des rotations (par exemple, TBSB > BIO > MBCB dans la figure 2) s'explique principalement par la quantité différente de résidus apportés (par exemple, plus grande pour TBSB : cf. tab. 1). Dans le cas du système BIO, le fumier apporté pour B (cf. fiche AGRICULTURE) et la grande biomasse racinaire de la graminée fourragère contribuent à augmenter le stockage de C par rapport à MBCB.

En revanche, pour les cultures annuelles en monoculture (BB, MI et TT), les différences dans leur capacité de stockage sont moins liées aux restitutions qu'aux pertes de C. Ainsi, alors que les restitutions sont plus grandes pour le système TT que pour les systèmes MI et BB, TT présente un comportement plutôt déstockant. Cela s'explique par le moindre recouvrement du sol par la végétation, qui favorise des températures de sol et des vitesses de minéralisation plus élevées. D'ailleurs, bien que les restitutions de MI soient légèrement supérieures à celles de BB dans le FP, la situation s'inverse dans le FL à cause de la baisse des rendements et des restitutions de MI (cf. fiche MAÏS-SORGHO). De plus, le moindre recouvrement du sol du système MI et des conditions plus favorables à la minéralisation en été (température du sol élevée, teneur en eau adéquate à cause de l'irrigation) favorisent les pertes de C.

En ce qui concerne les cultures pérennes, le comportement neutre de VS3 correspond bien à celui d'un système où la légère augmentation des rendements et des résidus dans la plupart des sites parvient juste à compenser une plus grande minéralisation à cause du réchauffement et

d'une faible couverture du sol. Le comportement stockant de GS, notamment dans le FL, s'explique par la relativement faible minéralisation dans les sols sous prairie (à cause, notamment, d'une couverture du sol importante) et le recyclage conséquent des racines et de la biomasse aérienne sénescente (tab. 1). Cette dernière a une tendance à augmenter dans le FL à cause de l'effet du stress hydrique.

Les systèmes les plus déstockants sont les systèmes tropicaux (fig. 2). Dans le cas de MI, le déstockage est dû principalement à la réduction drastique des rendements (cf. fiche ANTILLES) et des restitutions. Pour BA, le rendement et les restitutions sont plutôt stables dans le temps, et le facteur qui pilote le déstockage est la minéralisation, favorisée par les augmentations de la température et de la teneur en eau du sol à cause des pluies.

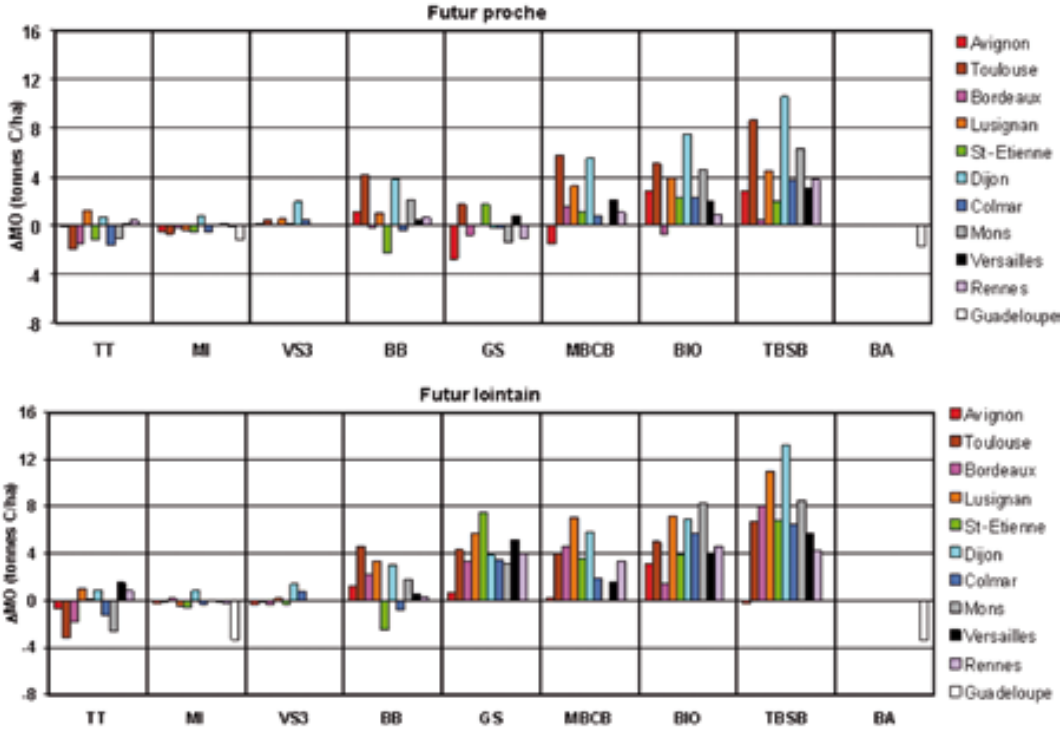


Figure 2 *: variations de la teneur en MO pour les différents systèmes de culture et sites (cf. fiche AGRICULTURE pour la notation des SdC et les composants des rotations).*

Au-delà des différences entre les systèmes de culture hexagonaux et tropicaux, la figure 2 montre qu'il n'y a pas de tendance géographique remarquable. Pour les systèmes les plus stockants dans le FL (TBSB, BIO, MBCB et G), il y a cependant une légère tendance à plus de stockage dans la direction sud-ouest/est (par exemple, entre Toulouse et Dijon dans la figure 2), qui est partiellement associée à une moindre diminution de la pluviométrie (cf. fiche CLIMAT). Il semble donc que l'impact du CC sur la MO soit localisé et dépende de l'interaction entre système de culture et site, la figure 2 montrant un comportement très variable d'un site à un autre sur un même système de culture.

Le test sur l'adaptation thermique* des micro-organismes du sol a démontré que ce mécanisme peut jouer un rôle non négligeable en réduisant les pertes de C par minéralisation (fig. 3). En moyenne, l'ordre de grandeur calculé de la réduction des pertes est de 35 %. Par ailleurs, pour MI à Toulouse, la prise en compte de l'adaptation fait varier son comportement qui est passé d'un léger déstockage dans le FP à un léger stockage dans le FL. Il semble donc que l'adaptation des micro-organismes puisse changer partiellement les tendances discutées ci-dessus, en atténuant le déstockage et en accentuant le stockage dans les différents systèmes de culture.

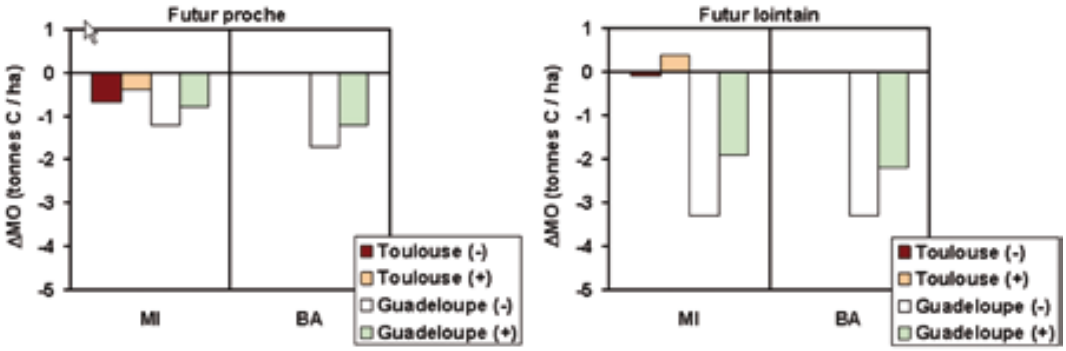


Figure 3 *: effets de l'adaptation thermique des micro-organismes du sol sur la variation de la teneur en MO pour les deux systèmes et les deux régions testés. (-) sans adaptation, (+) avec adaptation.*

D Dynamique de la matière organique et production

La variation du rendement est-elle un bon indicateur de la variation de la MO du sol ? Dans cette section, nous analysons la réponse à cette question. Avec la figure 1, nous avons montré que le fonctionnement de la plante et celui de la MO du sol peuvent être « connectés » par deux voies : i) biomasse végétale ➔ restitution ➔ entrée de MO, et minéralisation de la MO ➔ nutrition de la plante ➔ biomasse végétale. La deuxième voie peut être négligée dans cette analyse, car tous les systèmes de culture ont été fertilisés et, en conséquence, la nutrition de la plante dépend peu de l'azote libéré par minéralisation.

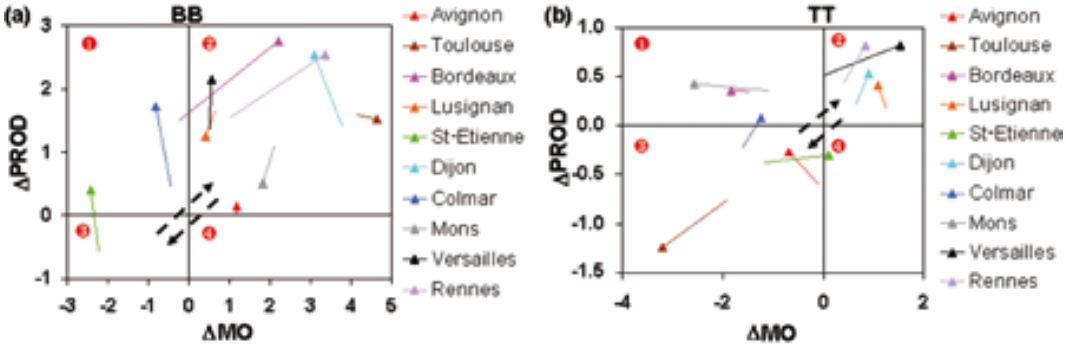


Figure 4 *: relations entre les variations des rendements (tonnes/ha) et de MO (tonnes C/ha). L'extrémité des segments sans symbole correspond au FP, l'extrémité avec un triangle correspond au FL.*

La figure 4 présente la relation entre la variation des rendements (ΔPROD) et celle de la teneur en MO pour les systèmes BB et TT. Une relation simple et directe entre les deux variables (par exemple, augmentation ou diminution simultanée) devrait se traduire par la présence des segments exclusivement dans les quadrants 2 et 3 (en rouge dans la figure 4) et une orientation dans l'un des sens indiqués par les flèches pointillées en noir. La figure 4 montre que la distribution des points et l'orientation des segments ne suivent pas, dans la plupart des cas, les tendances décrites. Des résultats similaires ont été obtenus pour les autres systèmes de culture. Ces résultats impliquent que la variation de MO ne reflète pas directement les changements de rendements, car d'autres facteurs « empêchent » une relation simple entre les deux variables (en particulier tous les facteurs qui affectent le taux de minéralisation décrit dans la figure 1).

E Les sources d'incertitudes et de variabilité (y compris géographique)

Dans cette section, nous complétons l'analyse des variables qui affectent l'évolution de la MO, en nous appuyant sur la figure 5, issue d'une analyse de variance décrite dans la fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS. Cette analyse permet de hiérarchiser différentes sources de variabilité (systèmes, site, sol, année) par rapport aux deux horizons du changement climatique (PR et FP ou PR et FL).

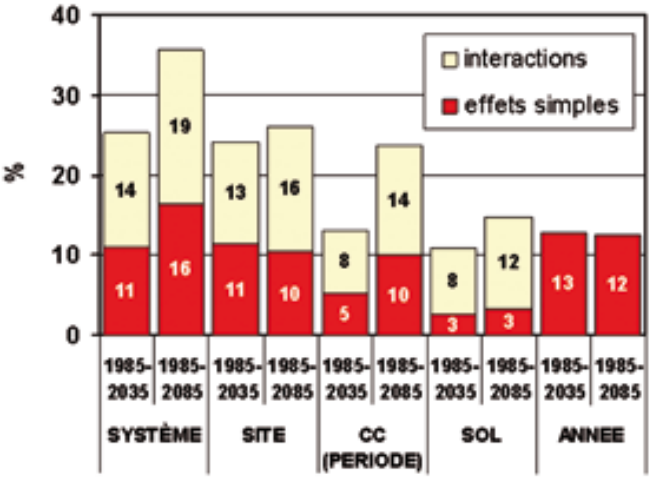


Figure 5 *: sources de variabilité et d'incertitude de ΔMO. Les valeurs représentent le pourcentage de la variabilité totale.*

Les interactions

Dans l'ensemble, les interactions sont responsables de presque 60 % de la variabilité totale de ΔMO, ce qui est largement supérieur à leur effet sur les variables « plante » (cf. fiche RENDEMENT) et sur d'autres variables « sol » (cf. fiche EAU). D'ailleurs, pour les quatre variables analysées (fig. 5), l'effet des interactions est toujours plus grand que les effets simples. Le fort impact des interactions confirme ce que nous avons discuté à propos de la figure 1 et implique que l'effet d'une variable donnée (par exemple, l'effet « site ») ne peut être cerné complètement sans connaître le statut des autres variables (effet « site » pour quel système de culture ?).

Les systèmes de culture

Leur effet a été discuté dans le § C. Il s'agit de la principale source de variation de ΔMO qui est responsable de près d'un tiers de la variabilité totale (effets simples et interactions confondus).

Les sites

L'effet « site » a été partiellement traité dans le § C. C'est la deuxième variable par ordre d'importance (fig. 5). Cet effet peut être visualisé en considérant la moyenne de ΔMO de chaque site (fig. 2) : les sites les plus stockants ont été Dijon, Toulouse et Mons dans le FP, et Dijon, Lusignan et Mons dans le FL. Similairement, les sites le plus déstockants ont été Bordeaux, Avignon et Saint-Étienne dans le FP, et Avignon, Colmar et Bordeaux dans le FL. On peut constater que, pour les deux situations de stockage/déstockage, deux sites apparaissent toujours parmi les plus importants dans le FP et dans le FL. Cela reflète une certaine stabilité de la réponse moyenne des sites au changement climatique, ce qui est à l'origine de cet effet. Décrire le comportement de chaque site en particulier échappe aux objectifs de ce chapitre, compte tenu du fait que les interactions sont nombreuses et plus importantes que l'effet individuel (fig. 5).

Le changement climatique (la période)

Cet effet reflète la variation de l'influence du changement climatique au cours du temps. La modification du comportement de GS entre le FP et le FL (fig. 2) est un bon exemple de l'effet « période ». Similairement, pour les rotations, le site Bordeaux a varié son comportement de plutôt neutre dans le FP à stockant dans le FP.

Le sol

Ce facteur n'a pas été discuté jusqu'ici, car les résultats présentés dans les § C et D correspondent aux simulations réalisées avec un seul sol. Dans cette étude, l'effet « sol » concerne notamment les différences de profondeur (entre 90 cm et 215 cm) et de teneur initiale en MO (entre 1,4 % et 2,3 %), avec une relation positive entre profondeur et teneur en MO (par exemple, le sol le plus profond est aussi celui qui possède plus de MO). Dans un scénario climatique caractérisé par la réduction de la pluviométrie, la profondeur du sol joue un rôle non négligeable sur l'alimentation hydrique (par exemple, différences dans la quantité d'eau stockée dans le profil) et en conséquence sur la production de biomasse et le volume de résidus. Pourtant, l'effet principal du sol concerne sa teneur en MO *via* l'effet de la minéralisation. Ainsi, le sol le plus riche a une tendance à déstocker plus dans les situations déstockantes et à stocker moins dans les situations stockantes, ce qui explique que les interactions soient beaucoup plus importantes que l'effet simple du sol (fig. 5). Ce phénomène est associé à la plus grande quantité de substrat pour la minéralisation dans les sols les plus riches en MO.

L'année

La variation en MO est moins sensible à ce facteur que d'autres variables telles que le rendement (cf. fiche RENDEMENT) et la percolation (cf. fiche EAU). Ces variables sont très dépendantes des conditions climatiques d'une année donnée et conservent peu de « mémoire » des années précédentes. La MO représente la situation opposée : elle est plus « conservatrice » et dépend fortement de la « mémoire » du sol à plus long terme.

Ce qu'il faut retenir

- ✓ Près de 60 % de l'impact du CC sur la dynamique de la MO est dû aux interactions système de culture/site/période/sol. Cela conforte l'idée que l'évolution de la MO du sol doit être analysée en tenant compte de l'ensemble des variables de l'agrosystème.
- ✓ Parmi ces variables, le système de culture est celle qui a le plus d'impact sur la MO. Il intervient au niveau de restitutions *via* la gestion de résidus (par exemple, enfouis ou enlevés) et de la minéralisation *via* le degré de recouvrement et les pratiques (culture irriguée ou pluviale). Ces facteurs expliquent les différences, d'une part, entre les rotations et la prairie (nettement stockants) et les cultures annuelles (stockage ou déstockage) et, d'autre part, entre les cultures annuelles (BB, stockant ; MI hexagonal, neutre ; TT, plutôt déstockant ; MI tropical, déstockant).
- ✓ Pour les systèmes fertilisés analysés, la variation des rendements n'est pas un bon indicateur de la variation en MO.
- ✓ Une partie des sites testés montre une relative stabilité dans le temps en ce qui concerne leur comportement stockant (Dijon, Lusignan, Mons) ou déstockant (Avignon, Guadeloupe), mais sans tendance géographique particulière à l'échelle hexagonale.
- ✓ L'effet du sol est surtout lié à sa teneur en MO : les sols les plus riches en MO stockent moins et déstockent plus, en fonction du système de culture.
- ✓ La dynamique de la MO est peu sensible aux variations climatiques annuelles et elle reflète davantage les effets des composantes du système à moyen et long terme. La faible réactivité de la MO en instantané peut cacher un processus de dégradation du sol, d'où l'importance du suivi de leur qualité avec des indicateurs plus fins (biomasse microbienne, activité biologique, fractions labiles).

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ La réponse des graminées fourragères au changement climatique mérite une attention particulière compte tenu de son effet, en monoculture et en rotation, sur la capacité stockante du sol. Il est question notamment de l'effet du changement climatique (stress hydrique, CO_2) sur la sénescence de la biomasse aérienne.
- ✓ De par son rôle dans la réduction de l'impact du changement climatique, l'évolution de l'activité biologique du sol, en particulier de la minéralisation, devrait être abordée prioritairement sous l'angle de l'adaptation thermique et des effets des séquences dessèchement/réhumectation du sol. Dans ce sens, des avancées récentes ont été réalisées sur le plan expérimental et pourront être incorporées progressivement aux modèles.
- ✓ Finalement, il est opportun de rappeler que la variation de la quantité de MO implique aussi des changements dans d'autres propriétés du sol, telles que la capacité de rétention hydrique, la structure et la qualité même de la MO. Ces propriétés devront être davantage considérées par les modèles, afin de prévoir les modifications dans les fonctions agro-environnementales du sol sous l'impact du changement climatique.

Pour en savoir plus…

FAO. 2008 - *Nouvelle base de données mondiale sur les sols*.
http://www.fao.org/newsroom/fr/news/2008/1000882/index.html

Maron P.-A., 2008 - Dimimos : Lien entre la diversité microbienne et le turnover des matières organiques dans les sols agricoles. *Projet ANR* (Systerra).
http://www.inra.fr/content/download/15052/258575/version/1/file/6.DIMIMOS.pdf

Persillet V., 2007 - Le changement climatique : les enjeux pour le secteur agricole. *Notes de service INRA-SAE2 : Mieux comprendre l'actualité*.
http://www.inra.fr/Internet/Departements/ESR//comprendre/js/climat.php

Stengel P., Gelin S., 1998 - *Sol : interface fragile*. INRA Ed., Paris. 222 p.

UE., 2006 - *Directive du Parlement européen et du Conseil définissant un cadre pour la protection des sols*.
http://europa.eu/legislation_summaries/agriculture/environment/l28181_fr.htm

UE., 2008 - *Climsoil. Rapport final*.
http://ec.europa.eu/environment/soil/pdf/climsoil_report_dec_2008.pdf

Évolution de quelques pathosystèmes sur le blé et la vigne

B 5
Santé

David Gouache, Romain Roche,
Philippe Pieri et Marie-Odile Bancal

A Problématique et méthodologie

Les bioagresseurs (organismes pathogènes, adventices) des plantes sont connus 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, à des fins d'ajustement en cours d'année des pratiques de contrôle phytosanitaire. On imagine donc que le changement climatique* risque de modifier fortement le fonctionnement des pathogènes, et l'on souhaite ici en étudier les impacts, à la fois théoriques (pertes de rendement*) et pratiques (traitements phytosanitaires, méthodes prophylactiques) pour quelques pathosystèmes.

L'étude présentée ici est centrée sur certains champignons phytopathogènes du blé et de la vigne. Les modèles utilisés ont quelques particularités notables par rapport aux modèles de culture utilisés pour traiter des autres thèmes. Ici, les modèles varient fortement dans leur degré de complexité et de prise en compte des relations climat/hôte/pathogène (dit « triangle épidémique »).

Un premier niveau d'étude des relations du triangle épidémique est celui qui consiste à s'affranchir presque complètement de l'hôte et à n'étudier que l'effet des conditions météorologiques sur l'efficacité d'infection du champignon. Classiquement, on utilise deux variables climatiques : la température et la durée d'humectation* (L'Homme et Jimenez, 1992) (présence d'eau libre sur les feuilles). La première étant directement disponible, reste à calculer la seconde : c'est la variable HUMEC, calculée à partir d'un modèle micrométéorologique supposant un feuillage de type blé. Cette variable présente l'avantage de pouvoir être déclinée en nombre de jours infectieux sur une très large gamme de pathogènes. Cependant, le nombre de jours infectieux n'est pas forcément à lui seul un critère suffisant pour appréhender l'importance d'une épidémie. D'autres phases de l'épidémie peuvent également être limitantes, ou alors les jours infectieux peuvent se produire à des périodes où ils ne sont pas nuisibles pour la plante.

Pour analyser ces interactions, il est possible de coupler un modèle de fonctionnement du pathogène à un modèle de culture*. Ce couplage peut être fait de manière plus ou moins intégrée entre la biologie du pathogène et celle de la plante. Les modèles présentés ci-après proposent différents degrés d'intégration entre modèles de maladie et de plante. Enfin, ces modèles peuvent être accompagnés de règles de décision sur la réalisation de traitements. On étudiera donc avec ces modèles une variable dite de nuisibilité, qui se rapproche plus ou moins des pertes de rendement dues à la maladie ainsi que des évolutions de fréquence de traitements antifongiques. Le tableau 1 décrit les pathosystèmes et modèles étudiés.

Degré d'intégration plante - pathogène	– → +			
Phénomène étudié	Durée d'humectation	Vigne Botrytis (cv merlot)	Blé septoriose	Blé rouille brune
Importance actuelle	Variable influençant presque tous les champignons	Très importante (quantité et qualité)	1re maladie du blé tendre	2e maladie du blé tendre
Impacts connus du climat* et prise en compte dans le modèle – Constitution de l'inoculum	T° et pluies horaires : prises en compte	dépend de l'épidémie de l'année précédente (donc de son climat) et des conditions hivernales : non-prise en compte	dépend de la multiplication plus ou moins forte du champignon dans la parcelle. Cette phase est actuellement limitée par le froid hivernal, mais peut aussi l'être par l'absence de pluies et/ou d'humidité : • prise en compte pour septoriose ; • non-prise en compte pour rouille.	
Impacts connus du climat* et prise en compte dans le modèle – Progression épidémique*	T° et pluies horaires : prises en compte	dépend des conditions climatiques (pluie humidité, rayonnement, et T°) avec un effet retard d'apparition des symptômes : prise en compte	dépend de la coïncidence de conditions infectieuses (pluie et T° pour septoriose ; durée d'humectation et T° pour rouille) avec l'émergence des dernières feuilles de la plante puis • pour la septoriose : de la température pour l'apparition des symptômes : prise en compte ; • pour la rouille : de la température et de l'état des feuilles pour la production de spores, et enfin des conditions de pluie et de vent pour la dispersion des spores : prise en compte.	
Impacts connus du climat* et prise en compte dans le modèle – Expression de la nuisibilité	T° et pluies horaires : prises en compte	dépend de la fréquence de grappes attaquées et de la proportion de baies attaquées dans les grappes	dépend de la quantité de contaminations reçues sur les derniers étages, mais aussi de la taille et de la durée de vie du feuillage hors maladie • pour la septoriose : pas de prise en compte du 2e aspect ; • pour la rouille : prise en compte de l'ensemble.	
Calcul de la variable socle	HUMEC	FREQ : % de grappes attaquées et GRAV : % de baies attaquées dans les grappes attaquées	NUISI : % de feuillage touché par la maladie pendant la 1re phase du remplissage des grains par la technique « d'aire sous la courbe ». Cet indicateur est connu comme étant bien relié à la nuisibilité, mais ne tient pas compte de différences de croissance au niveau du couvert lui-même, du fait d'autres stress	NUISI : perte de rendement. Le couplage complet plante – pathogène permet d'accéder directement à un calcul de nuisibilité
Calcul des traitements fongicides	non	oui	oui	non

Tableau 1 : *synthèse des pathosystèmes étudiés et des modèles utilisés.*

B Évolutions constatées et facteurs d'explication

Dans cette partie, nous traiterons des résultats sur les variables socles (durée d'humectation et nuisibilité). Nous décomposerons, quand cela sera pertinent, les différentes phases de l'épidémie pour mettre en lumière certaines évolutions contradictoires. Nous nous efforcerons de relier les évolutions constatées à celles d'indicateurs simples à calculer. Nous proposerons également une réflexion sur les incertitudes liées à ce travail.

Durée d'humectation

Dans cette analyse, nous avons privilégié les saisons printemps et été, car c'est pendant ces saisons que l'on observe les plus grandes différenciations par rapport au changement climatique et ce sont les plus significatives vis-à-vis des pathogènes étudiés.

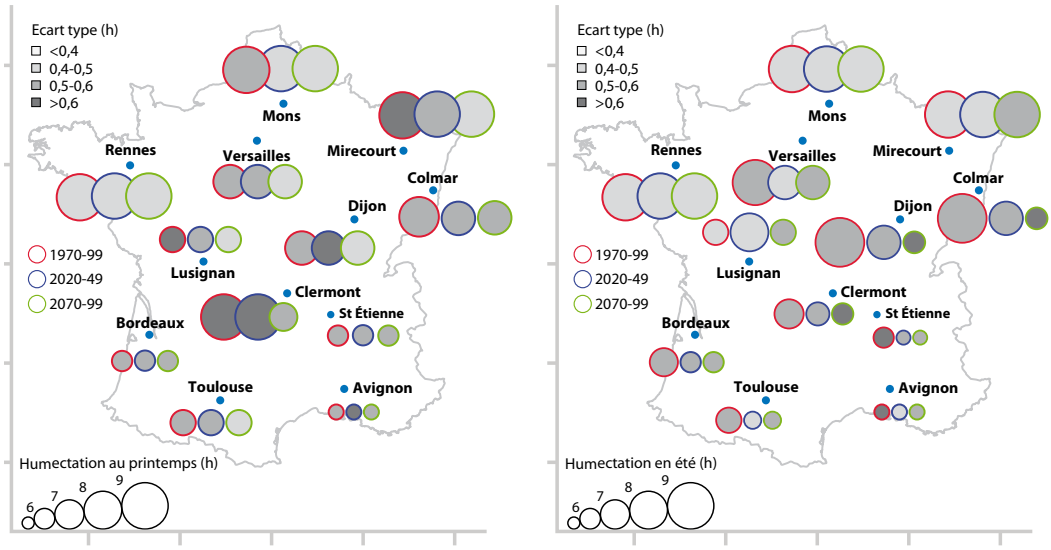


Figure 1 : *durées d'humectation (en heures) au printemps (à gauche) et en été (à droite) selon la méthode de régionalisation* TT.*

Sur les cartes de la figure 1, où les durées d'humectation moyennes sont exprimées en heures, on voit très nettement se dessiner une partition Nord-Sud avec des durées d'humectation environ 1,5 fois plus faible dans le Sud qu'au Nord. La tendance est à une légère diminution pour le printemps, qui est nettement plus marquée pour l'été. Les sites* les plus au nord (Mons et Mirecourt) et à l'ouest (Rennes) semblent faire exception. Lorsque la diminution des valeurs moyennes est faible, on remarque par endroits une diminution de la variabilité interannuelle (cas de Mirecourt, Versailles, Lusignan au printemps). Il est enfin à noter que, même si les valeurs baissent dans le Centre-Est, on n'atteint cependant pas, même pour le futur lointain (FL*), des valeurs aussi faibles que celles des sites les plus au sud pour le passé récent (PR*). Le changement climatique va donc diminuer, sur tout le territoire, le nombre de jours favorables aux infections pour les deux saisons-clés du printemps et de l'été. Cependant, la pression des maladies restera plus forte dans le futur en zone Nord que ce qu'elle est actuellement en zone Sud.

Pour la plupart des pathogènes, la durée d'humectation, efficace pour les processus d'infection, est raisonnée en relation avec la température ambiante : pour beaucoup, plus les températures sont élevées plus les durées d'humectation nécessaires à l'infection sont faibles (ceci n'est valable, en toute rigueur, que pour les maladies ayant un optimum thermique élevé comme la rouille du blé). Or la température est l'un des principaux facteurs susceptibles d'évoluer avec le changement climatique. Nous avons donc choisi, dans les cartes suivantes, de représenter l'évolution du nombre moyen de degrés-jours humectés* pour les différents sites, et toujours pour les deux saisons printemps et été.

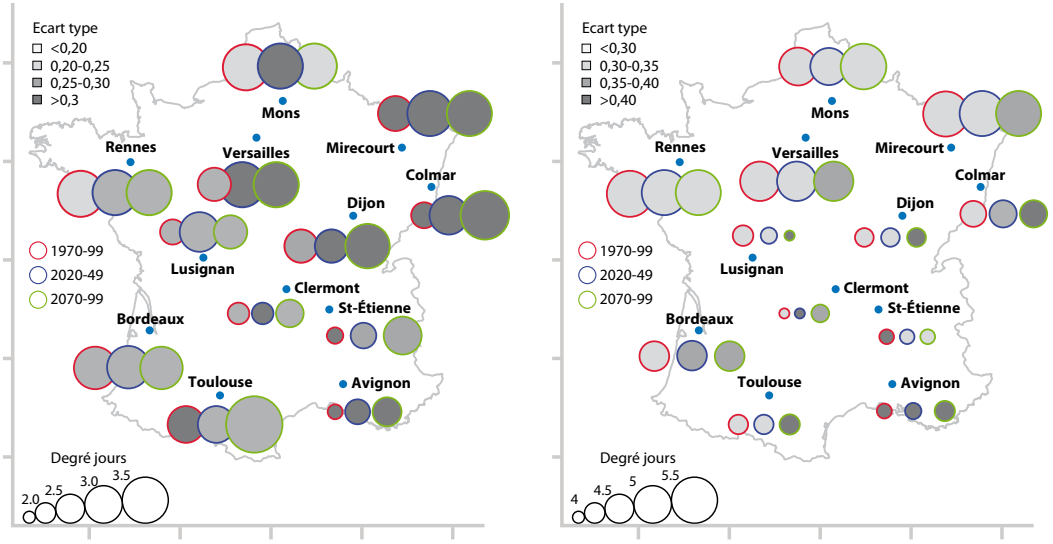


Figure 2 *: degrés-jours humectés au printemps (à gauche) et en été (à droite) selon la méthode de régionalisation TT.*

Cette fois-ci (fig. 2), du fait de l'augmentation des températures, la tendance s'inverse avec maintenant une légère augmentation à prévoir pour le futur dans certains sites. On retrouve par contre, mais de façon peut-être moins nette, une certaine partition Nord–Sud : au printemps, seuls les trois sites de Clermont, Saint-Étienne et Avignon se détachent avec des durées humectées significativement plus faibles que les autres, que ce soit pour le passé récent (PR*) ou les futur proche (FP*) et futur lointain (FL*), et pour l'été seuls les quatre sites les plus au nord-ouest se détachent avec des valeurs particulièrement élevées pour l'ensemble des périodes. Cela signifie que les conditions d'infection seront, en tendance, un peu plus favorables, au printemps, pour les maladies à optimum thermique élevé. Elles seront en revanche stationnaires en été.

Ces tendances d'évolution nous sont globalement confirmées par la figure 3 rendant compte, pour le printemps à Colmar, des fréquences de distribution des durées d'humectation par tranches de 3 heures dans le premier, et de 1 degré-jour dans le second. On observe un décalage global de la distribution des durées d'humectation vers les faibles valeurs dans le futur, et à contrario, un décalage du nombre de degrés-jours humectés vers les valeurs élevées. Ce résultat est lié à la prépondérance du réchauffement sur le raccourcissement des durées brutes en heures. Cependant, avant de conclure sur l'incidence du changement climatique sur les maladies, il faut aussi prendre en compte l'anticipation* des stades phénologiques* sous l'effet de ce même facteur température, ce qui compense partiellement l'effet du réchauffement et redonne toute son importance à la réduction du facteur de durée d'humectation brute. Enfin, le raisonnement doit inclure l'ensemble des phases de développement de la maladie et pas seulement la phase d'infection, sur laquelle nous avons focalisé notre interprétation : c'est l'objet des parties suivantes qui traitent de manière plus complète de quelques maladies importantes.

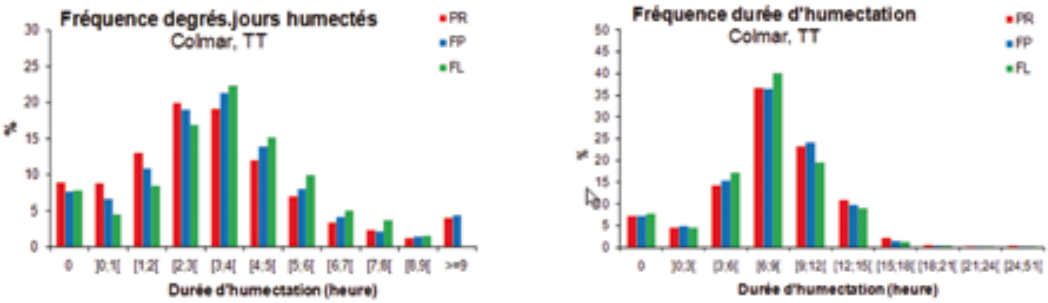


Figure 3 *: distribution des durées d'humectation (par tranche de 3 heures) à gauche et des degrés- jours humectés à droite pour Colmar, en utilisant la méthode de régionalisation TT.*

Botrytis de la vigne

Les résultats de simulation (rappelons qu'ils ne concernent que le cépage merlot), exprimés en nombre de jours de risque pour l'évolution de la fréquence (% de baies attaquées) et de la gravité (% de baies touchées au sein des grappes) des attaques de Botrytis, sont présentés sur la figure 4 pour les principaux sites viticoles (Avignon, Bordeaux, Toulouse, Dijon) et quelques sites prospectifs (Lusignan, Versailles, Colmar). Ils montrent clairement une tendance à la baisse du risque épidémique pour les sites traditionnellement viticoles, avec une évolution régulière entre PR, FP et FL. Ces résultats sont peu influencés par la méthode de régionalisation. Pour les sites où, alors qu'elle ne l'est pas actuellement, la culture devient faisable (réussite de la culture supérieure à 80 %, cf. fiche ATOUTS ET VULNÉRABILITÉS) pour FP ou FL, le risque épidémique associé est très important et très variable : nous reviendrons sur ce point plus loin.

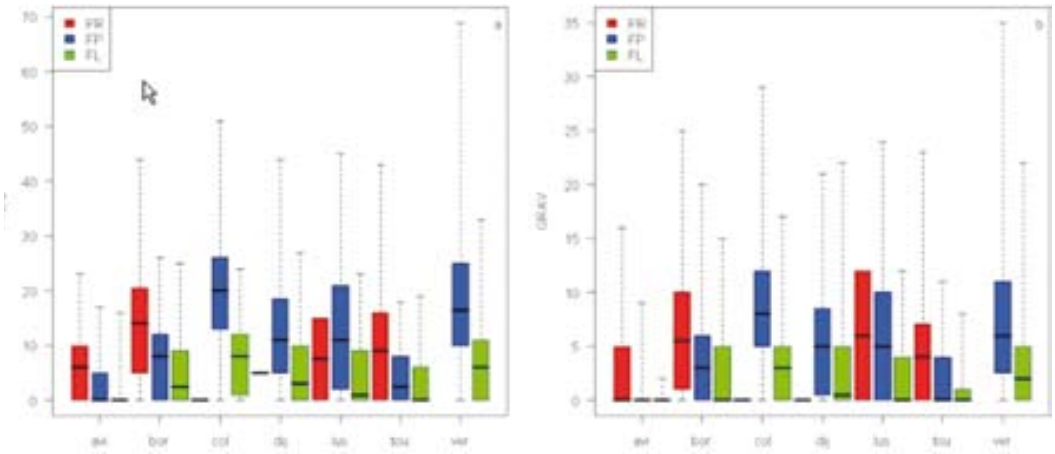


Figure 4 *: évolution de la nuisibilité du Botrytis sur baies de raisin (vigne cv. merlot) et de sa variabilité (extrêmes, médiane, 2° et 8° déciles) exprimées en nombre de jours de risque pour la fréquence FREQ (à gauche) et la gravité GRAV (à droite) (cf. tab.1).*

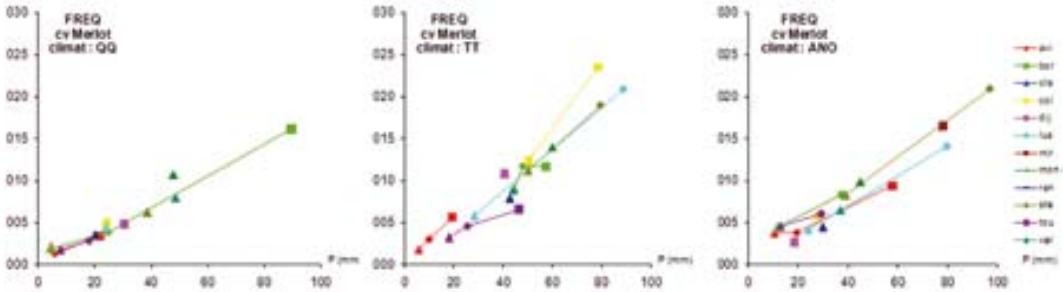


Figure 5 *: relation entre la nuisibilité du Botrytis de la vigne (cv merlot) exprimée par la variable FREQ (fréquence de grappes attaquées) et la pluviométrie, pour les trois méthodes de régionalisation.*

Les variations prévisibles du risque épidémique sont étroitement reliées aux variations de précipitations pendant la période véraison-maturité (fig. 5). Ces relations sont quasi linéaires, plus ou moins étroites selon la méthode de régionalisation (mais une bonne part des différences observées provient des différences de faisabilité*), avec une pente proche de 0,2 jour de risque par mm de pluie. Chaque site considéré individuellement suit bien cette relation : la quantité de précipitations pendant la période véraison-maturité constitue donc un très bon indicateur pour évaluer l'impact du changement climatique sur l'évolution du risque épidémique. Cet indicateur apparaît d'autant plus intéressant que même les sites prospectifs du futur répondent à cette relation qui revêt une valeur générale.

Septoriose du blé

Le premier constat est celui d'une tendance à la diminution de la nuisibilité de la maladie, de l'ordre de 20 % dans le FL, par rapport au niveau observé pour le PR (fig. 6 gauche).

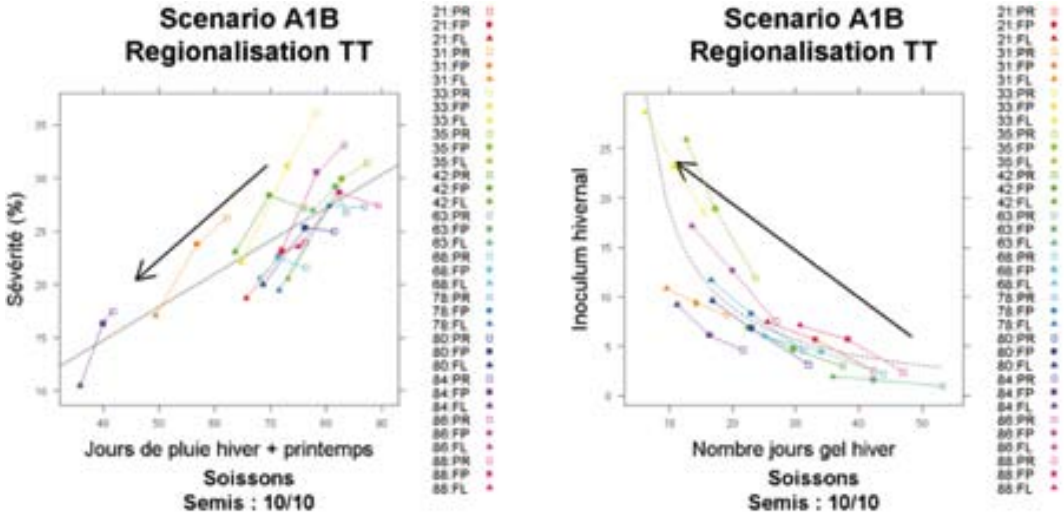


Figure 6 *: évolution de l'inoculum pendant l'hiver en fonction du nombre de jours de gel (à gauche) et de la sévérité de la septoriose en fonction du nombre de jours de pluie en hiver et au printemps (à droite). Les flèches indiquent l'évolution tendancielle avec le changement climatique. Méthode de régionalisation TT.*

Cependant, ce constat général semble assez variable selon à la fois les secteurs géographiques et surtout les méthodes de régionalisation* choisis. En effet, l'évolution apparaît plutôt graduelle avec la méthode QQ*, alors qu'avec la méthode TT* on observe parfois une stagnation voire une légère augmentation de la sévérité en FP. Les évolutions apparaissent moins nettes avec la méthode des Anomalies. Ce résultat est confirmé par l'étude de la précocité des épidémies, que l'on a caractérisée *via* la date de première intervention phytosanitaire préconisée par le modèle (voir § sur les traitements) : par rapport aux stades de la plante, l'épidémie prend du retard, de l'ordre de 5 à 10 jours.

En cherchant à expliquer ce constat, on a mis en évidence deux phases au comportement contradictoire. La première, celle de la constitution de l'inoculum, est en fait favorisée par le changement climatique : les quantités d'inoculum présent dans les parcelles à la sortie de l'hiver sont augmentées. Le nombre de jours de gel, variable climatique évoquée dans plusieurs études (Beest *et al.*, 2009) sur la septoriose, explique bien cette évolution (fig. 6 droite). Le froid hivernal devient beaucoup moins limitant, mais ceci est contrebalancé par le fait que la phase suivante, de progression épidémique est, elle, plus défavorable à la maladie. De fait, on se rend compte que la part explicative de l'inoculum initial dans la sévérité finale de l'attaque va en diminuant. De la même manière que pour la phase hivernale, on met en avant le fait que le nombre de jours de pluie constitue une variable explicative simple des évolutions constatées en termes de nuisibilité (Shaw, 1993 ; Cohan *et al.*, 2006). L'écart à cette tendance semble, lui, pouvoir s'expliquer par la température : les sites au climat* radouci par l'influence océanique se situant au-dessus de la tendance.

Blé et rouille brune

Les cartes suivantes (fig. 7) présentent les évolutions de pertes de rendement absolues en tonnes par hectare pour une variété précoce (Soissons) et une variété tardive (Arminda) de blé tendre d'hiver, simulées pour une date de semis du 10 octobre.

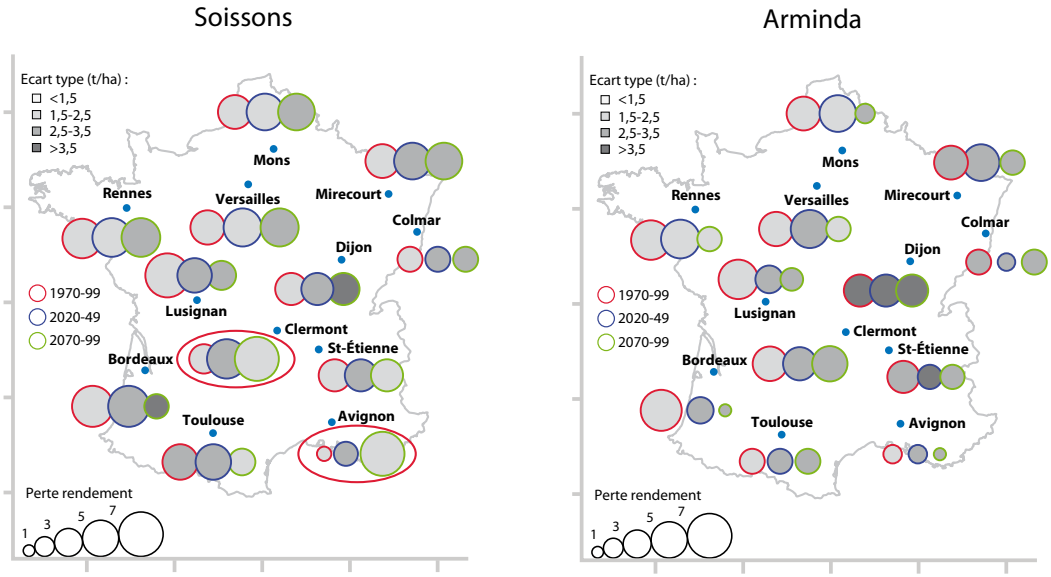


***Figure 7** : évolution des pertes de rendement du blé liées à la rouille brune pour Soissons (à gauche) et Arminda (à droite), calculées avec le scénario A1B et la méthode de régionalisation TT et le sol 1.*

On constate le plus généralement une stagnation voire une diminution des pertes de rendement, cette dernière tendance étant plus marquée pour la variété tardive que pour la variété précoce. Cette différence variétale correspond aux différences de rendement entre variétés précoces et tardives ; en effet, les pertes sont moins fortes pour les sites à faible rendement et pour la variété tardive. De plus, en tendance, le nombre de jours d'infection et la sévérité maximale sont légèrement plus élevés pour la variété précoce et diminuent dans le FP et le FL. On constate néanmoins une augmentation des pertes pour Soissons, à Clermont-Theix et Avignon. Pour le site de montagne, l'augmentation moyenne des températures peut expliquer cette tendance à l'augmentation de sévérité maximale de la rouille.

La variabilité interannuelle des pertes augmente légèrement, notamment pour la variété précoce. Ces résultats concordent en tendance avec ceux obtenus par les méthodes de régionalisation QQ et ANO*, avec cependant des divergences pour certains sites : par exemple, la méthode de régionalisation ANO produit une augmentation des pertes de rendement dans le futur pour Versailles et Rennes (dans le cas de la variété précoce seulement). Les résultats sont donc très sensibles à l'incertitude climatique du futur (cf. fiche CLIMAT et § sur les incertitudes).

En recherchant des liens avec des indicateurs climatiques ou de fonctionnement de la culture (fig. 8), on met en évidence que les pertes de rendement simulées diminuent avec la baisse de pluviométrie et l'augmentation de température prévue pour les FP et FL. Néanmoins, les corrélations avec ces variables climatiques globales restent faibles, parce que certains sites sortent de l'épure, en particulier Avignon, Clermont-Theix et Colmar, pour l'un ou l'autre de ces indicateurs. Ces effets-sites disparaissent quand on considère le confort hydrique* comme variable explicative des pertes de rendement, qui explique 75 % en moyenne de ces pertes. Enfin, il est notable également que la variation des pertes de rendement est en partie reliée à celle des rendements sains. Toutefois, ce dernier résultat rend davantage compte de la différence entre sites qu'entre périodes. En effet, l'évolution entre période, est souvent orthogonale à la tendance, mettant ainsi en évidence que les projections des rendements sains ne suffisent pas à diagnostiquer celles de la nuisibilité de la rouille brune.

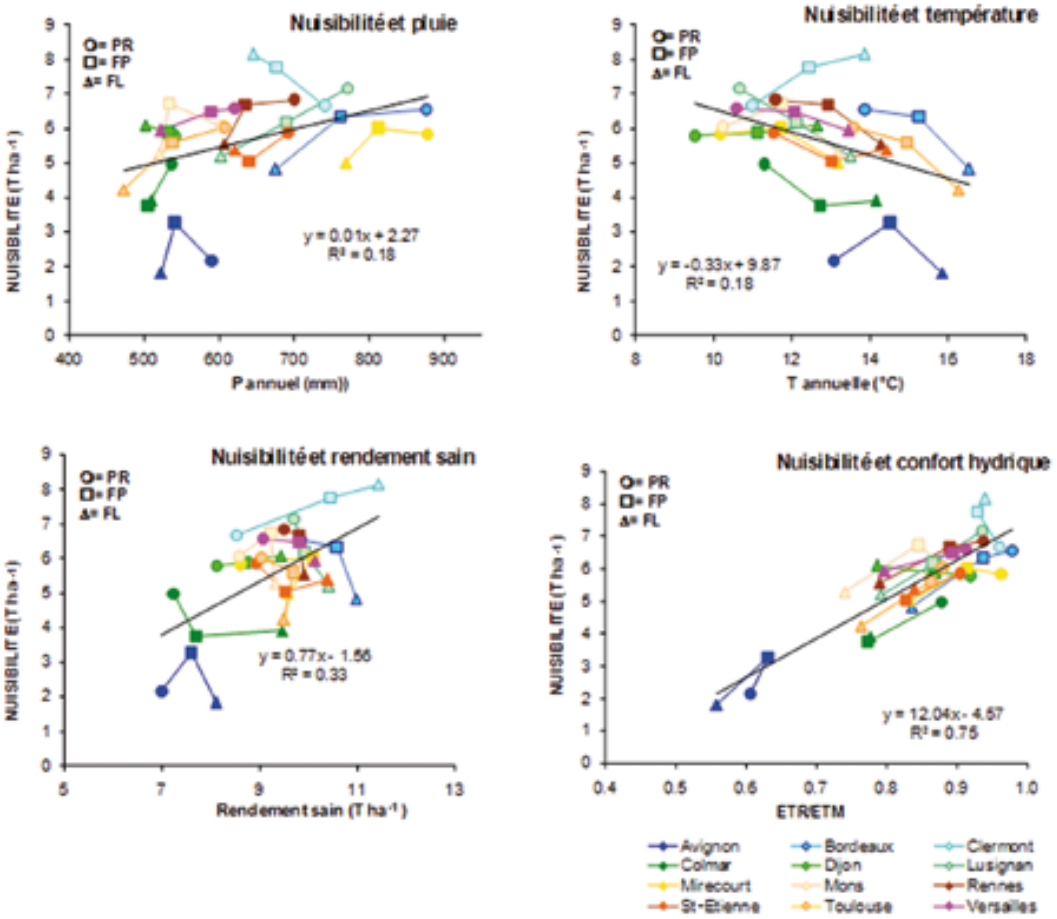


Figure 8 : *relation de la perte de rendement simulée (t/ha) avec des indicateurs directs ou indirects du changement climatique : P (mm), T (°C), confort hydrique (ETR/ETM) et le rendement des cultures sans maladies (t/ha).*

C Les incertitudes constatées

Une particularité des modèles utilisés ici est leur caractère souvent non linéaire, l'interaction entre température et pluie, et l'importance des occurrences (de pluie, d'épisodes infectieux) plutôt que des cumuls. Cela laisse à penser que la variabilité du climat est particulièrement importante. Or, entre méthodes de régionalisation, celle-ci n'est pas du tout estimée de la même manière. Lorsque l'on regarde l'effet de ces méthodes de régionalisation sur l'ensemble des séries climatiques utilisées, sur la variable durée d'humectation (exemple pris de Toulouse au printemps : fig. 9), on remarque deux comportements très différents : d'un côté, un groupe formé par les scénarios régionalisés suivant les méthodes de régionalisation QQ et ANO et qui présentent une variabilité interannuelle très forte, et de l'autre les scénarios régionalisés par la méthode TT et présentant une variabilité interannuelle nettement plus faible. Du point de vue des tendances d'évolution en fonction du changement climatique, on observe des choses assez similaires, même tendance à la baisse mais de façon nettement plus marquée pour le premier groupe (évolutions prédites en moyenne deux fois supérieures).

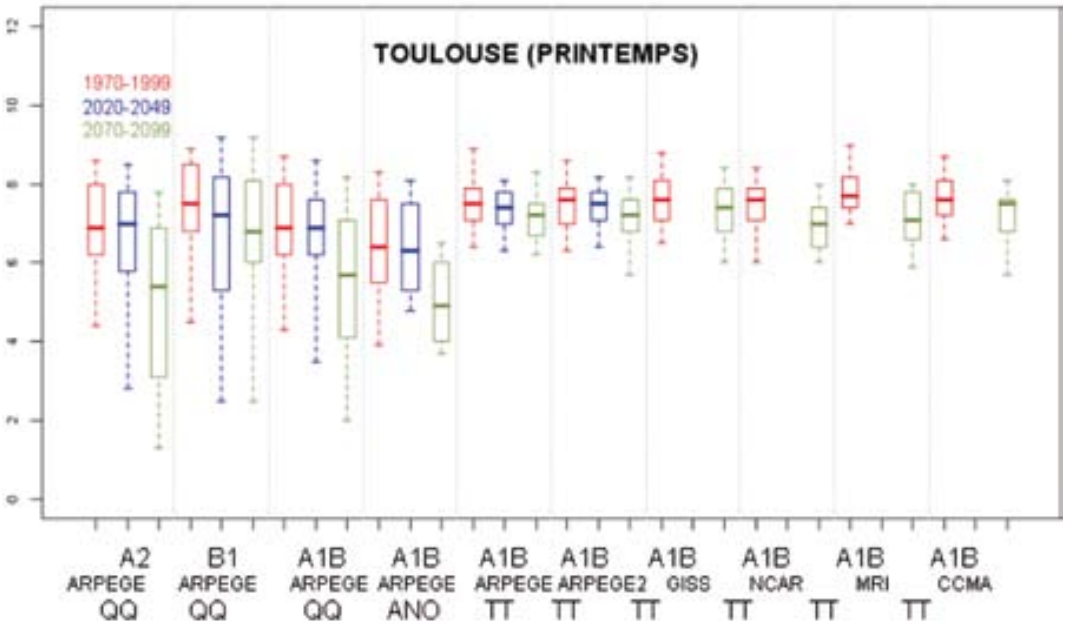


Figure 9 : *variabilité de l'humectation à Toulouse au printemps en fonction de l'incertitude climatique représentée soit par les scénarios SRES*, soit par les modèles climatiques, soit par les méthodes de régionalisation (cf. fiches CLIMAT et INCERTITUDES ET VARIABILITÉS). Les cinq valeurs des boîtes correspondent aux valeurs minimale et maximale, aux 2° et 8° déciles et à la médiane au centre.*

Pour la septoriose, c'est également la méthode de régionalisation TT qui se comporte différemment des deux autres, avec une phase de stagnation voire de légère augmentation de la maladie en FP, alors que les autres méthodes laissent envisager une baisse de la maladie plus progressive. Mais pour la relation entre nuisibilité et nombre de jours de pluie, c'est la méthode ANO qui donne de moins bons résultats. Le cas de Botrytis est un peu différent. En effet, l'étude, réalisée sur le seul cépage merlot, fournit des résultats qui sont très dépendants de la faisabilité de cette culture, qui est, elle-même, objet d'incertitude.

La mise en évidence de relations diagnostiques en fonction d'indicateurs agroclimatiques permet de prendre en charge une partie de cette incertitude climatique.

D Conséquences pratiques

Interventions de protection fongicide

Botrytis de la vigne

On peut constater que les valeurs de nombres de traitements simulés par le modèle sont proches des valeurs actuelles (0-2) avec une grande variabilité (fig. 10). Pour les moyennes trentenaires, l'évolution prévisible est cohérente avec celle du risque, ce qui se traduit par 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, ce qui pourrait amener à moduler la notion de faisabilité (cf. fiches ATOUTS ET VULNÉRABILITÉS et VIGNE).

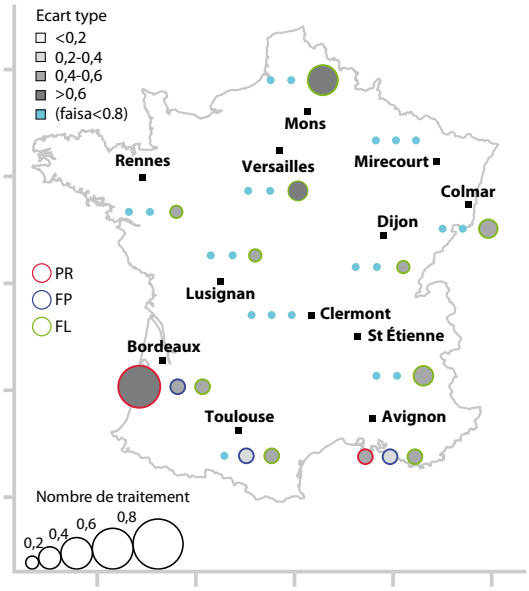


Figure 10 : *nombre de traitements requis contre le Botrytis de la vigne (cv merlot, méthode de régionalisation QQ).*

Septoriose du blé

En lien avec la réduction de sévérité, on observe une tendance à la réduction des traitements fongicides anti-septoriose (fig. 11). Les variations observées entre sites et séries climatiques sont tout à fait en ligne avec celles observées sur la variable nuisibilité.

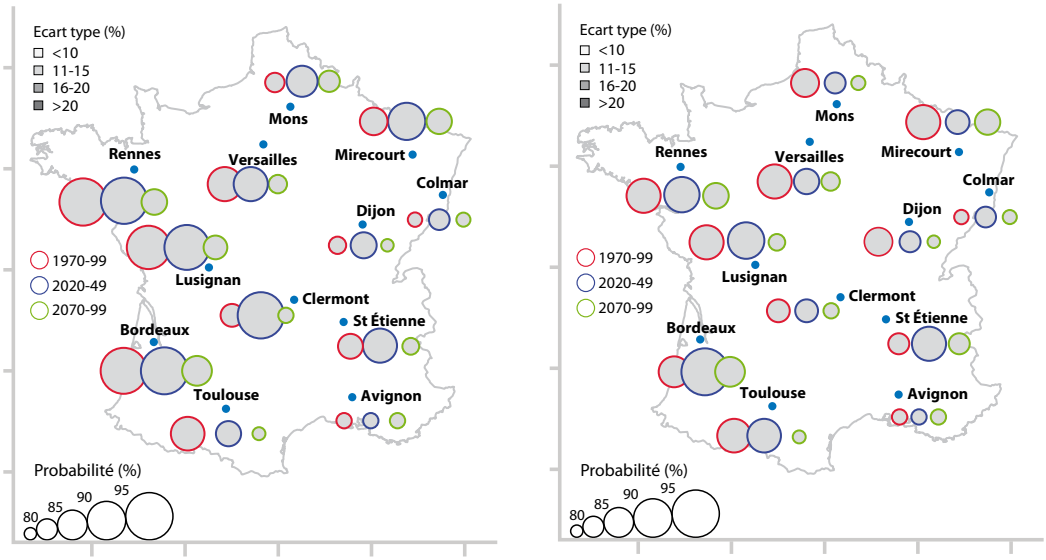


Figure 11 : *probabilité de réalisation du 1er traitement anti septoriose du blé (cv Soissons), méthode de régionalisation TT à gauche et QQ à droite.*

En termes de mise en œuvre, les dates de premier traitement avancent significativement, de l'ordre de 15 à 20 jours entre périodes actuelle et future, et ce de manière progressive. Cette apparente « précocification » doit cependant être mise en regard de l'avancée des stades : en fait, l'avancée des stades de la plante est plus forte que celle de la maladie. Ce résultat apparaît cohérent pour deux raisons. Premièrement, la vitesse de développement* de la plante dépend de la seule température, alors que celle de la maladie est contrainte à la fois par la température et l'eau. Deuxièmement, Lovell *et al.* (2004), en étudiant le temps de latence de la septoriose, avaient pointé le fait que cette maladie disposait d'un avantage de vitesse quand les températures sont plus fraîches. En approfondissant, on note effectivement que plus les stades sont précoces, plus la maladie prend du retard par rapport à ceux-ci : cette tendance se retrouve aussi bien entre sites qu'entre périodes. Par rapport à ces deux effets, l'effet de la précocité variétale n'est pas visible.

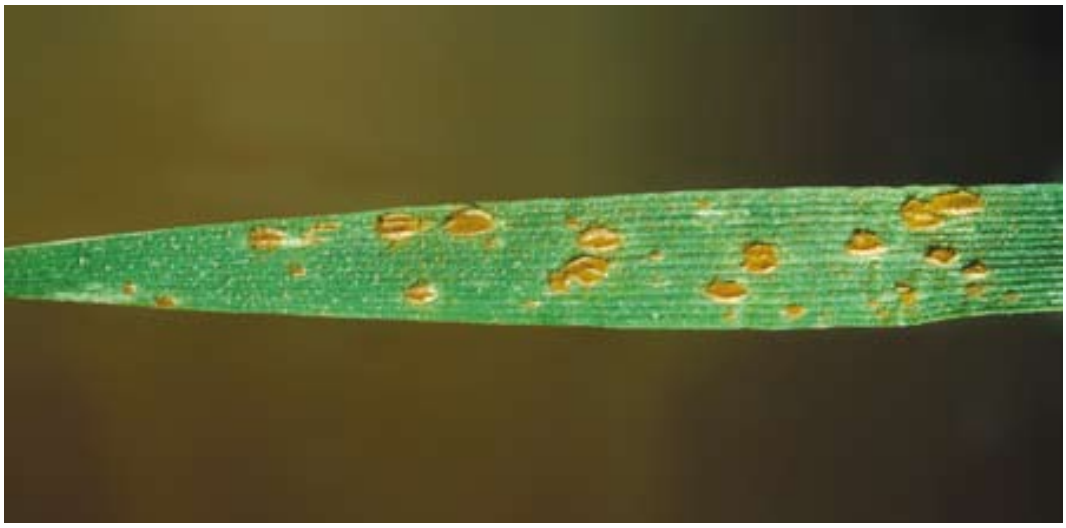
On a également cherché à caractériser avec des indicateurs très simples (occurrences de pluies autour des dates préconisées) si la mise en œuvre des traitements phytosanitaires dans de bonnes conditions risquait d'être compromise : aucune tendance ne se dessine de ce point de vue, mais une étude systématique et multicritère serait à mener dans ce domaine.

Effet de pratiques prophylactiques

Les simulations sur septoriose et rouille brune ont été réalisées sur une grande gamme de dates de semis. Cela a permis d'évaluer l'impact du changement climatique sur une technique de lutte non chimique qu'est le retard de la date de semis. En effet, les semis tardifs sont connus pour limiter la pression d'inoculum en sortie d'hiver de ces deux maladies, qui ont ainsi moins de temps pour se multiplier durant cette phase. Pour les deux maladies, on remarque un effet de réduction de la nuisibilité avec les semis tardifs.

Dans le cas de la rouille brune, cette diminution est plus marquée pour la variété précoce et pour le PR. La variabilité de réponse entre sites est forte : on distingue des sites où la perte de rendement diminue faiblement et continûment avec la date de semis (Avignon et Colmar), et ce avec peu de variation due au changement climatique, et d'autres sites (Bordeaux, Lusignan, Toulouse – trois sites parmi les plus exposés à la maladie à l'heure actuelle – ainsi que Mons), où le changement climatique induit une diminution des pertes beaucoup plus marquée et ce particulièrement pour la variété tardive.

Cette approche doit être combinée au maintien d'un rendement économiquement viable, sachant que le rendement diminue également en tendance avec la date de semis, mais que l'augmentation du CO_2 ambiant permet l'atteinte de meilleurs rendements potentiels (cf. fiches TIMING et BLÉ).



Ce qu'il faut retenir

- ✓ Globalement, pour les trois pathosystèmes simulés, l'impression qui se dégage est celle d'une baisse de la pression des maladies fongiques. Ce constat doit toutefois être quelque peu modulé.
- ✓ En ce qui concerne la durée d'humectation, variable transversale à de nombreux pathosystèmes (bien au-delà des trois étudiés ici), elle diminue. Cependant, la variable « degrés-jours humectés », à priori plus pertinente pour les maladies ayant un optimum thermique élevé comme la rouille du blé, augmente légèrement. Pour la vigne, la pression de Botrytis diminue dans les sites du Sud où le cépage modélisé est déjà faisable actuellement, mais, dans les sites où ce cépage deviendra faisable dans le futur, la pression de Botrytis serait très forte. Enfin, pour la septoriose, il y a une incertitude sur le sens de variation dans le futur proche.
- ✓ On note que les résultats sont sensibles aux incertitudes climatiques, essentiellement liées à la méthode de régionalisation. Enfin, on retiendra que, pour chaque pathosystème, on a pu identifier des variables synthétiques, plus simples à calculer, qui semblent être en bonne relation avec les évolutions projetées. Toutefois, ces relations sont pour l'instant spécifiques de chaque pathosystème.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ Quelques points du travail réalisé ici mériteraient d'être approfondis. Une limite pour les pathosystèmes Botrytis et rouille brune est la non-prise en compte de l'impact du climat sur l'inoculum précoce. Or, on peut penser que des effets à ce niveau se feront sentir. Pour la vigne, il aurait été intéressant de pouvoir décliner le travail sur plusieurs cépages, en particulier des cépages adaptés aux zones viticoles plus septentrionales.
- ✓ Des limites d'ordre plus général peuvent être formulées. Notons, par exemple, que les effets du CO_2 sur les pathogènes ne sont pas abordés, alors que quelques études laisseraient à penser que celui-ci peut réduire la sévérité des maladies. Deuxièmement, il y a le fait que ces études ne sont consacrées qu'à un seul pathogène à la fois. Or, le changement climatique peut modifier, à un endroit donné, l'importance relative des pathogènes, voire contribuer à en faire émerger de nouveaux. Enfin, ce travail ne tient pas compte d'adaptations* possibles des populations de pathogènes à l'évolution du climat : on a, par exemple, récemment vu s'installer en Australie une nouvelle race de rouille jaune, mieux adaptée aux conditions chaudes (Millus *et al.*, 2009).

Pour en savoir plus…

Beest D.-E., Shaw M.-W., Pietravalle S., Van den Bosch F., 2009 - A predictive model for early-warning of *Septoria* leaf blotch on winter wheat. *European Journal of Plant Pathology* 10.1007/s10658-009-9428-0.

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, Veterinary Science, Nutrition and Natural Resources* 2008 3, No. 054, p 1-15.

Cohan J.-P., Georges S., Piraux F., and Couleaud G., 2006 - Lutte contre la Septoriose (S. Tritici) du blé tendre d'hiver en Haute-Normandie : modélisation statistique de la nuisibilité de la maladie à travers la pluviométrie et la cartographie à l'échelle nationale. In *AFPP - VIIIe CIMA*. Tours.

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.

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

Lovell D.-J., Hunter T., Powers S.-J., Parker S.-R., Van den Bosch F., 2004 - Effect of temperature on latent period of *septoria* leaf blotch on winter wheat under outdoor conditions. *Plant Pathology* 53 (2):170-181.

Milus E.-A., Kristensen K., and Hovmøller M.-S., 2009 - Evidence for increased aggressiveness in a recent widespread strain of *Puccinia striiformis* f. sp. tritici causing stripe rust of wheat. *Phytopathology* 99:89-94.

Shaw M.-W., 1993 - Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola (Septoria tritici)* on winter wheat in the UK. *Plant Pathology* 42 (6):882-899.

Complexité des évolutions du rendement des cultures

Romain Roche

B 6
Rendement

A Climat et rendement

Principaux mécanismes concourant à l'élaboration du rendement

La modélisation écophysiologique souligne la distinction entre d'une part la phénologie* de la plante directement et principalement sous dépendance thermique (mais aussi de la photopériode pour les cultures d'hiver), et d'autre part la croissance* en biomasse liée au premier ordre aux processus de photosynthèse* et sous la dépendance directe du rayonnement absorbé par la culture et de la concentration en CO_2 de l'atmosphère.

La disponibilité en nutriments et en eau intervient également de façon très importante. En effet, pendant que la plante échange CO_2 et O_2 pour assurer les processus de la photosynthèse et de la respiration, elle perd aussi de l'eau qui s'évapore au niveau des stomates. Si l'eau n'est pas suffisamment disponible, la fermeture stomatique qui en résulte affecte également la photosynthèse en empêchant les échanges gazeux. La croissance est également limitée quand d'autres facteurs font défaut, comme les éléments minéraux, au premier rang desquels se trouve l'azote, élément constitutif majeur des protéines. Dans cette étude, par le biais de fertilisations azotées confortables (basées sur les pratiques actuelles) ou par l'absence de prise en compte d'éventuelles limitations (cas des autres éléments minéraux ou de l'azote pour certains modèles ; cf. fiche MODÈLES), nous avons cherché à nous situer dans un contexte où les facteurs non directement reliés au climat* ne sont pas limitants. Cependant, il existe d'étroites relations entre alimentation en eau et absorption des éléments minéraux, et des conditions de déficit hydrique provoquent souvent un déficit azoté par défaut d'absorption. Par ailleurs, il n'est pas à exclure que la fertilisation azotée, raisonnée sur la base des pratiques actuelles, ait pu se trouver insuffisante dans les situations à fort potentiel de rendement.

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 préfloral de la culture, de sorte que le rendement est le résultat de tous les processus qui se sont déroulés tout au long du cycle. À ce titre, sa détermination est particulièrement complexe, car soumise à de nombreuses interactions que nous tâcherons d'illustrer.

Quels sont les impacts prévisibles du changement climatique ?

Quel que soit le scénario, il est prévu que les teneurs en CO_2 atmosphérique continuent à augmenter (cf. la fiche CLIMAT pour une analyse plus approfondie des variables climatiques proprement dites), ce qui devrait favoriser les processus de photosynthèse, et ce davantage chez les cultures de type C3* (blé, tournesol, colza, vigne, fétuque, hêtre…) que chez les cultures de type C4*(maïs, sorgho). 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 antitranspirant).

En liaison probablement avec la diminution de la pluviométrie (cf. fiche CLIMAT), 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. fiche TIMING).

La température est le facteur le plus important et médiatisé du changement climatique, car il y a 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 (cf. fiche TIMING). 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.

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 : cf. fiche CLIMAT) qui devrait agir dans le sens d'une intensification des stress hydriques (cf. fiche EAU), pouvant entraîner de façon concomitante des stress azotés par blocage de la minéralisation de la matière organique du sol (cf. fiche MATIÈRE ORGANIQUE), mauvaise disponibilité des engrais azotés dans le sol, etc.

B Peut-on raisonner les tendances par typologie de culture ?

Nous proposons, dans cette partie, de balayer l'évolution des rendements des diverses cultures françaises, sur la base de typologies simples. Nous retrouvons par exemple l'opposition entre cultures en C3 et en C4, très significative par rapport à la valorisation du CO_2 atmosphérique, mais aussi des cycles d'hiver ou d'été, supposés valoriser différemment les températures et l'eau.

Mais avant d'entrer dans ces typologies, le tableau 1 donne une vision synthétique de l'évolution des rendements à l'échelle du territoire et permet de remarquer les discriminations opérées par le changement climatique.

	Blé	Maïs irrigué	Colza	Tournesol	Sorgho	Vigne	Pin	Fétuque
FP-PR	0.87	0.45	1.21	0.64	1.03	0.93	0.21	-0.22
FL-PR	0.98	0.44	2.39	1.14	2.13	1.47	0.50	0.51

Tableau 1 : *écarts de rendement entre les périodes futures (FP* et FL*) et le PR*, tous sites* confondus, en t/ha. Toutes les valeurs sont significatives au seuil de 1 %. Toutes les cultures (sauf le maïs) sont conduites en pluvial.*

Parmi les cultures annuelles, on note des différences importantes entre des cultures « écophysiologiquement » éloignées, comme le maïs et le colza, mais aussi entre des cultures proches (maïs et sorgho). On voit également que le changement climatique peut avoir des conséquences systématiquement négatives (cas du pin).

C3/C4

La comparaison de deux cultures estivales, l'une en C3, le tournesol, et l'autre en C4, le maïs irrigué, montre que l'évolution est très nettement à l'avantage de la première, surtout dans le futur lointain. Cela est cohérent avec ce que l'on sait de leur fonctionnement, les plantes de type C3 ayant tendance à mieux valoriser des augmentations de concentration en CO_2. Pour le sorgho, autre culture de type C4, la forte progression de rendement constatée résulte de plusieurs atouts par rapport au maïs : meilleure valorisation de l'augmentation des températures, résistance à la sécheresse et extension concomitante de sa zone de culture vers le nord (cf. fiche MAÏS-SORGHO). Ainsi cette dichotomie C3-C4 ne suffit pas à prévoir la réaction des plantes face au changement climatique.

Hiver/été

La comparaison de deux cultures oléagineuses telles que le colza et le tournesol semblent montrer une évolution nettement plus favorable pour les cultures d'hiver (cas du colza) par rapport aux cultures d'été. Ainsi, la progression en FL est plus de deux fois supérieure. Dans ce cas, le processus déterminant semble être celui de l'esquive* : dans le cas des cultures d'hiver, le réchauffement climatique* se traduit par une anticipation* des stades permettant de boucler le cycle avant l'apparition de stress trop prononcés, alors que les cultures d'été subissent de plein fouet l'accroissement des stress hydrique* et thermique particulièrement prononcés sur cette saison. Par ailleurs, les cultures d'été subissent un net raccourcissement de leur phase de remplissage, préjudiciable au rendement (cf. fiche TIMING).

Annuel/pérenne

La comparaison de deux graminées de type C3, l'une de type annuel, le blé, et l'autre de type pérenne, la fétuque, montre une évolution à l'avantage de la première. Pour expliquer ce résultat, on peut, en simplifiant, considérer la prairie comme l'association d'une culture d'hiver et d'une culture d'été pour laquelle les conditions hydriques sont nettement plus défavorables. Par ailleurs, la prairie peut souffrir davantage que d'autres cultures de la sécheresse édaphique, du fait de son enracinement relativement superficiel. De plus, l'effet mémoire de la prairie au travers de ses réserves hivernales peut amplifier ce problème des sécheresses si elles sont récurrentes.

Ligneux/herbacé

L'évolution pour le pin est le seul exemple d'une prévision franchement négative, et l'avantage semble donc clairement être aux herbacées (prairie). Cependant, le cas du pin, comme celui du hêtre (cf. fiche FORÊT), est particulier, car, bien que plantes en C3, ces essences ne bénéficient pas de l'effet antitranspirant de l'augmentation du CO_2 atmosphérique ; il est donc soumis à des stress hydriques plus importants que la graminée fourragère. Par ailleurs, du fait de la période estivale de formation de leurs bourgeons, les espèces ligneuses sont très exposées à l'occurrence accrue des stress hydriques et thermiques. Cela entraîne des arrière-effets sur le développement foliaire des années suivantes, et donc une limitation de la production même si les conditions de croissance redeviennent plus favorables. La comparaison avec la vigne est délicate, car l'évolution positive de celle-ci est surtout liée à la conquête de nouvelles zones de culture rendue possible par l'augmentation des températures (cf. fiche ATOUTS ET VULNÉRABILITÉS).

Adapté ou pas au froid

Blé et colza sont deux cultures d'hiver de type C3, mais le feuillage du blé est plus résistant aux gels hivernaux que le colza, de sorte que l'augmentation des températures est très favorable à la culture du colza, dont l'augmentation des rendements (en particulier dans les zones Centre-Nord et Nord-Est) est directement liée à la diminution des risques de gel (cf. fiche COLZA).

Adapté ou pas à la sécheresse

Nous avons déjà cité le cas du sorgho par rapport au maïs, mais l'extension géographique du sorgho peut masquer l'impact du seul caractère « résistance à la sécheresse ». En revanche, si l'on compare les résultats de la fétuque et du ray grass, ce dernier étant moins bien adapté à la sécheresse, on obtient dans les mêmes conditions (modèle, climat) une augmentation de 6 % pour la fétuque et seulement 4 % pour le ray grass (cf. fiche PRAIRIE).

C'est donc un ensemble de caractères qui permet d'expliquer le comportement des plantes vis-à-vis du changement climatique : C3/C4, annuel/pérenne, hiver/été, adapté ou non au froid, adapté ou non à la sécheresse, sensible à l'effet antitranspirant du CO_2 atmosphérique. Cette complexité démontre pourquoi il est nécessaire d'avoir recours à des modèles de culture pour raisonner cet ensemble d'interactions.

C Quelques éléments d'analyse sur l'impact des principaux facteurs climatiques

Bien qu'on ne puisse pas les dissocier, voici une rapide analyse de l'impact des trois principaux facteurs susceptibles d'être modifiés par le changement climatique sur le rendement : le CO_2, le stress hydrique et la température.

Ampleur de l'effet CO_2

Pour les zones de production actuelles de chaque culture, l'augmentation des concentrations en CO_2 est le principal facteur bénéfique lié au changement climatique. Nous avons vu dans la partie ci-dessus qu'il profitait davantage aux cultures de type C3 et que sa manifestation était la plus visible pour les cultures d'hiver, moins soumises aux déficits pluviométriques.

Sans cette augmentation importante (doublement en 2100 dans les scénarios les plus étudiés), les rendements de la plupart des cultures baisseraient, même dans les cas les plus favorables. Ainsi, pour le blé d'hiver, dans le cas hypothétique d'un changement climatique d'ampleur égale à celle prévue, mais non lié à une augmentation du CO_2, le rendement du blé accuserait une baisse moyenne sur l'ensemble des sites dans le futur lointain de plus de 25 %.

Impact de l'état hydrique sur le rendement

Avec le changement climatique, le confort hydrique* des cultures aura tendance à se dégrader si les pratiques ne sont pas modifiées (cf. fiche EAU), au moins dans le FP. Ce résultat est illustré par la figure 1 pour quatre couverts pluviaux emblématiques du comportement hydrique : deux couverts pérennes (la prairie de graminée et la forêt de pins) et deux cultures de printemps dont une C3 (le tournesol) et une C4 (le sorgho). La figure 1, qui met en relation confort hydrique et rendement et dans laquelle un ratio ETR/ETM* faible indique un stress hydrique fort, permet à la fois de suivre la dynamique par site et de présenter les régressions sur l'ensemble des sites par période d'intérêt.

Si l'on regarde uniquement les régressions par période, on s'aperçoit que, pour un même niveau de stress hydrique, le rendement montre une tendance à l'augmentation, ce qui, sans plus de précaution, nous conduirait à un optimisme excessif. Tout d'abord nous observons que si le décalage des courbes entre les trois périodes est important pour tournesol et prairie, il est beaucoup plus faible pour le pin et quasiment inexistant pour le sorgho entre PR et FP. Si maintenant nous suivons ce qui se passe par site, nous notons que les stress hydriques augmentent, de sorte que l'évolution ne se fait pas toujours au bénéfice du rendement. Pour les couverts pérennes, après une phase de décroissance du rendement dans le FP, la fétuque bénéficie d'une légère augmentation dans le FL ; ce qui n'est pas le cas chez le pin. Pour les annuelles, on distingue une augmentation du stress hydrique dans le FP, suivie par une diminution dans le FL. Cette diminution, accompagnée d'une augmentation de faisabilité (autorisée par une meilleure couverture des besoins thermiques dans les zones Nord), provoque le décalage vers le haut de la courbe du sorgho (plante en C4 pourtant peu sensible au CO_2) dans le FL et accentue encore celui du tournesol. On voit ainsi se dessiner un effet d'esquive dont ne peuvent bénéficier les plantes pérennes.

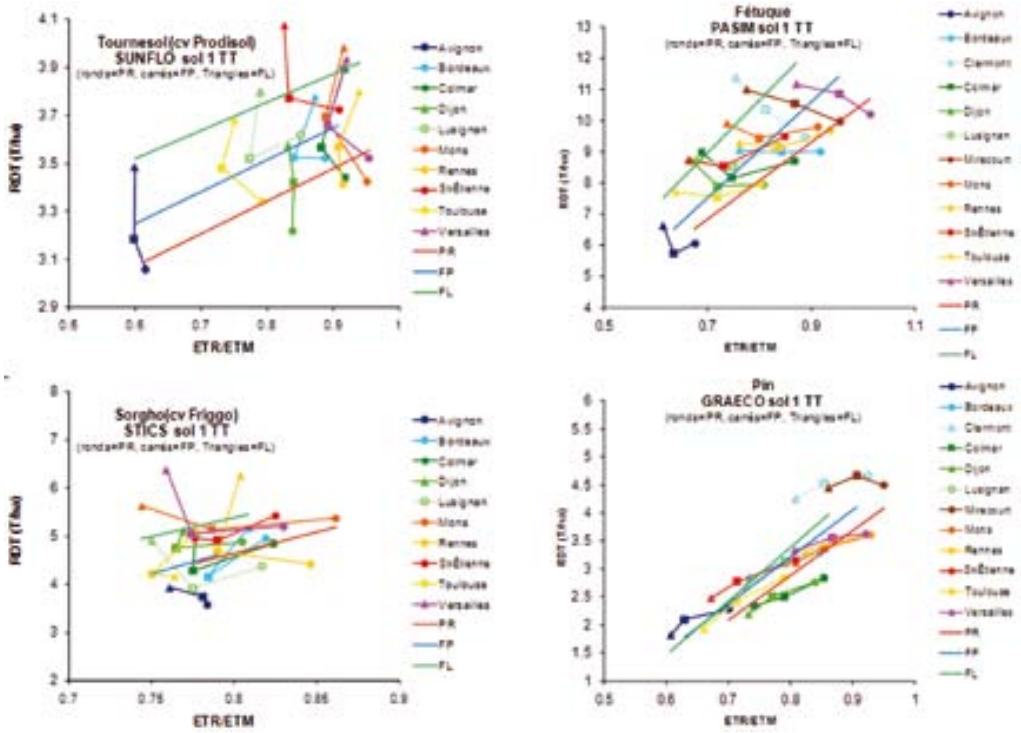


Figure 1 : *rendement en fonction de ETR/ETM pour le tournesol simulé avec SUNFLO (haut à gauche), la fétuque simulée avec PASIM (haut à droite), le sorgho simulé avec STICS (bas à gauche) et le pin simulé avec GRAECO (bas à droite). Les conditions de sol (1) et de climat (TT*) sont identiques et chaque point est une moyenne sur 30 ans pour un site.*

Impacts de la température sur le rendement

Comme nous l'avons déjà évoqué dans la partie précédente, la température joue sur le rendement un rôle complexe et son augmentation peut provoquer des effets contradictoires selon les cultures.

Dans l'ensemble, l'effet thermique est plutôt positif. Pour certaines cultures, l'augmentation de température assure une meilleure couverture des besoins thermiques, ou réduit des problèmes liés au froid. C'est par exemple le cas pour le tournesol, le sorgho et la vigne dont l'extension septentrionale est fortement favorisée (cf. fiche ATOUTS ET VULNÉRABILITÉS). Grâce à cette élévation thermique, les cultures d'hiver (blé, colza) sont aussi moins soumises aux gels. Cependant, pour ces dernières, l'effet thermique prépondérant est celui de l'anticipation des stades phénologiques qui permet d'esquiver dans une large mesure l'accroissement des stress en période estivale (cf. fiche TIMING), et ainsi de limiter les pertes de rendement. Mais n'oublions pas que cette anticipation ne peut se faire sans dommage que parce que les occurrences de gel tardif diminuent. Pour les cultures pérennes, l'augmentation de température allonge les périodes de croissance : démarrage plus précoce au printemps et arrêt plus tardif en hiver. Par conséquent, l'effet thermique direct est plutôt bénéfique au rendement, même si le réchauffement global peut avoir des effets négatifs par le biais des interactions avec les autres facteurs climatiques, notamment hydrique.

Il existe cependant des effets négatifs. Pour les cultures annuelles de printemps, l'augmentation de température anticipe les stades, mais raccourcit également la phase de remplissage du grain (à cause de leur positionnement calendaire expliqué dans la fiche TIMING), ce qui a tendance à réduire le rendement. Par ailleurs, l'esquive permise par l'anticipation des stades ne supprime pas complètement les effets néfastes des hautes températures sur blé et tournesol (cf. fiche TIMING).

D Sources d'incertitude

Le climat

La fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS donne une image éloquente de l'impact de l'incertitude représentée par les différents scénarios, modèles climatiques et méthodes de régionalisation*, sur le rendement du blé. Elle montre notamment que cette variabilité* grandit avec la période du futur considérée, aussi bien en tendance sur les médianes que pour la dispersion entre années. On peut aussi noter que les méthodes de régionalisation sont génératrices d'incertitudes* de même ordre de grandeur que les scénarios SRES ou que le choix des modèles climatiques. Cependant, ces incertitudes dans leur ensemble sont bien inférieures à la variabilité interannuelle : par exemple pour le blé, cette dernière est, quel que soit le modèle agronomique, de l'ordre de cinq fois supérieure à l'incertitude due aux scénarios climatiques.

Au-delà de ces évolutions, on peut aussi se demander quel effet aura le changement climatique sur la stabilité de la production agricole. Pour cela, nous avons reporté dans la figure 2 les coefficients de variation (écart-type/moyenne) des rendements sur l'ensemble des sites pour des cultures représentatives de ces sites. On constate ainsi une légère tendance à la diminution du coefficient de variation pour la plupart des cultures (le sorgho et le pin font exception) entre PR et FP, mais cette tendance peut s'inverser entre FP et FL (cas du blé) et être différente selon les modèles agronomiques utilisés (cf. § suivant). En première approximation, il est donc préférable de garder en mémoire l'importance de cette variabilité interannuelle qui reste le premier des signaux climatiques, même pour des cultures plus régulées par l'irrigation, comme le maïs, ou par leur caractère pérenne, comme la prairie.

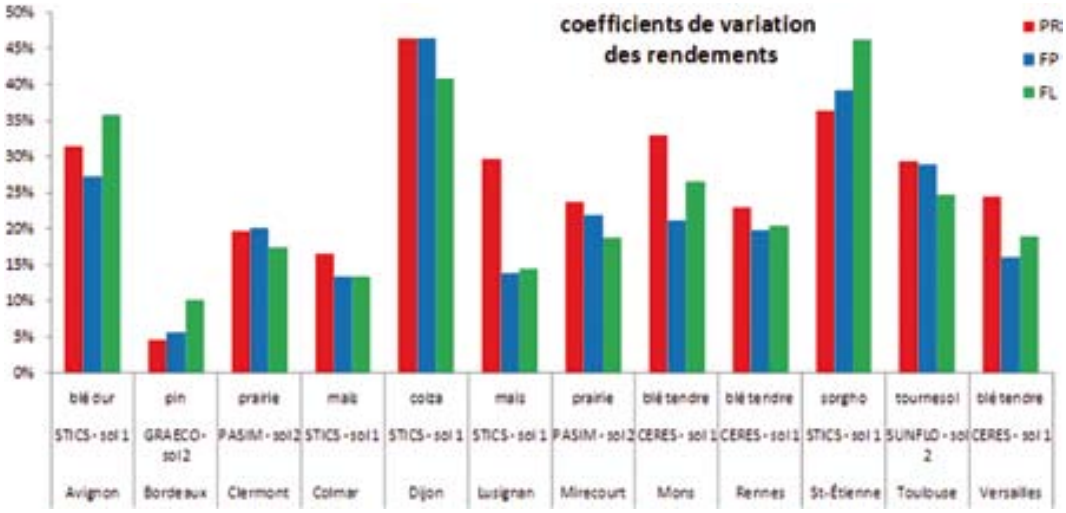


Figure 2 : *évolution des coefficients de variation (écart-type/moyenne) des rendements, pour diverses cultures (seule la culture du maïs est irriguée) et sites, calculés par les modèles et sur les sols appropriés. Méthode de régionalisation TT.*

Les modèles agronomiques

Les modèles agronomiques sont au mieux des représentations simplifiées de la réalité (cf. fiche MODÈLES). Même si leur formalisme permettait de reproduire très exactement les processus en jeu (les modèles les plus mécanistes s'en approchent), il demeurerait les incertitudes causées par les erreurs dans l'estimation des paramètres* des équations du modèle (paramètres d'autant plus nombreux que le modèle est mécaniste). Ces erreurs proviennent elles-mêmes des aléas et imprécisions de mesures sur les données servant à caler ces modèles et constituent donc une part d'incertitude incompressible (Passioura *et al.*, 1996).

Pour essayer d'évaluer cette incertitude, nous avons, chaque fois que cela était possible, essayé de mettre plusieurs modèles en parallèle. Ainsi, pour tournesol et prairie, deux modèles ont été utilisés (respectivement STICS et SUNFLO, et STICS et PASIM), alors que pour le blé tendre trois modèles ont pu être mis en œuvre (STICS, CERES, PANORAMIX).

Nos résultats montrent que la variabilité entre modèles pour une même situation peut être très importante, même en projection (différence entre FP ou FL et PR), et elle est souvent d'au moins un ordre de grandeur supérieur au signal du changement climatique. On peut attribuer cette incertitude à une réactivité différente des modèles face à la variabilité du milieu pédoclimatique, laquelle génère à la fois des variabilités interannuelles pouvant aller du simple au double et des comportements différents en fonction des sols. Ainsi nous pouvons identifier trois types de comportement bien distincts (fig. 3 et 4).

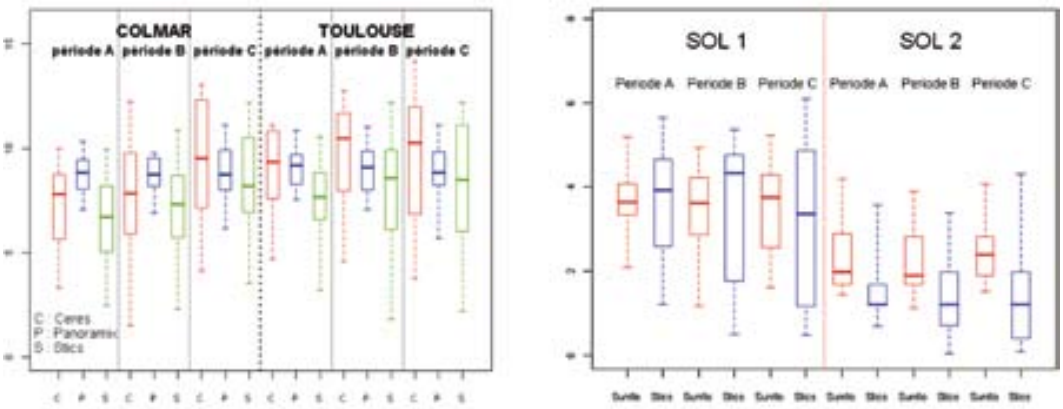


Figure 3 : *boxplots* (avec valeurs extrêmes, médianes, 2° et 8° déciles) permettant de comparer les modèles de blé (à gauche) à Colmar et Toulouse et les modèles de tournesol (à droite) à Toulouse pour le sol profond (1) et le sol superficiel (2). Méthode de régionalisation TT. Les périodes sont identifiées par des lettres (A = PR, B = FP, C = FL).*

- les modèles montrent la même tendance évolutive avec le changement climatique : c'est le cas de STICS et CERES ou de STICS et PASIM ou STICS et SUNFLO pour le sol 1 à Toulouse.
- L'un des modèles est peu sensible au changement climatique : différence entre PANORAMIX et les autres modèles de blé ou entre STICS et SUNFLO pour le sol 2 à Toulouse. Ces résultats sont dus à des compensations entre les effets négatifs des stress de fin de cycle et l'effet positif du CO_2.
- Il existe une forte interaction entre l'incertitude entre les modèles et le type de sol : cas de STICS et PASIM qui semblent en phase pour le sol 2 et différents pour le sol 1 (idem pour SUNFLO et STICS). On retrouve un comportement semblable entre les espèces prairiales : meilleure convergence de STICS et PASIM pour le ray grass que pour la fétuque.

Chacun de ces modèles est un point de vue sur la réalité et il ne s'agit pas, à travers cette étude, de nous prononcer sur leur qualité, surtout s'agissant de leur projection dans un avenir où il nous est impossible de les valider. Cependant, cette incertitude nous a conduits à utiliser les modèles indépendamment les uns des autres et à discuter de leurs divergences dans les fiches *ad hoc*. Si cette incertitude oblige à une certaine modestie quant aux valeurs annoncées, nous n'avons pas rencontré de cas où elle contredisait le sens des messages.

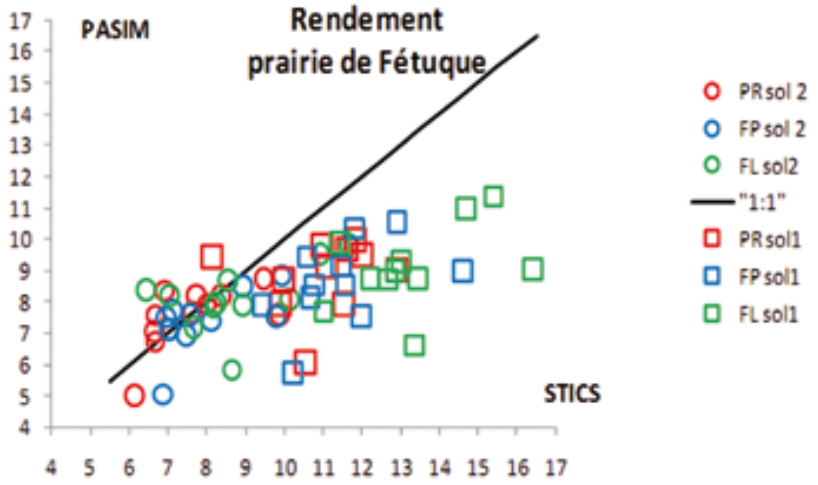


Figure 4 : *comparaison de STICS et PASIM pour la fétuque et les sols 1 (sol commun de type grande culture) et 2 (sol superficiel de prairie). Chaque point représente la valeur moyenne par période (méthode de régionalisation du climat TT).*

Importance de la prise en compte des effets positifs et négatifs du changement climatique

Afin de comprendre le mode d'action des effets positifs et négatifs du changement climatique, nous avons testé, à l'intérieur du modèle blé CERES, différentes options relatives aux effets de CO_2 et d'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 simulant explicitement les processus de carboxylation, respirations, transferts d'électron, etc. et de leurs lois d'action en fonction de la température, soit l'approche plus empirique de Monteith basée sur la notion d'efficience de conversion du rayonnement solaire en biomasse (Radiation Use Efficiency).

Nos résultats (fig. 5) montrent que la prise en compte de l'augmentation des concentrations en CO_2 dans l'atmosphère constitue l'effet le plus important à mesure que l'on s'éloigne vers le futur et que le mode de représentation de cet effet (Farquhar ou Monteith) a peu d'impact. L'échaudage a peu d'effet en valeur médiane, mais provoque une baisse systématique des maxima de rendement atteignables.

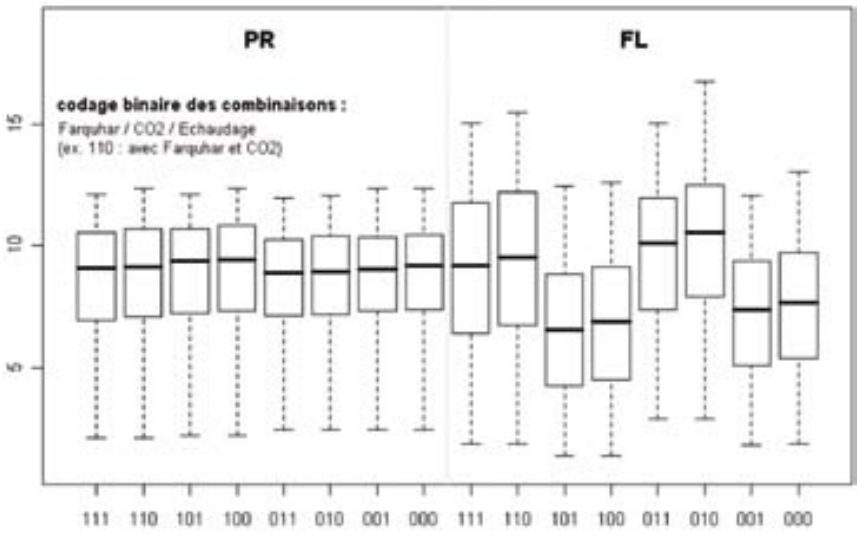


Figure 5 : *comparaison des résultats de CERES blé (moyenne pour les sites de Toulouse et Colmar) en activant ou désactivant trois options de simulation : CO_2 ou non, échaudage ou non, calcul de l'effet CO_2 avec Farquhar ou Monteith pour les deux périodes extrêmes (PR et FL).*

E Sources de variabilité

Les systèmes

Dans le cadre de ce projet, la plupart des rendements est simulée dans le cadre de monocultures avec des pratiques fixées afin de bien faire ressortir les effets au premier ordre de l'évolution prévue des facteurs climatiques sur le rendement des cultures. Cependant, leur comportement dans différentes rotations culturales a aussi été testé grâce au modèle STICS, et, pour chaque système, quelques pistes ponctuelles de variabilité sont explorées (cf. description dans la fiche AGRICULTURE et analyses dans les fiches par culture). Il s'agit essentiellement de la précocité variétale et de la variabilité des sols. Dans le cadre du système prairial, deux espèces différentes sont comparées : fétuque et ray grass. Pour la vigne, ce sont à la fois les cépages, les densités de plantation et le recours à l'irrigation qui sont testés, tandis que pour la pinède ce sont les durées de rotation qui sont considérées. Soulignons toutefois que, sauf pour quelques cas ponctuels (maïs, blé), l'adaptation des pratiques n'a pas été envisagée.

Les sites

Évidemment la plus grande source de variabilité est liée à la géographie, représentée dans notre étude par les divers sites répartis sur l'ensemble de l'Hexagone (les cultures tropicales étant traitées à part : cf. fiche ANTILLES). Le tableau 2, dans lequel sont reportées les évolutions de rendement attendues par site entre PR et FL, montre combien il serait incorrect de produire une synthèse généralisée à l'ensemble du territoire et des productions. Les cultures semblant le plus souffrir sont celle du pin, dont l'évolution est négative quel que soit le site, et celle du maïs irrigué dont l'évolution est négative dans la plupart de ses zones de culture actuelles. La région Sud-Ouest paraît donc particulièrement touchée dans ses principales productions. À l'opposé, les cultures d'hiver comme le colza et le blé semblent promises à des gains de productivité du fait de leur capacité à tirer profit de l'augmentation prévue du CO_2 (fonctionnement type C3) et à esquiver les stress accrus en période estivale. De même, les régions du nord de la France et les régions de montagne (représentées dans l'étude par Clermont-Theix) semblent être les plus aptes à tirer profit du changement climatique en raison de l'extension possible des zones de production actuelles pour les cultures à forts besoins thermiques.

	Blé	Maïs	Colza	Tournesol	Sorgho	Vigne	Pin	Fétuque
Avignon	~~0.4~~	**-1.5**	~~0.2~~	~~0.6~~	~~0.2~~	~~-0.1~~	**-0.4**	*0.9*
Bordeaux	0.9	**-1.5**	~~-0.4~~	0.4	0.6	~~0.2~~	**-0.5**	~~0.4~~
Clermont	~~0.2~~	**8.2**	**1.7**	**3.9**	**6.3**	**4.1**	**-0.4**	1.5
Colmar	1.7	**-1.3**	**0.9**	~~0.1~~	~~0.5~~	**0.8**	**-0.5**	1.0
Dijon	1.5	**-0.8**	**1.0**	~~0.1~~	0.7	**0.7**	**-0.6**	1.3
Lusignan	~~0.1~~	**-1.1**	0.8	~~0.3~~	~~0.5~~	**0.5**	**-0.8**	~~0.1~~
Mirecourt	1.3	**3.4**	**2.5**	**3.2**	**5.7**	**4.2**	**-0.1**	0.8
Mons	1.0	**2.5**	~~-0.1~~	**2.2**	**4.7**	**3.2**	**-0.5**	~~0.2~~
Rennes	~~-0.3~~	~~-0.2~~	~~0.6~~	**1.6**	**4.0**	**1.9**	**-0.3**	~~-0.1~~
Saint-Étienne	**2.6**	**-1.6**	**1.5**	~~0.0~~	~~-0.2~~	0.3	**-0.7**	~~-0.1~~
Toulouse	1.5	**-1.8**	~~0.2~~	~~-0.3~~	-1.2	**-0.4**	**-0.9**	~~0.2~~
Versailles	0.8	**0.9**	~~0.3~~	**1.6**	**3.8**	**2.3**	**-0.3**	~~0.0~~

Tableau 2 : *évolution du rendement entre PR et FL, par site et culture (sol 1, méthode de régionalisation TT, CERES pour blé, GRAECO pour pin, PASIM pour fétuque et STICS pour autres cultures).* **Gras** *: $p < 0.01$; Italique : $p < 0.05$;* Normal : *$p < 0.10$; ~~Barré~~ : non significatif.*

Ce qu'il faut retenir

- ✓ L'ensemble des facteurs climatiques est susceptible de jouer sur le rendement final d'une culture. Les principales grandeurs influentes, modifiées de façon importante par le changement climatique, sont la teneur de l'atmosphère en CO_2, la température et le bilan hydrique climatique (P – ET0). Le CO_2 joue un rôle majeur et positif pour les cultures en C3, sans lequel il faudrait s'attendre à des pertes de rendement du blé de l'ordre de 25 % dans le FL. La sécheresse joue un rôle négatif dont l'ampleur varie avec les cultures, leur capacité d'esquive (cultures d'hiver) et leur sensibilité au rôle antitranspirant du CO_2. L'augmentation de la température joue plutôt dans le sens positif en permettant la conquête de nouveaux milieux pour certaines cultures (vigne, sorgho, tournesol, voire maïs) et une moindre incidence des dégâts de gel pour les autres. Mais elle peut également générer des stress thermiques accrus sur la croissance et le remplissage des graines, et donc particulièrement néfastes au rendement. En conséquence, ces effets souvent contradictoires rendent la prévision de l'évolution du rendement très complexe dans le contexte de la diversité des cultures françaises et de leurs zones de production.
- ✓ En évoquant quelques typologies de culture, il semble que celles qui permettent de mieux raisonner la prévisibilité de l'impact du changement climatique soient hiver/été, adaptée ou non à la sécheresse, adaptée ou non au froid. Il semble se dessiner pour le futur une modification de la hiérarchie des facteurs limitants, avec une prégnance accrue des conditions d'alimentation hydrique et de fortes températures en fin de cycle qui prendrait, le pas sur les problèmes de températures basses.
- ✓ Les estimations climatiques et agronomiques sont soumises à des incertitudes non négligeables qui se répercutent sur les estimations de rendement. Il est à retenir que la principale source d'incertitude climatique reste, et de loin, la variabilité interannuelle et que si les incertitudes agronomiques introduisent un bruit dans les valeurs produites, elles ne remettent pas en cause les grandes tendances. Enfin, les rendements ne vont pas réagir comme un tout : la diversité des sites et des systèmes de culture présente autant de sources de variabilité qui peuvent réagir positivement, négativement ou, et ce n'est pas le plus rare, ne pas réagir à l'évolution tendancielle du climat.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ 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. C'est par exemple le cas de la fertilisation azotée, fixée en quantité dans le cadre de cette étude, alors qu'elle est actuellement l'un des principaux leviers de la production céréalière et fourragère et intervient dans de nombreux processus d'incidence environnementale : tenter de raisonner son optimisation dans le cadre du changement climatique pourrait constituer une suite très originale à ces travaux.
- ✓ Par ailleurs, la prise en compte de phénomènes très ponctuels ou d'accidents extrêmes pendant des phases particulièrement sensibles comme la méïose ou la pollinisation n'a pas pu être envisagée par manque de références et de recul sur la question. On pourrait également envisager la prise en compte d'autres éléments atmosphériques influents, comme l'ozone.

Pour en savoir plus…

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

Boote K.-J., Jones J.-W., Pickering N.-B., 1996 - Potential uses and limitations of crop models. *Agron. J.*, 88 : 704-716.

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

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

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

Passioura J.-B., 1996 - Simulation models ; Science, snake oil, education, or engineering. *Agron. J.*, 88 : 690-694.

Penning de Vries F.W.T., 1983 - Modeling of growth and production. In: *Physiological plant ecology,* Vol. IV, Lange O.L., Nobel P.S., Osmond C.B., Ziegler H. (eds), Encyclopedia of plant physiology, New series vol. 12D, Springer-Verlag, Berlin, 117-150.

C

Les cultures

Les cultures

C

Cette partie détaille, espèce par espèce, les résultats obtenus sur un ensemble (non exhaustif) d'espèces cultivées représentatives de la diversité de l'agriculture française. Les espèces étudiées ont été déterminées en fonction de la disponibilité des modèles de cultures correspondants.

- **C1 - Atouts et vulnérabilités**
- **C2 - Blé**
- **C3 - Maïs Sorgho**
- **C4 - Prairie**
- **C5 - Colza**
- **C6 - Tournesol**
- **C7 - Vigne**
- **C8 - Forêt**
- **C9 - Agriculture biologique**

Cette approche, convergente avec une logique de filière, permet de s'appesantir sur les particularités de chaque espèce, tant physiologiques qu'agronomiques ou encore géographiques. Elle permet d'analyser, pour chaque espèce, si et quels effets le changement climatique induit sur la croissance et le développement de ces cultures ainsi que d'examiner les principales possibilités d'adaptation des pratiques culturales.

La fiche ATOUTS ET VULNÉRABILITÉS introduit et synthétise l'essentiel des résultats. La fiche AGRICULTURE BIOLOGIQUE traite séparément de ce mode de production, dont le développement actuel appelait un travail spécifique dans CLIMATOR.

Atouts et vulnérabilités des productions agricoles face au changement climatique

Frédéric Levrault

C 1
Atouts et vulnérabilités

Par l'action de ses différentes composantes (température, rayonnement, pluies) et par l'effet de l'augmentation du CO_2, le changement climatique* affectera la croissance* et le développement* des espèces cultivées. Les effets sur les plantes seront, suivant les cas de figure, favorables aux productions végétales (rendements accrus, intrants réduits, travaux facilités, choix de rotations culturales* élargis…) ou défavorables (stress hydrique*, diminution des rendements* ou augmentation de leur variabilité*…).

Nous proposons ici d'examiner par quels mécanismes ces atouts ou ces vulnérabilités vont se manifester, affectant ainsi la pertinence des cultures concernées, cette notion de pertinence englobant les aspects agronomiques, techniques, environnementaux et organisationnels. Cette réflexion dépasse donc le concept de faisabilité*, abordé par ailleurs dans le présent ouvrage.

Notre analyse des mécanismes d'action du changement climatique porte sur :

- la disponibilité thermique* et la phénologie* ;
- les températures hautes et basses et les accidents physiologiques ;
- la demande climatique* en eau et les besoins en irrigation des cultures d'été ;
- les précipitations et les jours disponibles* pour les travaux des champs ;
- la qualité des produits* ;
- le CO_2, le stress hydrique et les niveaux de production ;
- la variabilité* interannuelle du climat* et de la production.

Nous analysons séparément ces différents mécanismes, renvoyant l'examen des interactions aux fiches « **Les cultures** » et « **Les thèmes** » concernées. En outre, nous n'intégrons pas ici la dimension économique de la pertinence des cultures, considérant que les hypothèses sur les charges de production et les prix de vente des productions sont trop hasardeuses au regard des échéances de l'étude (30 à 80 ans).

A Disponibilité thermique et phénologie

L'augmentation prévue des températures sur le territoire français (réchauffement moyen de 2 °C ± 0,6 °C à l'horizon 2050 pour le scénario d'émission A1B* : cf. fiche CLIMAT) va accroître la disponibilité thermique* pour les plantes en général et les espèces cultivées en particulier. Ainsi, les besoins en chaleur nécessaires au développement complet d'une variété seront, en un lieu donné, plus rapidement et/ou plus fréquemment satisfaits. Cela a deux conséquences sur le plan agricole :

- de nouvelles possibilités de cultures dans les zones jusqu'ici trop fraîches ;
- dans les zones de culture actuelles, l'avancement des dates de récolte des cultures annuelles accroîtra les durées d'interculture ou élargira le choix des successions culturales.

De nouvelles opportunités de culture

En cultures annuelles, ces opportunités se manifesteront chez les espèces à besoins élevés en chaleur, non cultivables aujourd'hui dans les régions les plus « fraîches » de Métropole.

Cas du maïs

Par exemple, pour les sites* de Mons et Mirecourt, illustratifs des plaines du nord de la France (fig. 1 haut), une variété précoce de maïs (Méribel), qui ne parvient actuellement à maturité que 2 à 7 années sur 10 pour cause de température insuffisante, devrait y devenir cultivable dès le futur proche (FP*) avec une maturité atteinte 9 années sur 10.

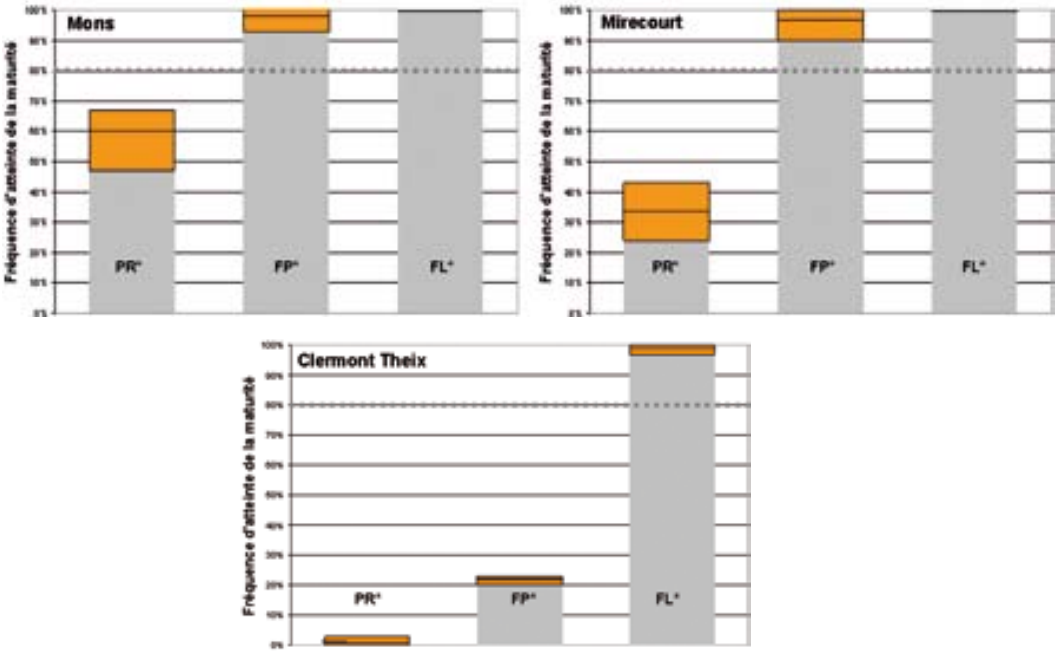


Figure 1 *: fréquence d'atteinte de la maturité d'une culture de maïs variété précoce (Méribel) pour les sites de Mons (haut à gauche), de Mirecourt (haut à droite) et de Clermont-Theix (bas). Scénario d'émission A1B* - Toutes méthodes de régionalisation* - Tous sols. Pointillés gris : fréquence repère de 8 années sur 10. Bords inférieurs et supérieurs des rectangles orange : fréquences minimales et maximales obtenues par simulation. Traits gras noirs : fréquence moyenne.*

Pour un site de moyenne montagne tel que Clermont-Theix, plus frais encore que les deux précédents, la même tendance se manifeste (fig. 1 bas), mais de façon plus progressive puisque la culture ne devient possible que dans le futur lointain (FL*) (maturité atteinte 9 ans sur 10).

Cas du tournesol

Autre culture à besoins élevés en chaleur, le tournesol devrait bénéficier lui aussi de ces disponibilités thermiques accrues et suivant la même progression temporelle, d'abord dans les plaines du Nord, en moyenne montagne ensuite. Si l'on étudie une variété tardive (Mélody), « l'accès » à ces nouvelles zones de production s'opère dans le même sens, mais de façon plus lente que dans le cas précédent, compte tenu des exigences supérieures en température pour une telle variété de tournesol.

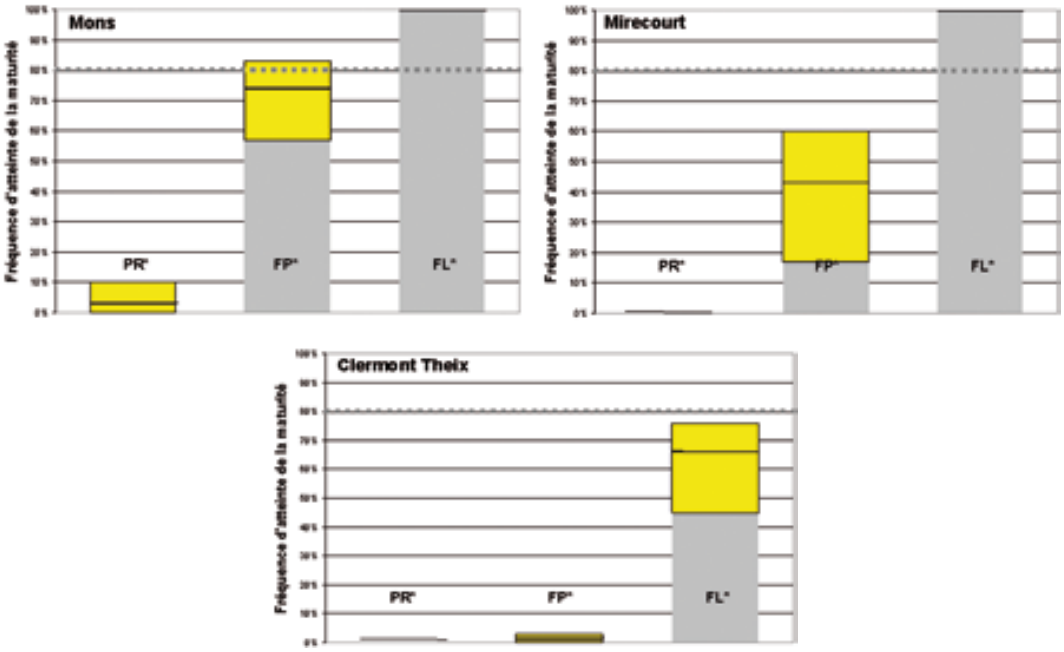


Figure 2 *: fréquence d'atteinte de la maturité d'une culture de tournesol variété tardive (Mélody) pour les sites de Mons (haut gauche), Mirecourt (haut droite) et Clermont-Theix (bas). Scénario d'émission A1B* - Toutes méthodes de régionalisation* - Tous sols. Pointillés gris : fréquence repère de 8 années sur 10. Bords inférieurs et supérieurs des rectangles orange : fréquences minimales et maximales obtenues par simulation. Traits gras noirs : fréquence moyenne.*

Les résultats du tournesol sont obtenus avec deux modèles de culture* (STICS et SUNFLO), la seule nuance étant que le modèle SUNFLO décrit une augmentation de faisabilité* plus forte dans le FP.

Ne traitant de la disponibilité thermique qu'à l'échelle du cycle cultural, pour déboucher sur une mise en œuvre agricole réelle, ces résultats devront être confrontés aux questions de choix d'assolements, d'insertion dans les rotations culturales*, et tout particulièrement d'intrants requis (eau d'irrigation, notamment).

Cas de la vigne

En viticulture, l'augmentation de la disponibilité thermique va progressivement étendre la zone de culture à tout le nord de l'Hexagone. Parallèlement, elle affectera les choix de cépages dans les zones actuelles de culture. Ainsi, nos résultats montrent qu'aujourd'hui à Mons le raisin a du mal à atteindre naturellement une maturité viticole ; le chardonnay, aujourd'hui utilisé en Bourgogne ou en Champagne, n'atteint la maturité dans le passé récent (PR*) que 3 années sur 10 pour les trois méthodes de régionalisation utilisées. Dans le FP, le chardonnay atteindra la maturité 9 années sur 10. Dans le FL, il l'atteindra tous les ans (fig. 3).

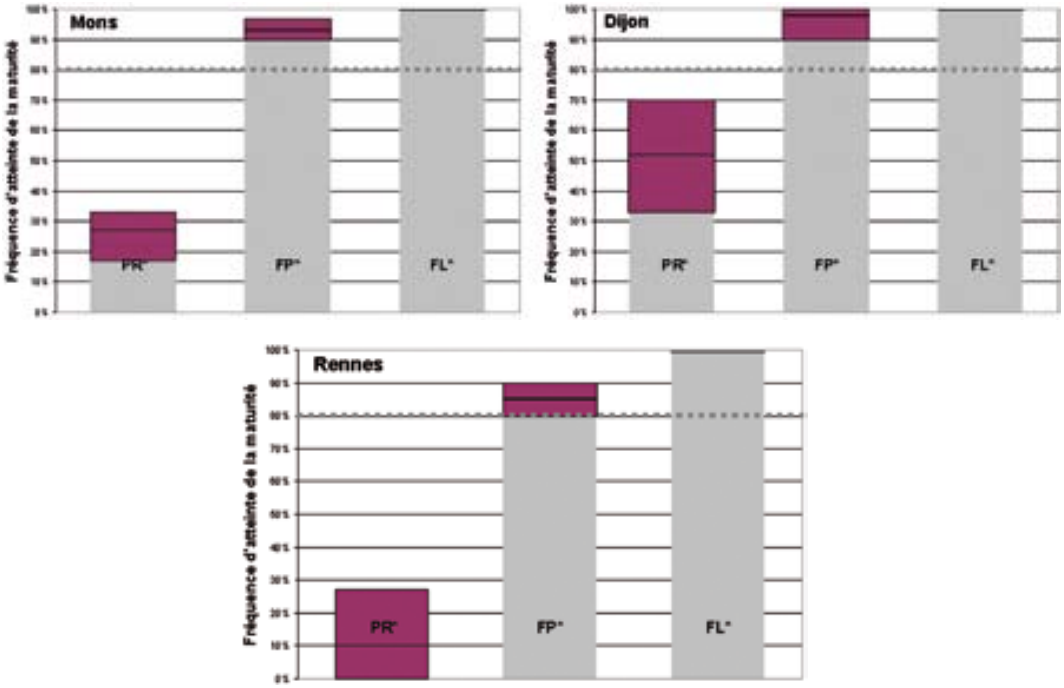


Figure 3 *: fréquence d'atteinte de la maturité viticole naturelle du raisin (chardonnay pour Mons, grenache pour Dijon et merlot pour Rennes). Scénario d'émission A1B* – Tous sols. Toutes densités de plantation. Toutes méthodes de régionalisation*. Pointillés gris : fréquence repère de 8 années sur 10. Bords inférieurs et supérieurs des rectangles violets : fréquences minimales et maximales simulées. Traits gras noirs : fréquence moyenne.*

À Dijon, le grenache (typique du Sud-Est) n'est aujourd'hui pas cultivable, ce que confirment nos outils de simulation (maturité atteinte dans le PR 3 à 7 années sur 10 suivant la méthode de régionalisation utilisée). Dans le FP, ce cépage atteint la maturité 9 à 10 années sur 10. Dans le FL, il y parvient tous les ans quelle que soit la méthode de régionalisation employée (fig. 3). À Rennes enfin, le merlot (typique du Bordelais) n'est aujourd'hui pas cultivable : nos modèles indiquent dans le PR une maturité atteinte 2 années sur 10 au mieux suivant la méthode de régionalisation. Dans le FP, cette variété y parviendra 8 à 9 années sur 10. Dans le FL, la maturité y sera atteinte tous les ans (fig. 3).

Pour les sites de Mons et Rennes, avec les cépages utilisés, le changement s'avère assez brutal puisque dès le FP les niveaux de faisabilité seront très supérieurs à ceux du PR. De nouveaux « périmètres thermiques » vont donc se dessiner progressivement pour chacun des cépages. Mais les zones réellement cultivées se détermineront en fonction de paramètres complémentaires, impliquant notamment des problématiques de qualité et de typicité du vin. En outre, il faut rappeler que ces simulations correspondent à des vignobles de plaine, le cas des vignes en coteaux aux microclimats si particuliers n'étant pas abordé ici.

Une accélération des rythmes phénologiques

Le déroulement plus rapide des rythmes phénologiques*, lié à l'augmentation de la température, entraînera l'avancement quasi général des dates de récolte. Cette libération plus précoce des terres concernera à la fois les monocultures et les rotations culturales.

Cas d'une monoculture

En monoculture, nous assisterons à l'allongement de la durée d'interculture. Ainsi, dans le cas emblématique d'une monoculture de blé tendre en Bassin parisien (Versailles), nous observons cet allongement pour les deux variétés (Charger et Soissons) et les trois profondeurs de sol étudiées (fig. 4). Suivant la méthode de régionalisation utilisée, on constate un allongement de la durée d'interculture de 10 à 13 jours entre le PR et le FP, de 9 à 12 jours entre le FP et le FL, et de 22 à 24 jours entre le PR et le FL. D'ici à la fin du siècle, la durée de l'interculture devrait ainsi passer d'un peu moins de 75 jours à près de 100 jours.

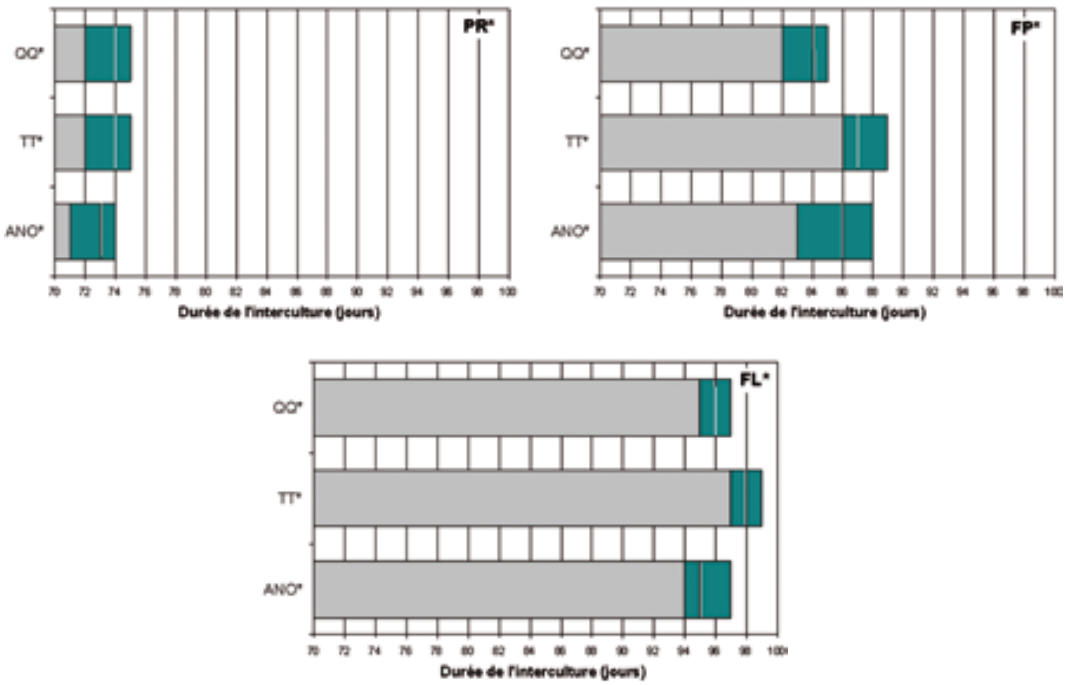


Figure 4 *: durée de l'interculture d'une monoculture de blé tendre pour le site de Versailles. Passé récent : haut gauche. Futur proche : haut droite. Futur lointain : bas. Scénario d'émission A1B – Toutes méthodes de régionalisation TT, QQ et ANO – Deux variétés – Trois types de sols. Bords gauche et droit des rectangles verts : durées minimales et maximales simulées ; barreaux blancs : moyennes.*

L'allongement de la durée d'interculture, combiné à la stimulation de la minéralisation de la matière organique du sol par le réchauffement (cf. fiche MATIÈRE ORGANIQUE), toutes choses égales par ailleurs, augmente le risque de lixiviation* des nitrates en situation de sol nu. À l'inverse, la baisse attendue des précipitations et de la percolation (variable PERCOL*, cf. fiche EAU) à cette période de l'année réduira ce risque d'entraînement de l'azote vers le sous-sol. L'examen fin de ces deux mécanismes opposés reste à conduire, pour savoir dans quel sens la qualité des aquifères s'en trouvera affectée (cf. fiche EAU). En cas de besoin, les savoir-faire existent déjà de mise en place de cultures pièges* (phacélie, moutarde, vesse…) ou de cultures dérobées* (tournesol, soja…), qui seront facilitées par la disponibilité thermique accrue, mais soumises plus qu'auparavant à la contrainte d'une faible disponibilité en eau.

Cas d'une rotation culturale

En rotation, l'avancement des dates de récolte va rendre possible certaines successions culturales dans des régions où elles étaient actuellement impossibles du fait d'une récolte du précédent trop tardive pour permettre le semis à temps de la culture suivante.

Ainsi, à Colmar, dans une rotation culturale maïs-blé-colza-blé (fig. 5), un maïs précoce variété Méribel (précédant un blé tendre) atteint dans le PR sa maturité 0 à 2 années sur 10 suivant la méthode de régionalisation, alors qu'en monoculture cette même variété de maïs atteint sa maturité 8 années sur 10 pour la même période. La différence s'explique par la nécessité de récolter la culture du maïs plus tôt en rotation, ce qui ne lui permet pas d'atteindre naturellement le stade requis pour la récolte (dans ce cas, les agriculteurs ont recours à des techniques de séchage coûteuses en énergie).

Dans le FP, le maïs précoce en rotation parviendra à maturité 8 à 10 années sur 10, tandis qu'il y parviendra tous les ans en monoculture. Dans le FL, le maïs précoce parviendra à maturité tous les ans, aussi bien en monoculture qu'en rotation culturale et quelle que soit la méthode de régionalisation utilisée. On peut en conclure qu'en raison d'une anticipation du cycle du maïs, sa récolte pourra s'effectuer dans de bonnes conditions, aussi bien en monoculture qu'en rotation, sans recours aux techniques de séchage.

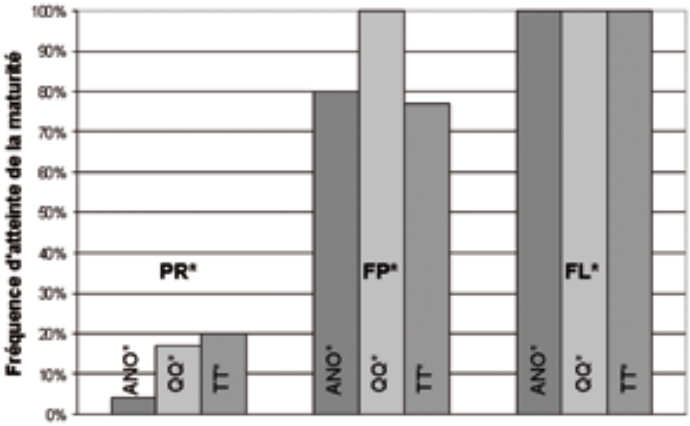


Figure 5 *: fréquence d'atteinte de la maturité naturelle par une culture de maïs à Colmar dans une rotation blé dur-maïs-blé tendre-colza pour trois méthodes de régionalisation : ANO, TT et QQ – Scénario d'émission A1B.*

B Températures hautes et basses et accidents physiologiques

Le changement climatique se manifestera, entre autres, par des jours chauds plus fréquents et des jours froids plus rares. Or ces températures élevées ou basses ont des effets particuliers sur le fonctionnement des plantes cultivées et des conséquences sur les niveaux de production.

Des jours échaudants plus nombreux

Les températures élevées, si elles se situent pendant le remplissage des grains, ont des répercussions physiologiques (concurrence entre photosynthèse et photorespiration, accroissement de la respiration nocturne, fermeture stomatique) appelées « échaudage thermique* », qui pénalisent le rendement. Ce phénomène existe, en particulier chez le blé et le tournesol (cf. fiche TIMING). Chez les céréales à paille, on considère que ces mécanismes préjudiciables à la production se manifestent à partir de 25 °C. Or nos résultats (fig. 6) font apparaître qu'à l'avenir les températures maximales journalières franchiront plus fréquemment ce seuil des 25 °C au cours des mois d'avril à juin.

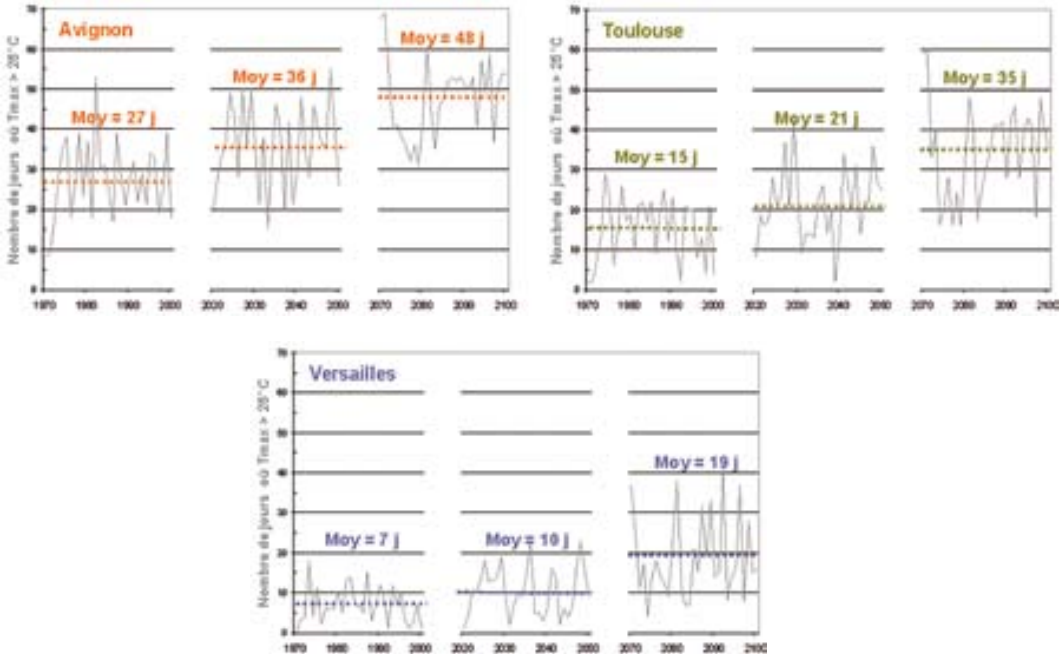


***Figure 6** : évolution du nombre de jours échaudants (tmax journ > 25 °C) entre avril et juin à Avignon (haut gauche), Toulouse (haut droite) et Versailles (bas) au cours du XXIe siècle. Scénario d'émission : A1B – Méthode de régionalisation : QQ .*

Ainsi à Avignon, le nombre de jours échaudants (c'est-à-dire où l'échaudage thermique se produit) entre avril et juin fluctue de 8 à 53 dans le PR, de 15 à 55 dans le FP et de 31 à 69 dans le FL. À Toulouse, ce nombre varie entre 2 et 29 dans le PR, entre 2 et 43 dans le FP, et entre 16 et 60 dans le FL. À Versailles, ce nombre est compris entre 0 et 18 dans le PR, entre 1 et 23 dans le FP et entre 4 et 41 dans le FL. Notons que les résultats obtenus pour ces trois sites avec les autres méthodes de régionalisation (ANO et TT) sont extrêmement proches.

Rappelons que l'anticipation – ou accélération de la phénologie – entraînera l'esquive* partielle de ces jours échaudants supplémentaires, atténuant ainsi partiellement leurs effets négatifs sur le rendement (cf. fiche TIMING). Deux voies d'adaptation* apparaissent alors : l'avancement des dates de semis et l'amélioration variétale orientée vers le raccourcissement des cycles et la tolérance aux températures élevées.

Des gelées d'automne plus rares

Dans les régions françaises les plus fraîches, certaines rotations culturales sont actuellement pénalisées par les accidents liés au gel sur cultures d'hiver en début de cycle. C'est typiquement le cas du colza en rotation, sensible au gel automnal dans certaines conditions (stade 8 feuilles non atteint, surface foliaire excessive en raison d'une suralimentation azotée). Cette sensibilité au gel explique la faible faisabilité que nos simulations font apparaître pour le PR à Colmar, dans les deux variétés étudiées (Olphi et Pollen) : 1 à 2 années sur 10.

À l'avenir, ces limitations dues au gel automnal se feront plus rares. En conséquence, dans le FP, le colza atteindra sa maturité 2 à 7 années sur 10 à Colmar. Dans le FL, la maturité sera atteinte 9 à 10 années sur 10 (fig. 7). Cette raréfaction des gelées automnales constitue donc une retombée positive du changement climatique.

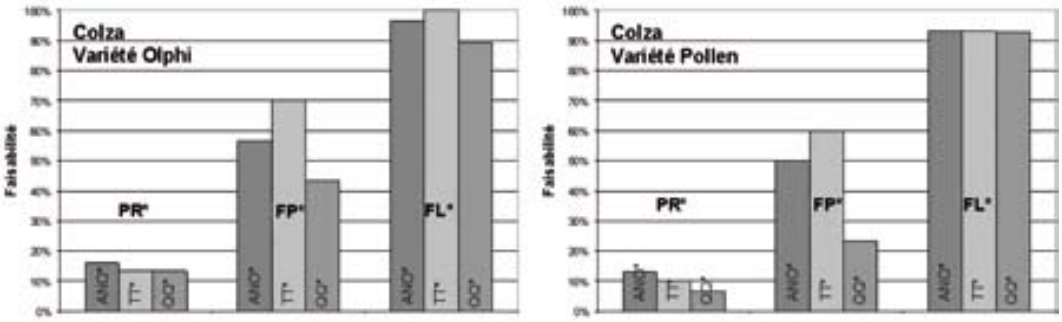


***Figure 7** : faisabilité d'une culture de colza dans une rotation blé dur-maïs-blé tendre-colza à Colmar pour trois méthodes de régionalisation : ANO, TT, QQ. – Scénario d'émission A1B.*

C Demande climatique et besoin en irrigation des cultures de printemps

La baisse marquée des précipitations printanières et estivales (cf. fiche CLIMAT) et l'accroissement de l'évapotranspiration potentielle* vont affecter à la hausse les besoins en irrigation des cultures de printemps, tandis que l'anticipation (accélération phénologique) aura un effet modérateur lié au phénomène d'esquive.

Un enjeu emblématique en la matière est celui du maïs irrigué. En situation de sol moyennement profond et avec une irrigation limitée à 80 % de l'ETM*, nos simulations font apparaître (fig. 8) une nette augmentation de l'irrigation entre le PR et le FP : + 24 à + 83 mm suivant la variété et la méthode de régionalisation à Toulouse, + 47 à + 131 mm à Lusignan, + 37 à + 78 mm à Versailles, + 40 à + 100 mm à Colmar, et + 35 à + 115 mm à Mons. Ce qui représente, au champ, une fourchette de un à quatre tours d'eau supplémentaires.

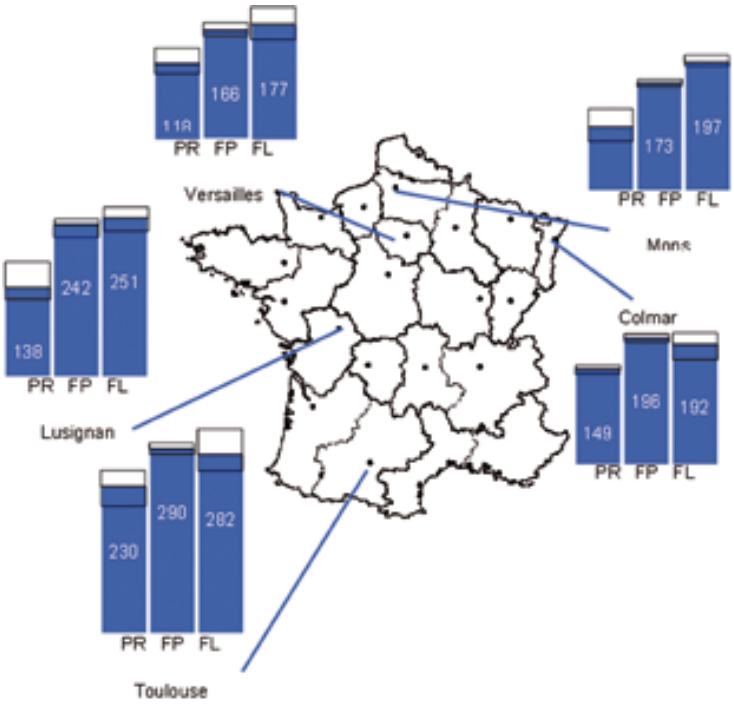


Figure 8 *: évolution des besoins en irrigation à 0,8 ETM* d'une culture de maïs au cours du XXIe siècle. Scénario d'émission A1B – Moyenne, minimum et maximum des trois méthodes de régionalisation – Sol 1 moyen – Dates de semis fixées. Variété tardive : Toulouse et Lusignan ; variété précoce : Versailles, Colmar et Mons.*

Ce résultat est à pondérer par le fait que nos simulations (qui intègrent le mécanisme d'anticipation) se font à dates de semis fixées (invariantes pour la période 1970-2100). Or dans la réalité agricole, les dates de semis ont déjà nettement avancé et continueront de le faire au XXIe siècle. Il convient toutefois de rester prudent sur un éventuel effet modérateur (par esquive) de l'avancée des dates de semis sur les besoins en irrigation, car nos premiers résultats ne vont pas dans ce sens (cf. fiche MAÏS-SORGHO). Cette adaptation au changement climatique par avancement des dates de semis reste à étudier de façon approfondie pour une vision plus complète de l'évolution des besoins en irrigation. Toutes les voies d'adaptation peuvent au demeurant être examinées, tant dans les zones actuelles de production (stockage durable d'eau, pilotage de l'irrigation à ETR/ETM réduit, réduction des surfaces irriguées et substitution d'espèces, variétés plus précoces, avancement des dates de semis, amélioration génétique de la tolérance* au stress hydrique) qu'entre zones de production (transfert des cultures vers les régions moins pénalisées sur le plan hydrique).

Parallèlement, la question se pose de l'évolution des ressources naturelles en eau (superficielles et souterraines) en réponse au changement climatique. Les travaux récents (projet REXHYSS, projet IMAGINE 2030) font état d'étiages plus marqués et prolongés plus tard dans l'année, ce qui est convergent avec nos propres résultats à l'échelle parcellaire (cf. fiche EAU). Ces résultats doivent être approfondis pour préciser quelles possibilités de prélèvement d'eau s'offriront à l'agriculture, que ce soit au printemps et en été pour irriguer, ou en hiver pour remplir des ouvrages de stockage dédiés pour tout ou partie à l'irrigation.

D Précipitations et jours disponibles pour les travaux des champs

La diminution assez générale des précipitations aura des répercussions sur l'état de surface des sols cultivés. Plus précisément, on devrait assister à une augmentation du nombre de jours (dits jours disponibles) où l'humidité des sols est suffisamment faible pour permettre l'intervention des engins agricoles dans les parcelles.

Nos simulations montrent notamment qu'à l'automne (préparation des semis de cultures d'hiver) cette tendance est particulièrement visible dans la moitié nord de la France. En effet, ce nombre de jours disponibles est actuellement plus réduit dans le nord que dans le sud de l'Hexagone pour des raisons climatiques évidentes de plus grande pluviosité (fig. 9).

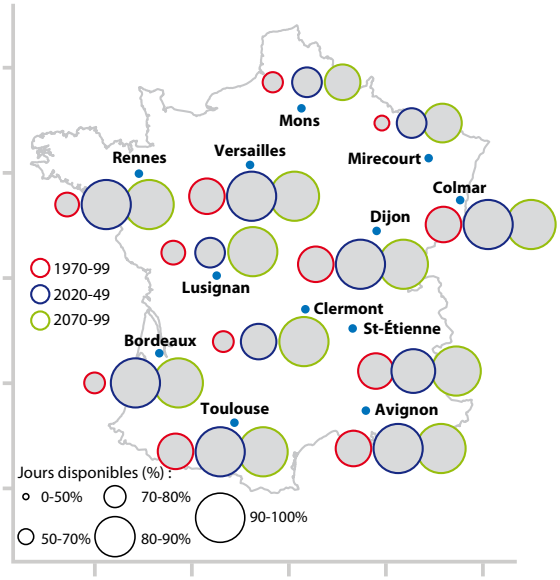


Figure 9 *: nombre de jours disponibles à l'automne dans le PR (cercles de gauche), dans le FP (cercles centraux) et dans le FL (cercles de droite). Scénario d'émission A1B – Méthode de régionalisation : TT* – Sol commun.*

C'est donc dans le sens d'une facilitation des chantiers d'automne (récolte maïs, préparation de semis d'hiver) que le changement climatique devrait jouer, rendant plus aisée la conduite des cultures concernées.

Dans d'autres situations culturales, le nombre de jours disponibles évoluera à la baisse. C'est en particulier le cas pour les semis de cultures de printemps : la moindre pluviométrie attendue dans le sud de la France devrait diminuer le nombre de jours aptes aux semis, l'humidité insuffisante du sol empêchant une germination et une levée satisfaisantes des plantes. Le recours à l'irrigation « starter » risque alors de se généraliser.

E Qualité des produits

L'augmentation des températures et l'avancement de la phénologie (anticipation) auront chez les cultures pérennes des répercussions particulières sur la qualité des produits.

Ainsi, la vigne, dont la récolte se situe actuellement après les maxima annuels de température, verra sa période de maturation avancer plus tôt en été. Ce faisant, les baies seront exposées à des températures plus élevées, en particulier en ce qui concerne les températures nocturnes dont on sait qu'elles sont déterminantes sur le plan aromatique. Comme le montre la figure 10, tous les vignobles actuels seront soumis à cette augmentation des températures nocturnes et risqueront une dégradation de qualité des raisins si aucune adaptation n'est mise en œuvre (cf. fiche VIGNE).

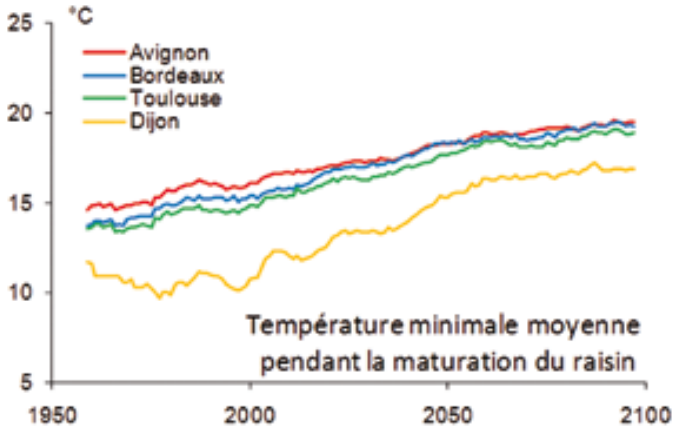


Figure 10 *: évolution de 1950 à 2100 de la moyenne des températures minimales journalières durant la maturation du raisin (véraison à maturité). Scénario d'émission A1B – Méthode de régionalisation TT.*

F CO_2, stress hydrique et niveau de production

L'augmentation du CO_2 atmosphérique, cause du changement climatique, stimule l'activité photosynthétique des plantes en C3* (dans notre étude, seuls le maïs et le sorgho sont des plantes en C4) qui constituent l'essentiel des plantes cultivées en région tempérée (mécanisme connu sous le nom de fertilisation carbonée*), et en conséquence la production de biomasse. À l'inverse, la baisse de confort hydrique*, également conséquence du changement climatique, pénalise la production végétale. La combinaison de ces deux facteurs déterminera l'évolution – à la hausse ou à la baisse – des rendements, avec des résultats qui varieront en fonction de la culture, de la localisation, de l'échéance, et du calendrier cultural. Ces mécanismes, brièvement vus ici, sont détaillés dans la fiche RENDEMENT.

Une augmentation de la production en l'absence de stress hydrique accru

Dans le cas des cultures d'hiver, peu exposées à un accroissement de stress hydrique, on devrait assister à une augmentation des rendements. C'est typiquement ce que nos simulations font apparaître en monoculture de blé tendre. Par exemple, en sol moyennement profond et suivant la méthode de régionalisation utilisée, le rendement moyen par période de trente ans augmentera dans le FP de 1 à 14 quintaux par hectare à Lusignan, à Bordeaux de 1 à 13 quintaux par hectare, à Rennes de –1 à 17 quintaux par hectare. A Clermont-Theix, l'accroissement est encore plus fort (de 21 à 41 quintaux par hectare) en raison d'une maturité irrégulièrement atteinte dans le PR : seulement 5 à 8 années sur 10.

La fertilisation carbonée et l'accroissement des températures sont évidemment les deux facteurs principaux de cette augmentation de rendements. L'anticipation des stades, conséquence de la hausse des températures, intervient elle aussi dans ces augmentations, mais de façon indirecte : elle permet à la culture une esquive des stress hydriques et thermiques accrus de printemps et d'été. Enfin, cette augmentation des rendements s'explique aussi en partie par la raréfaction des excès d'eau hivernaux, en particulier dans l'ouest du pays.

Dans le cas des prairies, la même tendance s'observe. Très liée à la méthode de régionalisation* utilisée, l'augmentation du rendement d'ici à la fin du siècle oscillera entre 8 et 22 % pour la fétuque, et entre 6 et 19 % pour le RGA. Cette augmentation de la production annuelle résultera en fait d'une forte augmentation de la croissance journalière des plantes en automne et au printemps (température et CO_2 accrus sans contrainte hydrique additionnelle) combinée à une réduction estivale de la croissance journalière des plantes (stress hydrique accru).

Une diminution de la production en cas de stress hydrique accru

À l'inverse, lorsque la contrainte hydrique se renforcera nettement, ses effets dépréciateurs l'emporteront sur les effets positifs de la fertilisation carbonée et les rendements seront à la baisse. C'est ce que l'on devrait observer dans certaines situations pour le tournesol et la vigne.

Ainsi, à Toulouse, le rendement moyen d'un tournesol (rotation tournesol-blé-sorgho-blé) non irrigué en sol superficiel diminuera, suivant la méthode de régionalisation, de 6 à 10 quintaux par hectare entre le PR et le FL. Cette baisse restera toutefois localisée : à Bordeaux ou Lusignan, dont l'évolution climatique est pourtant proche de celle de Toulouse, on n'observe pas de diminution. Dans des situations plus septentrionales (Bassin parisien, par exemple), nos résultats pour le PR (maturité atteinte 0 à 7 années sur 10) nous empêchent de conclure. Mais on peut s'attendre à ce que la contrainte hydrique moindre permette aux effets positifs du CO_2 de « l'emporter », débouchant ainsi sur une augmentation des rendements.

La vigne, lorsqu'elle n'est pas irriguée, pourra elle aussi être sujette à la baisse de rendement, de façon également circonscrite. Ainsi, à Avignon, la production du grenache en sol moyennement profond devrait varier de + 10 à – 5 quintaux par hectare dans le FP selon la densité de peuplement et la méthode de régionalisation utilisée. La même analyse pour le merlot donne à

Bordeaux une variation comprise entre + 3 et – 2 quintaux par hectare. À Dijon, la production du chardonnay devrait varier de + 11 à – 4 quintaux par hectare dans les mêmes conditions d'étude. Dans le cas de la vigne, la décroissance de la production trouve également son origine dans la réduction de la durée de l'élaboration et du remplissage des baies de raisin.

En résumé, l'équilibre entre facteurs favorables et défavorables ne devrait évoluer dans un sens préjudiciable au rendement que dans un nombre limité de situations : Sud de la France, cultures en sec, de printemps et d'été pour les annuelles. Il est prématuré, à ce stade, de délimiter une « frontière » entre régions affectées ou non par la diminution des rendements.

G Variabilité interannuelle du climat et de la production

Un déterminant important de la présence d'une espèce dans un système de culture* – au-delà du rendement moyen et des marges financières générées – réside dans la stabilité de la production sur le long terme, pour les conditions de sol et de climat locales. Cette plus ou moins grande variabilité interannuelle de la production peut être chiffrée au moyen du coefficient de variation qui est le rapport de l'écart-type* à la moyenne (des rendements) pour une période donnée.

Le changement climatique devrait provoquer une augmentation de cette variabilité (plus d'écart entre rendements d'une année à l'autre), au moins pour certaines cultures. Pour le tournesol en sec par exemple (tab. 1), nos résultats obtenus sur quatre sites font apparaître une tendance nette à l'augmentation de la variabilité des rendements. Sur l'ensemble du siècle, la variabilité augmente de 25 % dans le Sud (Toulouse), de 10 % au Centre (Lusignan et Dijon) et reste stable au Nord (Versailles). Les variations interannuelles actuelles de production, déjà croissantes du nord au sud, semblent devoir se renforcer. C'est souvent cette variabilité augmentée qui rend les évolutions de rendement non significatives.

Site	Période	Rendement moyen (quintaux par hectare)	Coefficient de variation (%)
Toulouse	PR	33,3	36
	FP	31,0	49 ↑
	FL	26,9	61 ↑
Dijon	PR	32,3	29
	FP	33,1	41 ↑
	FL	36,1	39 →
Lusignan	PR	34,6	20
	FP	35,6	21 →
	FL	37,9	29 ↑
Versailles	PR	34,3	16
	FP	39,3	11 ↓
	FL	42,3	16 ↑

Tableau 1 : *rendement du tournesol (variété précoce Prodisol) en monoculture non irriguée – Colonne de gauche : rendement moyen par période. Colonne de droite : coefficient de variation. Scénario d'émission A1B* – Méthode de régionalisation TT – Sol 1 moyen.*

Cette augmentation de variabilité n'est pas observée pour toutes les cultures. Chez la vigne par exemple (tab. 2), nos travaux montrent que la variabilité interannuelle des rendements reste majoritairement inchangée au long du XXIe siècle.

Site	Période	Rendement moyen (tonnes par hectare)	Coefficient de variation (%)
Toulouse (merlot)	PR FP FL	4,58 4,21 4,25	12 23 ↑ 27 ↑
Dijon (chardonnay)	PR FP FL	1,15 1,49 2,00	38 41 → 33 ↓
Bordeaux (merlot)	PR FP FL	4,21 4,53 5,56	23 22 → 24 →
Avignon (grenache)	PR FP FL	1,94 1,82 1,83	16 19 → 20 →

Tableau 2 : *rendement de la vigne (variété fonction du site). Colonne de gauche : rendement moyen par période. Colonne de droite : coefficient de variation. Scénario d'émission A1B – Méthode de régionalisation par type de temps – Sol 1 commun.*

Bien que le sujet reste à approfondir, on peut néanmoins avancer que les cultures les plus affectées par une variabilité accrue des rendements seront vraisemblablement les cultures de printemps non irriguées, et tout particulièrement celles cultivées sur sols peu profonds. Les cultures pérennes, les cultures d'hiver, et dans une moindre mesure les prairies, apparaissent moins sujettes à ces écarts interannuels de production, pour deux raisons principales :

- les accidents climatiques hivernaux (très basses températures, excès d'eau) deviendront moins fréquents du fait du réchauffement et de l'assèchement du climat ;
- leur positionnement calendaire les met en partie à l'abri de l'augmentation des stress hydriques printaniers et estivaux.

Ce qu'il faut retenir

✓ Le changement climatique, tel que prévu par les modèles climatiques, ne provoquera ni dégradation ni amélioration générale des possibilités de culture. Il faut plutôt s'attendre à ce qu'un ensemble de facteurs, dont dépendent ces possibilités, soit modifié.

✓ **Les principales évolutions favorables ou atouts sont :**

- des opportunités de nouvelles cultures liées à l'augmentation des températures, notamment cultures d'été dans le nord de la France et en moyenne montagne ;
- une accélération des rythmes phénologiques qui permettra une esquive partielle des stress hydriques accrus et du nombre croissant de jours échaudants de printemps et d'été ;
- une moindre humidité des sols à l'automne qui conduira à davantage de jours disponibles pour les travaux d'automne ;
- une réduction des accidents liés au gel automnal pour les cultures d'hiver ;
- une augmentation des rendements dans les cas où les stress hydriques sont évités ou compensés par une croissance à des périodes hors stress : cultures d'hiver, prairie et cultures pérennes.

✓ **Les principales évolutions défavorables ou vulnérabilités sont :**

- une augmentation de la durée d'interculture en monoculture, qui accroîtra les risques de lessivage et d'érosion ;
- une augmentation du nombre de jours échaudants au printemps, dont l'effet sera partiellement réduit par l'avancement des calendriers culturaux ;
- une diminution des rendements dans les cas où les stress hydriques aggravés ne sont pas évités : vigne non irriguée, tournesol non irrigué ;
- une augmentation des besoins en eau d'irrigation des cultures d'été ;
- une augmentation de la variabilité interannuelle des cultures d'été non irriguées, tournesol en particulier ;
- une risque de dégradation de la qualité du raisin en raison de l'anticipation de la période de maturation.

Ce qu'il faut approndir…

✓ Les rendements des cultures irriguées peuvent-ils être maintenus à leur niveau actuel en combinant réduction modérée de l'irrigation et effets positifs de la fertilisation carbonée et des températures accrues ?

✓ Le raccourcissement des cycles culturaux peut-il permettre le développement des cultures additionnelles « en dérobé » ?

✓ Quel est l'impact réel de l'accroissement du nombre de jours échaudants au printemps ?

✓ Quel est l'impact de l'allongement des durées d'interculture sur la qualité de l'eau des aquifères ?

✓ Dans quelle mesure la raréfaction des pluies printanières affectera-t-elle la germination et la levée des cultures de printemps ?

Pour en savoir plus…

Bates B.-C., Kundzewicz Z.-W., Wu S., Palutikof J.-P., éd, 2008 - *Le changement climatique et l'eau, document technique publié par le GIEC*. Secrétariat du GIEC, Genève, 236 p.

Ciscar J.-C., Iglesias A., Feyen L., Goodess C.-M., Szabo L., Cristensen O.-B., Nicholls R., Amelung B., Watkiss P., Bosello F., Dankers R., Garrote L., Hunt A., Horrocks L., Moneo M., Moreno A., Pye S., Quiroga S., Van Regemorter D., Richards J., Roson R., Sonia A., 2009 - Climate change impacts in Europe. *Final report of the PESETA research project*. EUROPEAN COMMISSION - JOINT RESEARCH CENTER. Chapter 3 : Agriculture impact assessment. Pages 43 à 49.

European Environment Agency, 2008 - Impacts of Europe's changing climate - 2008 indicator-based assessment. Chapter 5.9 Agriculture and forestry. *EEA report* No 4/2008. Pages 135 à 148.

Commission des Communautés Européennes, 2009 - L'adaptation au changement climatique : le défi pour l'agriculture et les zones rurales européennes. Document accompagnant *Le Livre Blanc sur l'adaptation au changement climatique*,13 pages.

Changement climatique et culture du blé : l'essentiel des impacts

Marie-Odile Bancal, Philippe Gate

C2
Blé

A Quelques éléments clefs sur la culture du blé tendre d'hiver en France

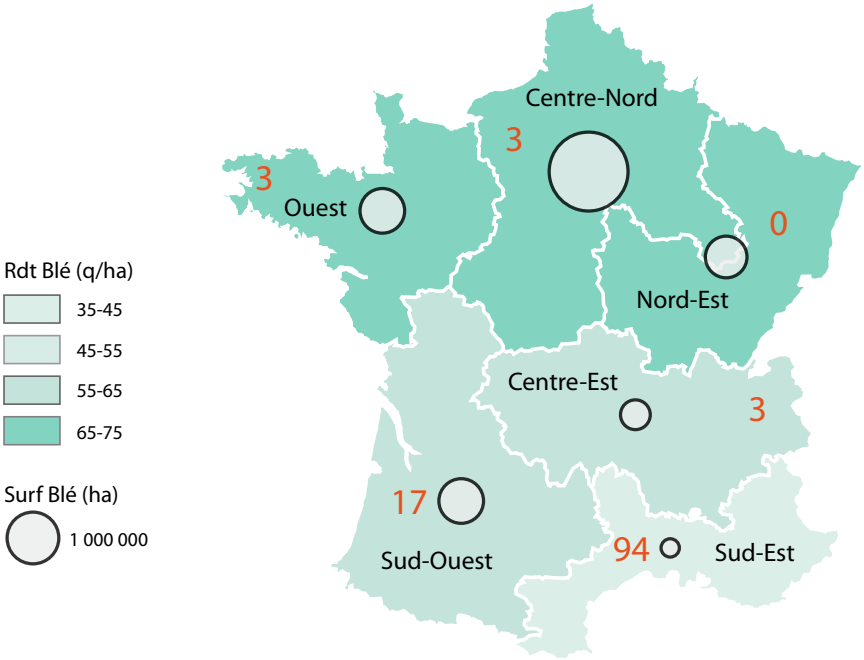


Figure 1 : *rendements et surfaces emblavées en blé dans les régions CLIMATOR, avec en rouge la proportion de blé dur et rendements* moyens. Moyennes 2000-2007. Source Agreste.*

Occupant près de 4,8 millions d'hectares (17 % de la SAU), le blé tendre arrive au premier rang des grandes cultures françaises. La moitié des surfaces se situe dans le Centre-Nord (fig. 1). Les rendements moyens sont de l'ordre de 7 t.ha^{-1} avec un maximum de 7.5 t.ha^{-1} dans le Nord-Est et un minimum de 3.7 t.ha^{-1} en région Sud-Est où il est généralement remplacé par du blé dur (cf. « Et le blé dur ? »). Le blé tendre est cultivé pour son amidon et une amélioration de sa teneur en protéines est souvent recherchée en alimentation humaine et animale. La diversité des débouchés industriels avec une première (semoulerie, meunerie, amidonnerie) et souvent une deuxième (biscuiterie, boulangerie) transformation implique des cahiers des charges précis pour atteindre une qualité optimale à la récolte propre à chaque procédé industriel.

Le blé est une culture majeure des rotations de grandes cultures. Son cycle long, d'octobre à juillet, sa large gamme de dates de semis et sa relative tolérance aux milieux dégradés en font une culture facile à implanter et valorisant bien une grande diversité de milieux ; sa sensibilité à l'échaudage* hydrique et thermique limite néanmoins son extension dans les zones Sud. Au plan phytosanitaire, le blé est sujet à de nombreuses maladies fongiques telluriques (piétins verse et échaudage) et foliaires (principalement septoriose, rouilles et fusarioses) qui affectent fréquemment le rendement et la qualité technologique, sanitaire et nutritionnelle des récoltes. Il est, par ailleurs, sensible à l'excès d'eau et ses besoins en azote sont élevés.

B Protocole de simulation de CLIMATOR

La culture de blé tendre a été étudiée dans le cadre d'une monoculture avec les trois 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 blé dur n'a été étudié qu'à travers les simulations de STICS dans le cadre des successions MBCB et TBSB.

Sites	12 sites métropolitains dont un site d'altitude
Système	Monoculture (tous les modèles) Trois successions (STICS) : • maïs - blé tendre - colza - blé dur (MBCB) • tournesol - blé dur - sorgho - blé tendre (TBSB) • pois - blé tendre - graminée fourragère sur 2 ans (BIO)
Conduite	Conduite prescrite, semis le 10/10, 230 kg N ha^{-1} en 3 apports Dates de semis : 20 sept, 1 oct, 10 oct, 20 oct, 10 nov, 1 déc Irrigation pour le système MBCB à hauteur de 50 % des besoins en eau (si nécessaire)
Sols	Sol 1 : sol de limon profond à réserve utile élevée (226 mm) et fertilité moyenne Sol 2 : rendzine à faible réserve utile (104 mm) et faible fertilité Sol 3 : sol lessivé hydromorphe à forte réserve utile (218 mm) et fertilité élevée
Variété	Soissons (précoce) et Arminda (tardive) qui diffèrent par la précocité au stade épi 1 cm et la durée de montaison
Modèle	CERES, PANORAMIX, STICS
Climat	SRES : A1B, ARPÈGE, régionalisation : TT, QQ et anomalies

C Carte d'identité écophysiologique du blé dans le contexte du changement climatique

Atouts

Le blé tendre d'hiver et le blé dur permettent une bonne valorisation de l'augmentation de teneur en CO_2 comme toutes les plantes en C3, avec à la fois une stimulation de la photosynthèse* et une limitation de la transpiration.

Le positionnement calendaire de son cycle phénologique est globalement un avantage pour éviter les stress hydriques* estivaux que des choix variétaux appropriés peuvent amplifier. De plus, le blé tendre a de forts besoins en vernalisation* : pour réaliser son développement* floral, il lui faut un certain nombre de jours où la température moyenne ne dépasse pas 10 °C au maximum (de l'ordre de 40 à 80 jours selon les variétés et le climat*). Ces besoins en vernalisation dépendent de la variété et sont une composante de leur précocité. Par ailleurs, pour fleurir, un blé vernalisé doit être soumis à une photopériode longue, ce qui donne une certaine stabilité à la durée levée-floraison par rapport aux spécificités thermiques régionales et au changement climatique*. Ainsi le raccourcissement du cycle provoqué par le réchauffement climatique sera limité par ces deux besoins (vernalisation, jours longs) du blé tendre.

Le début de la montaison (ou épi 1 cm) est un stade critique vis-à-vis des basses températures au moment où l'apex passe de la température tamponnée du sol à celle de l'air et d'un fonction-

nement végétatif à un fonctionnement reproducteur : le seuil de température de –4,5 °C pour le blé tendre est en général létal pour les brins en cours de montaison (auparavant, au cours de la phase végétative, on retient une température de –25 °C pour le seuil de gel des plantes). Ces gels d'épis concernent très majoritairement les maîtres brins qui contribuent pour 50 % environ au rendement final. En conséquence, cette occurrence de gel précoce d'épis est considérée comme un critère majeur de faisabilité* de la culture, même si le tallage peut partiellement compenser les pertes occasionnées. Si ces gels d'épis devraient, à priori, diminuer avec le changement climatique, il est important de considérer le nouveau positionnement des stades sensibles par rapport aux occurrences de faibles températures. Toujours en matière de comportement hivernal, la diminution des excès d'eau peut dans certaines régions lui être favorable.

Faiblesses

Si le blé tendre d'hiver est moins sensible au stress hydrique estival que les cultures d'été, il est en revanche très sensible à l'échaudage thermique de fin de cycle, qui peut apparaître dès 28 °C : au-delà de ce seuil, il y a arrêt sans redémarrage de la croissance des grains et parfois même des avortements de grains en début de remplissage. Il faut également noter que dès 25 °C, on peut observer une diminution de croissance des grains. De façon plus générale, il faut considérer le positionnement des stades ou phases critiques (montaison, floraison, remplissage du grain) par rapport à l'occurrence des fortes températures et/ou de stress hydrique, car ce sont ces stress induits par le changement climatique qui peuvent pénaliser l'élaboration du rendement du blé dans le futur.

Notons également que ses besoins en vernalisation confèrent au blé tendre une sensibilité à l'élévation des températures hivernales qui, à partir d'un certain seuil, pourraient devenir critiques pour sa mise à fleur.

D Impacts du changement climatique sur la culture de blé

Impacts sur le rendement et ses composantes

Les cartes (fig. 2) montrent la répartition géographique des évolutions des rendements et de leur variabilité* pour une variété précoce (Soissons) et une variété tardive (Arminda) de blé tendre, simulée avec CERES. On constate par rapport au PR* une augmentation des rendements de la variété Soissons (augmentation moyenne de l'ordre de 0,7 ± 0.5 t/ha pour le FP* et de 1,2 ± 0,8 t/ha pour le FL*) qui concerne surtout la partie est du pays. Cette augmentation en moyenne

s'accompagne assez généralement d'une augmentation de la variabilité des rendements visible par l'augmentation du grisé des disques sur la figure 2.

Hormis pour certains sites* (Bordeaux, Clermont et Saint-Étienne), la variété Arminda a un rendement moins élevé que la variété précoce (96 % du rendement de la variété précoce en moyenne pour le passé récent). Elle montre également une tendance moins nette à l'augmentation des rendements : de l'ordre de 2 % et 6 % pour le FP et le FL respectivement, contre 9 % et + 14 % pour la variété précoce. Ainsi tout concourt à l'hypothèse selon laquelle, pour la variété tardive, le bénéfice lié à l'augmentation du CO_2 est contrebalancé par un effet supérieur des stress.

Ces résultats, obtenus avec le modèle de culture CERES, sont convergents, en tendance, avec ceux de PANORAMIX. On notera cependant une différence avec le modèle STICS qui, prenant en compte les excès d'eau, simule une augmentation de rendement substantielle sur tous les sites de la façade ouest (Rennes, Lusignan, Bordeaux).

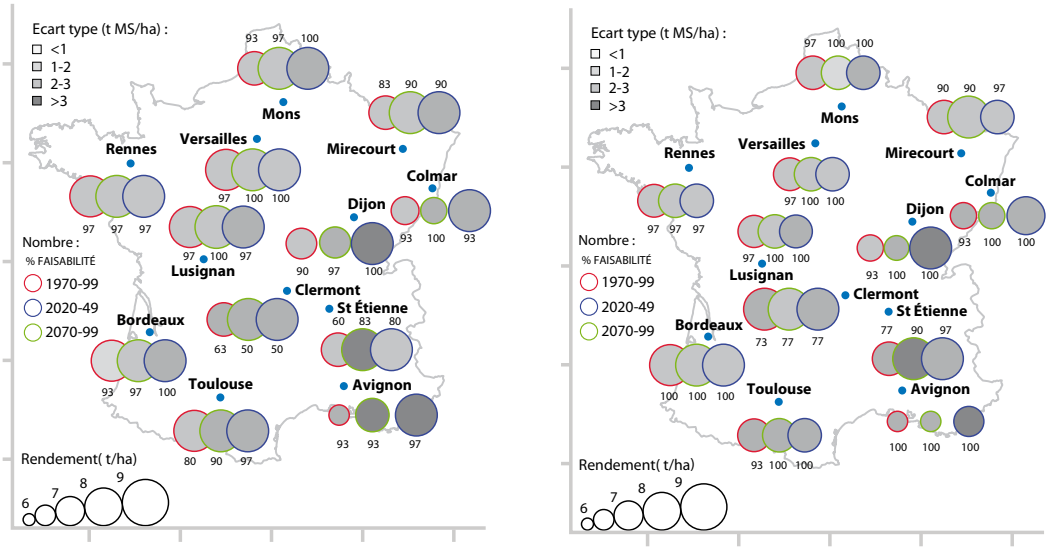


Figure 2 : évolutions de rendement (en moyenne et variabilité) et de la faisabilité (chiffres en % sous les évolutions de rendement) de la culture du blé tendre pour la variété précoce Soissons (A) et la variété tardive Arminda (B). Modèle (CERES), sol 1, climat (TT).

Enfin, la figure 2 montre une augmentation de la faisabilité de la culture avec le changement climatique pour l'ensemble des sites, qui traduit la diminution des risques de gel d'épis. Cette tendance est bien marquée sur la façade est pour les deux variétés. La faisabilité, ainsi calculée, est très élevée (>80 %) dans tous les sites excepté le site d'altitude de Clermont. Ce site se distingue également par le fait que la variété précoce voit sa faisabilité diminuer de 63 % à 50 %, ce qui suggère que le décalage phénologique lié au changement climatique se traduit par un positionnement plus défavorable du stade sensible au gel, alors que pour la variété tardive la faisabilité stagne autour de 75 %. À cause de l'excès d'eau hivernal, le modèle STICS simule de faibles rendements sur les sites de la façade ouest, ce qui rend la culture du blé fréquemment non rentable, même si physiologiquement faisable, dans le PR. Or le changement climatique tend à lever cette contrainte.

Le tableau 1 donne les projections* du rendement pour le FP et le FL, site par site avec leur niveau de significativité. En moyenne, on constate une augmentation significative de rendement de l'ordre de 0,9 à 1 t/ha dans le FP et le FL respectivement, en raison de l'effet de l'accroissement du CO_2.

	FP-PR	FL-PR
Avignon	ns	ns
Bordeaux	ns	*0.9*
Clermont	ns	ns
Colmar	*1.1*	*1.7*
Dijon	ns	*1.5*
Lusignan	ns	ns
Mirecourt	**1.9**	1.3
Mons	*1.0*	*1.0*
Rennes	ns	ns
Saint-Étienne	**2.4**	**2.6**
Toulouse	1.3	*1.5*
Versailles	**0.9**	*0.8*
Tous sites	**0.9**	**1.0**

Tableau 1 : *évolution des rendements de blé simulé par CERES (sol 1, climat : TT). La significativité de l'évolution par rapport à la variabilité interannuelle est notée de la façon suivante :* **Gras** *: $p < 0.01$; Italique : $p < 0.05$;* Normal *: $p < 0.10$; ns : non significatif.*

La réponse reste néanmoins très variable entre sites. Ainsi, aucun changement significatif de rendement n'est prévu pour la moitié des sites, dans le futur proche (Avignon, Bordeaux, Dijon, Clermont, Lusignan et Rennes) et pour un tiers des sites dans le futur lointain (Avignon, Clermont, Lusignan et Rennes). Pour les autres sites, l'augmentation de rendement est significative à très significative et varie de 0,9 t/ha (Versailles) à 2,4 t/ha (Saint-Étienne) dans le futur proche et de 0,8 t/ha à 2,6 t/ha dans deux tiers des cas dans le futur lointain.

Si maintenant on examine les composantes du rendement (fig. 3), on note que la variabilité du rendement est expliquée à 70 % et 55 % par le nombre de grains (NG/m^2) pour les variétés précoce et tardive respectivement. Dans les deux cas et pour la majeure partie des sites, on constate une augmentation du NG/m^2 avec le changement climatique. Ce résultat suggère que les stress hydriques ou thermiques provoqués par le changement climatique ne sont pas déterminants pendant la phase préfloraison où s'élabore cette composante, ce qui s'explique par l'anticipation* des stades limitant partiellement l'occurrence de stress (cf. fiche TIMING). En revanche, les sites se différencient en matière de remplissage du grain : pour un même nombre de grains, on peut trouver des différences de poids de mille grains (PMG) allant jusqu'à 20 %. Le remplissage du grain est davantage affecté par les stress hydriques et thermiques de fin de cycle pour la variété tardive, mais la durée de remplissage plus longue combinée à l'augmentation du CO_2 tamponne ces effets. C'est ce que soulignent les évolutions conjointes de PMG et NG/m^2 des deux variétés qui montrent une baisse du PMG plus forte pour la variété tardive pour un même NG/m^2. Il reste cependant notable que les réponses au changement climatique sont très dépendantes du site : par exemple, à Avignon, NG/m^2 et PMG sont toujours limitants, mais augmentent avec le changement climatique alors qu'à l'inverse, à Mirecourt et Mons, le potentiel climatique à la montaison s'améliorant, il permet la mise en place d'un NG/m^2 élevé pour le FL, bien que les conditions de remplissage limitent l'accès à un PMG maximal.

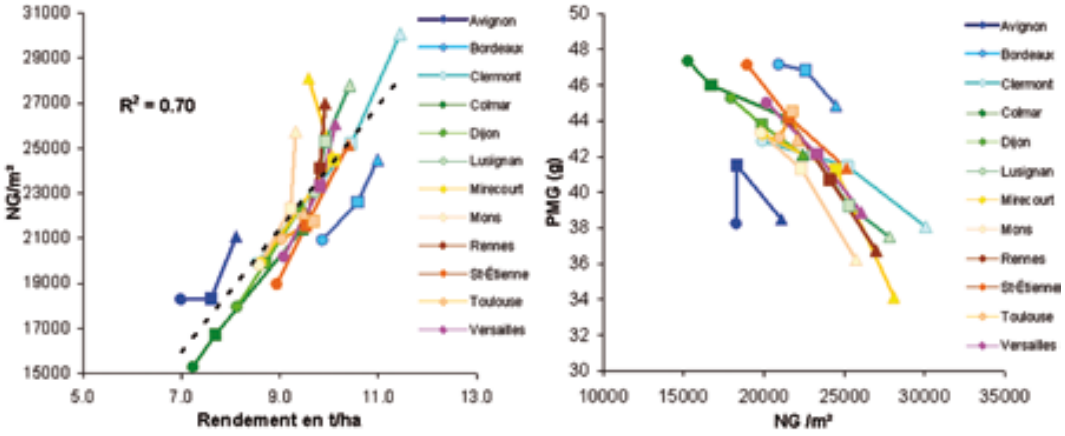


Figure 3 : élaboration du rendement dans le cas de la variété précoce (type Soissons). À gauche, relation entre rendement et NG/m² et à droite relation entre composantes pour tous les sites. ● : PR, ■ FP, ▲ FL.

Impacts sur la durée du cycle, la date de floraison et stress associés

La figure 4 illustre, pour le site de Mons, l'impact du changement climatique sur la phénologie d'une variété de type précoce (modèle PANORAMIX) et ses conséquences sur l'occurrence de stress à des phases critiques du cycle du blé : risques de gel début montaison, déficit hydrique courant montaison et remplissage des grains et, enfin, fortes températures (>25 °C en moyenne) autour de la floraison et au cours du remplissage.

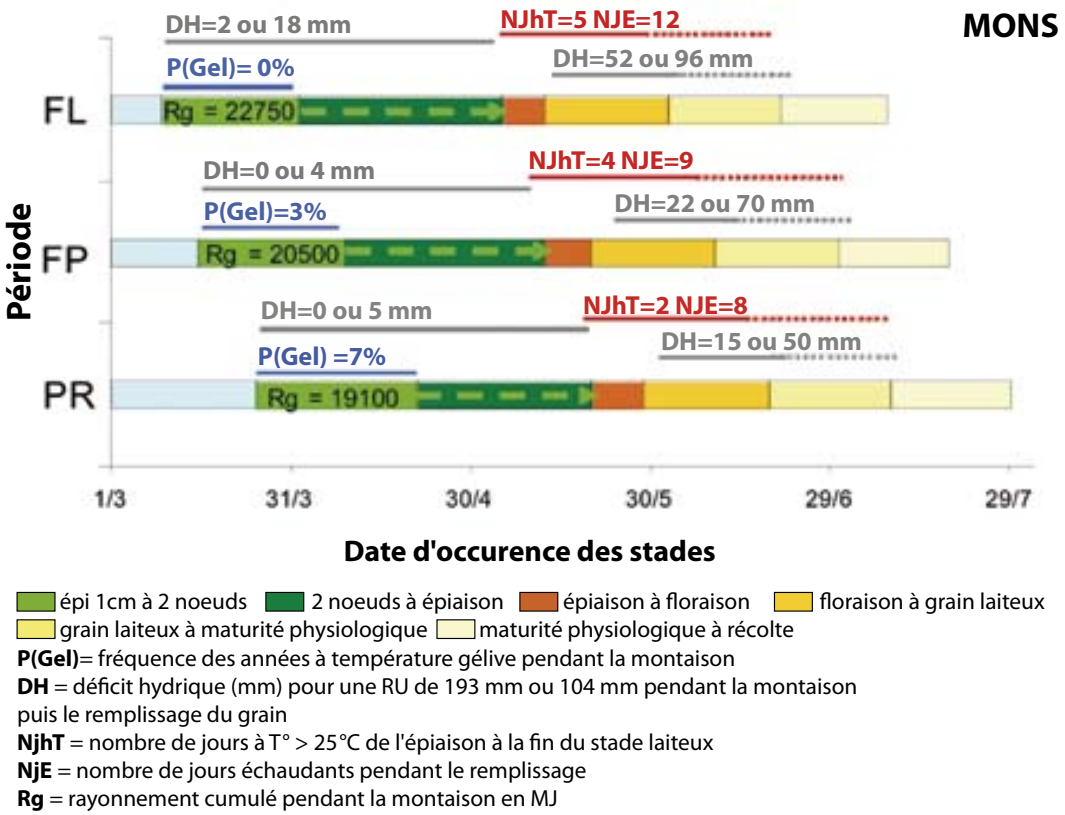


Figure 4 : modifications de la phénologie d'un blé type Soissons avec le changement climatique et risques climatiques associés pour le site de Mons (PANORAMIX, type de temps, sol 1 commun, date de semis).

En raison du réchauffement, la floraison est avancée à Mons de 9 et 17 jours dans les futurs proche et lointain et le cycle est globalement raccourci de 10 et 20 jours. Ces tendances sont les mêmes pour tous les sites avec des décalages phénologiques généralement plus importants pour les sites Nord que pour les sites Sud (cf. fiche TIMING). Notons que, pour le blé, l'effet « anticipation » est plus important que l'effet « raccourcissement du remplissage», ce qui modère la pénalisation du rendement. Cependant, ces « simples » décalages phénologiques s'accompagnent aussi d'une augmentation de l'occurrence de stress en fin de cycle : doublement des jours à fortes températures autour de la floraison, impactant le NG/m^2 potentiel mis en place en préfloraison (par ailleurs accru en raison de l'amélioration des conditions de croissance courant montaison), augmentation de 50 à 100 % du nombre de jours échaudants pendant le remplissage et enfin doublement ou plus du déficit hydrique au cours du remplissage dans le futur lointain, atteignant 40 à 100 mm selon le type de sol. Cela reste cohérent avec les diminutions de PMG simulées dans les futurs proche et lointain. Le déficit hydrique pendant la montaison augmente également pour atteindre dans le futur lointain des valeurs significatives (jusqu'à 18 mm en sol à faible RU*). Ces augmentations du déficit hydrique en moyenne s'accompagnent également de fortes augmentations des valeurs extrêmes.

Enfin, le changement climatique n'est pas uniquement synonyme de détérioration des conditions de production du blé. En effet, outre l'augmentation du CO_2 qui, d'après les modèles, devrait compenser les effets de raccourcissement des cycles, la fréquence de gel d'épis diminue ou stagne tandis que le rayonnement incident pendant la montaison tend à augmenter. Ce sont ces facteurs qui expliquent l'augmentation du NG/m^2 explicitée précédemment. Notons également la diminution des contraintes d'excès d'eau.

Le confort hydrique* du blé

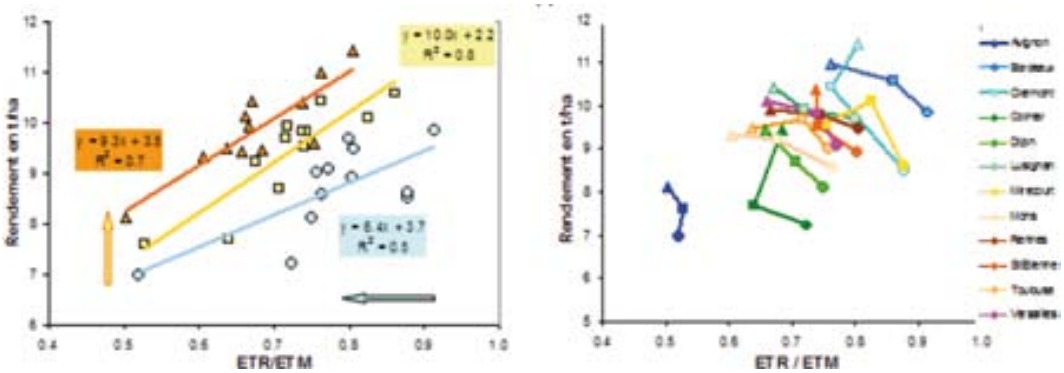


***Figure 5** : réponse du rendement (a : gauche) du blé tendre à la variation de confort hydrique générée par le changement climatique et variabilité liée au site (b : droite) ● : PR*, ■ : FP*, ▲ : FL*.*

Malgré l'anticipation des stades, la diminution de la pluviométrie provoque une détérioration du confort hydrique (cf. fiche EAU) qui est symbolisée par la flèche bleue de la figure 5a représentant l'évolution de l'indicateur ETR/ETM* pour la plupart des sites et la variété précoce Soissons. De plus, la pente des relations de la figure 5a indique que le rendement répondra d'avantage à ce critère à l'avenir : on calcule que 60 à 80 % de la variabilité des rendements entre sites est reliée au confort hydrique. Par contre, notons cet effet positif : à même niveau de confort hydrique, le rendement augmente dans le FP et plus encore dans le FL, à cause de l'effet bénéfique du CO_2. Quoique moins marquée, on observe la même chose pour la variété tardive. Prenons garde toutefois à moduler ces conclusions, car il existe une forte interaction de l'effet du confort hydrique et de la période avec le site (fig. 5b) : si la majeure partie des sites voit le confort hydrique du blé diminuer avec le changement climatique, il peut rester stable (Avignon) ou bien retrouver sa valeur de référence dans le futur lointain après une diminution dans le futur proche (Colmar, Clermont, Saint-Étienne). Ce dernier effet s'explique par l'effet antitranspirant du CO_2.

Les maladies du blé

Actuellement, les deux principales maladies foliaires du blé en fréquence et en nuisibilité (cf. fiche SANTÉ), la septoriose, prépondérante dans le nord du Bassin parisien et la façade atlantique, et la rouille brune, maladie explosive dans le Sud, Sud-Ouest, sont responsables d'importantes pertes de rendements. Une baisse de nuisibilité, de 20 % et 15 % en moyenne dans le cas de la septoriose et de la rouille brune respectivement, est simulée pour le FL. Quoique ayant des biologies très différentes, la diminution de l'impact de ces deux maladies est liée à la baisse de pluviométrie et du confort hydrique de la culture et, bien sûr, à l'augmentation des rendements à fort CO_2.

Ces effets résultent de deux processus au comportement contradictoire dans le cadre du changement climatique. D'une part, la constitution de l'inoculum primaire semble favorisée dans le FP et FL par la diminution de fréquence des gels hivernaux (cf. fiche SANTÉ) pour la septoriose, et c'est probablement le cas également pour la rouille brune. D'autre part, le nombre de jours d'infection et la sévérité maximale de la rouille ont tendance à diminuer dans le FL particulièrement. La septoriose se développe à des stades phénologiques plus tardifs, aboutissant globalement à une nuisibilité réduite. Signalons, toutefois, que l'adaptation des champignons phytopathogènes au changement climatique n'est pas prise en compte et les risques encourus probablement minimisés.

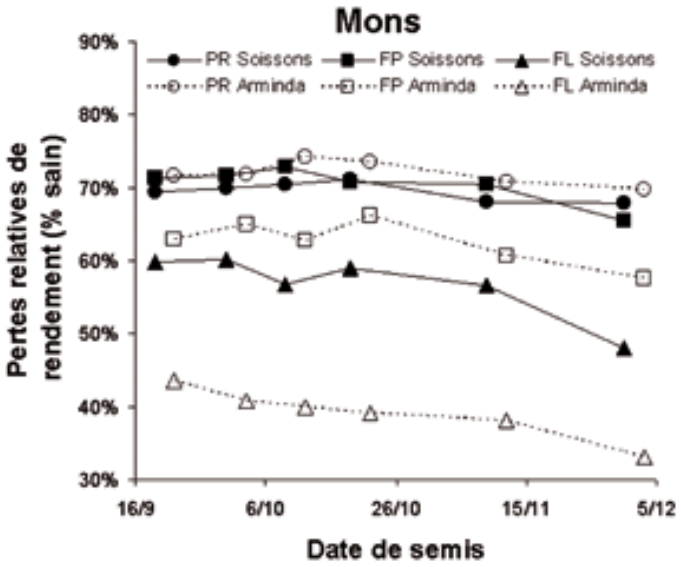


Figure 6 *: évolution de la nuisibilité relative de la rouille brune (pertes de rendement en % du rendement sain ; CERES) avec la variété, la date de semis et les périodes d'intérêt (PR, FP, FL).*

Le choix variétal croisé avec celui de la date de semis est également un moyen de limiter les dégâts liés aux maladies. Ainsi, la figure 6 montre l'avantage des variétés tardives pour limiter la nuisibilité relative, tout particulièrement dans le FL ; de même, et en cohérence avec les observations actuelles, les dates de semis tardives limitent la nuisibilité relative. Ces données suggèrent l'existence de leviers pour limiter les pertes futures, y compris si les populations de pathogènes s'adaptent. De même, comme la date de semis d'une part affecte le rendement potentiel (fig. 8) et d'autre part diminue la nuisibilité, un optimum par site devra être recherché.

Et le blé dur ?

Moins présent que le blé tendre, le blé dur ne représente que 1,4 % de la SAU française et sa localisation concerne pour près de 80 % les régions Sud-Est et Sud-Ouest (fig. 1). Le rendement moyen est de 4,7 t/ha avec un rendement maximum de 6,2 t/ha en Centre-Nord et minimal de 3,2 t/ha dans le Sud-Est. Le débouché principal du blé dur est l'alimentation humaine (semoulerie, pâtes) avec 65 % exportés. Les exigences qualitatives (technologiques et sanitaires) sont de plus en plus strictes à l'exportation, en particulier vers l'Afrique du Nord. On constate néanmoins un maintien des surfaces et de la production françaises. L'augmentation d'une production de qualité reste un souci majeur de la filière. En particulier, le choix variétal est primordial dans la lutte contre les maladies fongiques.

Comparativement au blé tendre d'hiver, le blé dur a des besoins moindres en vernalisation, ce qui le rend moins sensible aux élévations de températures hivernales. Par contre, le gel de plantes se fait à des températures plus élevées (–16 °C). Si le blé dur montre une plus forte sensibilité aux fortes températures (échaudage thermique) que le blé tendre, sa durée de remplissage du grain plus réduite lui offre des possibilités plus importantes d'esquive*. Il montre une tolérance supérieure au déficit hydrique, en raison d'une fermeture stomatique à des potentiels hydriques plus bas que le blé tendre, une capacité à extraire l'eau du sol en deçà du point de flétrissement permanent et également du fait d'un indice foliaire plus faible compensé par une capacité à réaliser une photosynthèse nette au niveau de l'épi. Ces propriétés expliquent son aire de culture dans le sud de la France.

Comparaison des évolutions de rendement du blé tendre et du blé dur dans le cas de la succession TBSB.

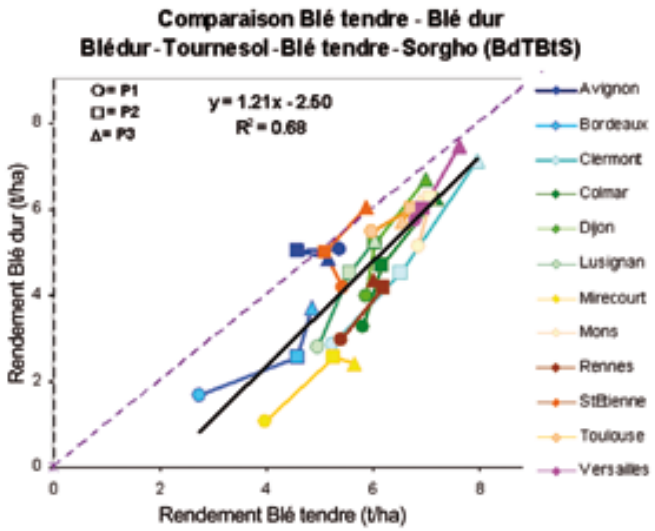


***Figure 7** : comparaison des évolutions de rendement du blé dur (Acalou) à celui du blé tendre (Soissons) dans la succession Blé dur-Tournesol-Blé tendre-Sorgho avec le modèle STICS.*

On constate la même tendance à l'augmentation des rendements avec le changement climatique pour les deux espèces. La figure 7 compare par site les évolutions respectives du rendement du blé dur (var. Acalou) et du blé tendre (var. Soissons). Bien que, de manière générale, le rendement du blé dur reste inférieur à celui du blé tendre, on constate que pour certains sites les deux cultures tendent à se rapprocher dans le FL. Ainsi, le changement climatique semble bénéficier davantage en moyenne au blé dur qu'au blé tendre (attesté par la pente de la régression supérieure à 1), ce qui est cohérent avec leurs réponses physiologiques respectives aux contraintes hydrique et thermique. De cycle plus court et en particulier pour la phase de remplissage du grain, l'évitement de fortes températures estivales sera accentué chez le blé dur. Son indice foliaire* plus faible et sa meilleure capacité d'extraction de l'eau du sol lui permettront de satisfaire plus facilement ses besoins en eau.

E Adaptation des variétés et des pratiques face au changement climatique

La réponse variétale, par le positionnement du cycle vis-à-vis des contraintes climatiques, est un levier majeur d'adaptation des itinéraires techniques* au changement climatique. La date de semis en interaction avec la variété en est un deuxième facilement mobilisable, sous réserve de la faisabilité du travail du sol et du semis (cf. fiche TIMING).

Pour chaque période, on observe un avantage significatif des semis les plus précoces, allant de 5 % à 25 % selon les sites pour la période actuelle, ce qui est dans la gamme des variations classiquement observées. La figure 8a montre un exemple de réponse des rendements à la date de semis en % du rendement calculé pour la période actuelle et la date de semis la plus précoce. Le rendement diminue avec le retard de la date de semis, d'autant plus que la variété est précoce. Cet effet est plus que compensé dans le FP et le FL par l'anticipation des stades et l'augmentation du CO_2, des dates de semis du 20 septembre au 10 novembre. Par contre, le semis du 1er décembre conduit à des rendements inférieurs ou égaux à ceux calculés pour PR avec la même date de semis. Dans les indicateurs de stress précédemment montrés (fig. 4), le déficit hydrique courant montaison augmente de manière particulièrement importante au-delà de 18 mm en FL et pour les dernières dates de semis, et avec une variabilité qui diminue de moitié (fig. 8b).

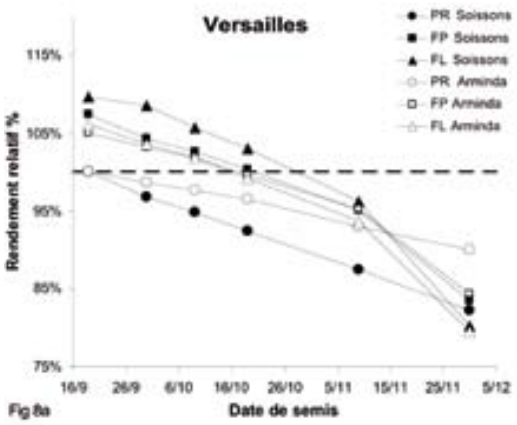


Figure 8a : effet de la date de semis sur l'évolution du rendement relatif du blé avec le changement climatique pour le site de Versailles (CERES, sol 1, climat TT).

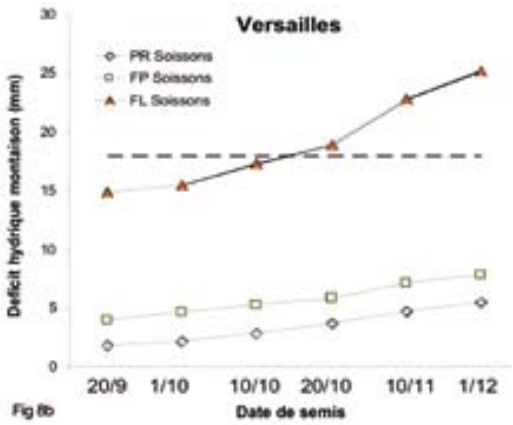


Figure 8b : effet de la date de semis sur l'évolution du déficit hydrique du blé courant montaison avec le changement climatique pour le site de Versailles (PANORAMIX, sol 1, climat TT).

Les mêmes évolutions avec le changement climatique et la date de semis sont trouvées pour les autres sites, mais avec des amplitudes très variables entre sites : faible amplitude pour les sites de Bordeaux, Lusignan, Mons, Rennes et Toulouse, amplitude similaire à Versailles pour Mirecourt, Saint-Étienne et Dijon, et enfin amplitude forte pour Avignon, Clermont et Colmar. Enfin, une étude menée indépendamment sur l'optimisation des conditions de levée a montré, sur les sites de Colmar et Toulouse, qu'un semis trop précoce pénaliserait l'installation du peuplement à cause des conditions de plus en plus sèches en début d'automne. Tout cela suggère qu'une fenêtre de variété x date de semis pourra être déterminée par site, permettant d'éviter les stress précoce (levée) et tardif (remplissage) en assurant un niveau de rendement supérieur ou égal à l'actuel.

La comparaison des différents systèmes de culture impliquant le blé (fig. 9) ne fait pas apparaître de différence significative entre les systèmes. Rappelons toutefois que, ces simulations ne prenant pas en compte les contraintes de nature biotique, le rendement de la monoculture de blé est sans doute surestimé.

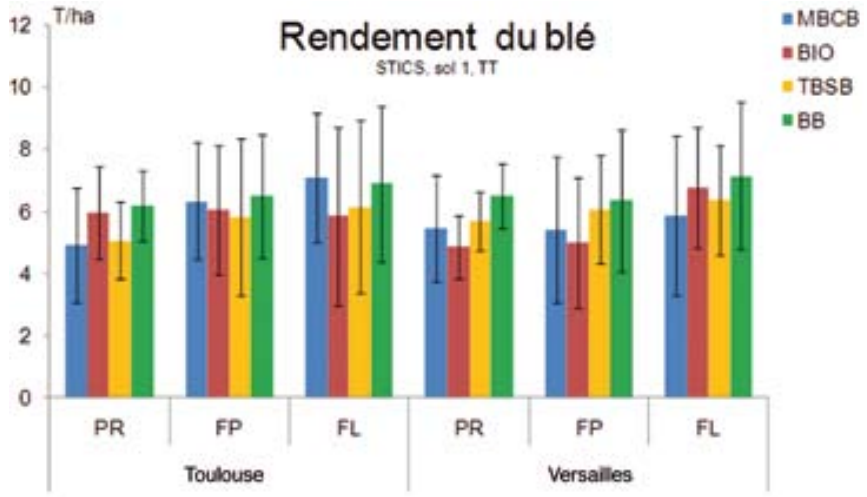


Figure 9 *: comparaison des divers systèmes de culture en matière de rendement du blé à Toulouse et Versailles.*

On retrouve sur la figure 9 l'augmentation de variabilité qui accompagne l'augmentation des rendements du futur. On constate par ailleurs que l'irrigation d'appoint du système MBCB, mal valorisée pour le PR, sera nettement plus intéressante dans le futur, la contrainte hydrique devenant aussi importante, sinon plus, que la contrainte azotée. Cette dernière varie avec le type de fertilisation (organique ou minérale), mais aussi avec le précédent (légumineuse, durée d'interculture). On note que le blé « bio » n'est pas défavorisé par le changement climatique (cf. fiche AGRICULTURE BIOLOGIQUE).

F Incertitudes associées aux simulations réalisées

La fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS analyse l'origine des variations de rendements chez le blé. En voici les principales conclusions.

Au niveau du climat, la variabilité induite par les modèles de circulation générale est du même ordre que la variabilité induite par les méthodes de régionalisation* pour un même scénario SRES : ces méthodes diffèrent surtout dans leur prévision de la variabilité du climat futur, ce qui impacte assez fortement le rendement dont la simulation repose sur un grand nombre de phénomènes à seuil ou discrets, dont, en particulier, l'occurrence des stades.

La deuxième source d'incertitudes vient des différents formalismes utilisés dans les modèles de culture. Dans le cas du blé, les modèles dynamiques de culture STICS et CERES, s'ils diffèrent quantitativement sur les variables de sortie* (rendement, etc.), prédisent les mêmes évolutions en quantité et en variabilité. Par contre, le modèle statique PANORAMIX, quoique fondé sur des variables diagnostiques intégrant l'effet du climat, ne rend compte ni de la même évolution, ni de la même variabilité (cf. fiches RENDEMENT et MODÈLES). Ajoutons qu'au-delà de l'approche de modélisation, la non-prise en compte de certains processus (le bilan azoté pour PANORAMIX, l'excès d'eau pour CERES et PANORAMIX) explique une partie des différences de comportement respectif des modèles.

La variabilité générée par les options de simulation constitue la troisième source d'incertitudes. Des trois modalités analysées à Toulouse et Colmar (échaudage ou non, CO_2 ou non, photosynthèse calculée par un modèle mécaniste [Farquhar] ou un modèle plus empirique), seul le CO_2 a une conséquence quantitative sur les sorties du modèle. Ce résultat nous a conduits à inclure systématiquement dans tous les modèles l'effet du CO_2 sur les rendements (cf. fiche MODÈLES). Cependant, il est probable que le choix de la variété précoce a eu tendance à minimiser l'échaudage.

Enfin, la variabilité générée par différentes pratiques est analysée et comparée au changement climatique dans le cas de deux modèles de culture (CERES et PANORAMIX) pour le FP (faible impact du CO_2). De façon globale, la variabilité du rendement calculée par CERES est de l'ordre de 1,5 fois celle calculée par PANORAMIX. Cela est lié à la prise en compte du gel d'épis et de l'alimentation azotée dans CERES et explique pourquoi la variabilité interannuelle constitue la moitié de la variabilité totale pour ce modèle. Selon PANORAMIX, les effets du site, de la variété,

du sol et de la date de semis sont tous plus importants que celui du changement climatique. Selon CERES, seul l'effet du sol dépasse l'impact du changement climatique. Malgré cette grande différence entre les modèles, nos résultats suggèrent que le choix des sols et le choix variétal en combinaison avec la date de semis sont des moyens pour au moins limiter les risques induits par le changement climatique.

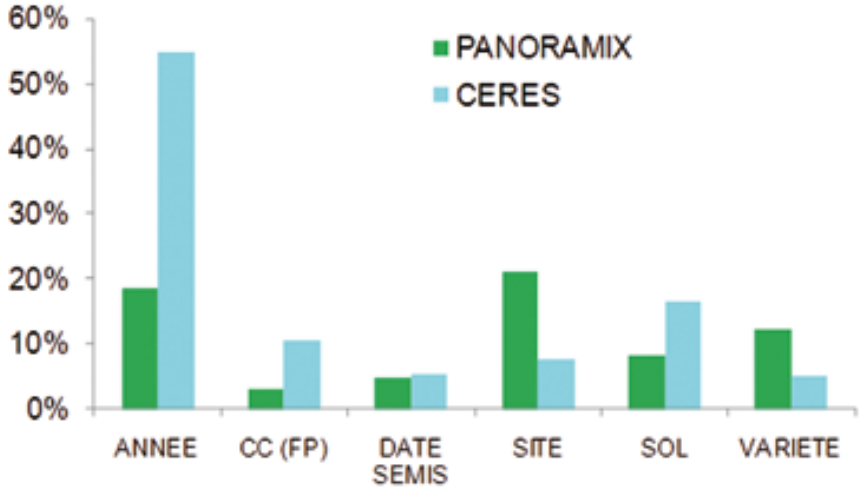


***Figure 10** : proportion de la variance du rendement du blé attribuée à diverses sources de variabilité selon le modèle.*

Ce qu'il faut retenir

- ✓ Pour le blé, culture à cycle long, moyennement sensible au stress hydrique estival, l'augmentation de température permet une anticipation des stades et un raccourcissement du cycle qui limitent un certain nombre de stress : gel d'épis, stress hydrique pendant la montaison en sol profond, montaison raccourcie sans affecter le rayonnement disponible. Cet ensemble d'avantages permet, en tendance, une augmentation du nombre de grains pour un grand nombre de sites. De plus, les maladies fongiques tendent à diminuer dans le futur proche et lointain (cf. fiche SANTÉ). En effet, la diminution globale des pluies et des durées d'humectation va dans le sens d'une diminution du potentiel d'infection et de la dispersion des principales maladies actuelles, et ce malgré l'augmentation de température. Couplée à la diminution des excès d'eau hivernaux, cette amélioration sanitaire potentielle rend envisageable la culture du blé de façon plus systématique sur la façade atlantique.
- ✓ Cependant, si l'avancée des stades dans l'année permet un certain évitement des stress tardifs lors du remplissage des grains, le confort hydrique de la culture diminue avec le changement climatique et les risques d'échaudage augmentent dans les zones septentrionales. Si ces effets néfastes du climat futur sont souvent compensés par l'augmentation du CO_2, l'augmentation de la variabilité interannuelle invite plutôt à la prudence et à la recherche de solutions alternatives. Parmi celles-ci, signalons la possibilité d'amplifier le phénomène d'évitement par l'avancée des semis ou le choix de variétés précoces, sous réserve que l'implantation se réalise en condition d'humidité du sol suffisante pour permettre une germination rapide et une bonne installation du peuplement. Le risque de gel d'épis constitue une autre limite à la précocification ou à l'implantation du blé en altitude.
- ✓ Enfin, le nombre de jours disponibles* pour réaliser l'implantation de la culture s'accroît dans les différentes régions avec le changement climatique, ce qui suggère une plus grande souplesse de gestion des successions. moyen des blés en protéines ; là encore, l'aspect régional et la répartition spatiale ne pourront être réellement abordés qu'en prenant en compte la variabilité des sols entre régions et en adaptant les pratiques au potentiel de rendement local. Enfin, une meilleure connaissance des mécanismes d'adaptation physiologique au changement climatique, tant du point de vue de la plante que de celui des antagonistes ou auxiliaires (telluriques et aériens), serait également nécessaire pour se projeter de manière plus réaliste dans le futur.

Ce qu'il faut approndir…

- ✓ Le projet CLIMATOR a permis d'aborder sous diverses facettes l'effet potentiel du changement climatique sur l'évolution des cultures. Outre les incertitudes associées aux modèles, déjà évoquées ci-dessus, nombre d'incertitudes proviennent de la méconnaissance des mécanismes écophysiologiques nécessaires pour comprendre les effets du changement climatique. Par exemple, les lois d'actions quantitatives des évènements extrêmes (hautes températures) sont souvent mal connues et confondues avec des stress trophiques. De même, l'occurrence des pluies et leur variabilité temporelle ont une incidence par effets seuils sur le risque pathologique, d'une part, et sur l'efficacité des différentes pratiques, d'autre part (efficience des apports azotés, entre autres).
- ✓ Le choix de pratiques prescrites et de sols standardisés pour toutes les régions ne permet pas d'aborder vraiment l'élaboration de la qualité des blés dans le futur, alors que l'augmentation de rendement prédite pourrait s'accompagner d'un appauvrissement moyen des blés en protéines ; là encore, l'aspect régional et la répartition spatiale ne pourront être réellement abordés qu'en prenant en compte la variabilité des sols entre régions et en adaptant les pratiques au potentiel de rendement local.
- ✓ Enfin, une meilleure connaissance des mécanismes d'adaptation physiologique au changement climatique, tant du point de vue de la plante que de celui des antagonistes ou auxiliaires (telluriques et aériens), serait également nécessaire pour se projeter de manière plus réaliste dans le futur.

Pour en savoir plus…

Brisson N., Mary B. , Ripoche D., Jeuffroy M.-H., Ruget F., Nicoullaud B., Gate P., Devienne-Barret F., Antonioletti R., Durr C., Richard G., Beaudoin N., Recous S., Tayot X., Plenet D., Cellier P., Machet J.-M., Meynard J.-M. and Delécolle R. , 1998 - STICS: a generic model for the simulation of crops and their water and nitrogen balances. I. Theory and parameterization applied to wheat and corn. *Agronomie 18*, Number 5-6, 311 – 346.

Brisson N., Gate P., Gouache D., Charmet G., Oury F.-X., Huard F., 2009 - Why are wheat yields stagnating in Europe? *Field. Crop. Res.*, submitted.

Gate P., 1995 - Analysis of a large set of results from France. *L'écophysiologie du blé*. Eds ITCF.

Gate P., Blondlot A., Gouache D., et al, 2008 - Impacts of climate change on wheat growth in France. What solutions and actions to undertake? *OCL - Oléagineux, Corps Gras, Lipides* 15(5), 332-336.

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

C3
Maïs Sorgho

Nadine Brisson

A Quelques éléments clés sur la culture du maïs et du sorgho en France

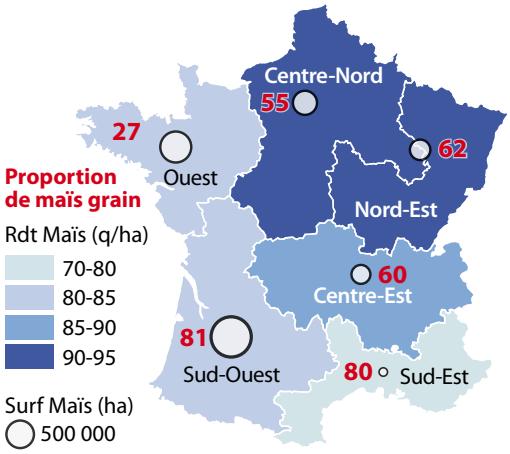


***Figure 1** : rendements et surfaces emblavées en maïs dans les régions CLIMATOR. Moyennes 2000-2007. Source Agreste.*

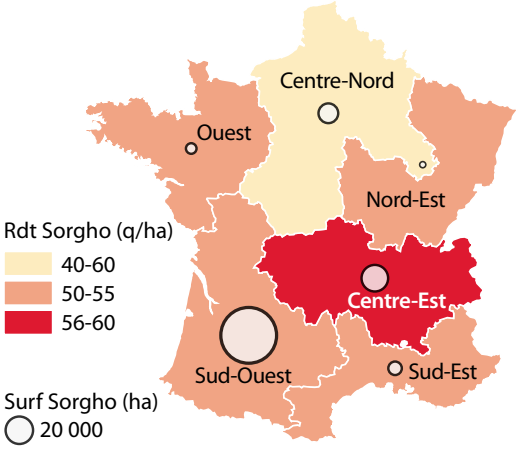


***Figure 2** : rendements et surfaces emblavées en sorgho dans les régions CLIMATOR. Moyennes 2000-2007. Source Agreste.*

L'importance du maïs en France (3,1 millions d'hectares si on cumule grain et ensilage, soit plus de 10 % de la SAU) reflète son importance à l'échelle mondiale puisque, avec le blé et le riz, il arrive en tête des plantes les plus cultivées dans le monde. En France, le maïs est la seconde production végétale après le blé tendre.

Il n'est pas exagéré de dire que le maïs est à l'origine d'une véritable révolution agricole qui s'est produite pendant la seconde moitié du XXe siècle : augmentation des surfaces, diversification des débouchés, progrès génétique et stimulation des échanges économiques de produits agricoles. Le maïs grain représente un peu plus de 55 % des surfaces emblavées en maïs et 40 % se situent dans le Sud-Ouest. Après avoir chuté de l'ordre de 10 % entre 2004 et 2008, les surfaces en maïs sont à la hausse. Les principaux débouchés du maïs grain sont l'alimentation animale (de l'ordre de 30 %) et l'exportation (autour de 40 %, mais très variable en fonction de l'année climatique). Viennent ensuite l'autoconsommation à la ferme et la semoulerie ; l'utilisation énergétique du maïs (production de bioéthanol) est encore actuellement très modeste.

Depuis la sécheresse de 2003, le maïs est montré du doigt comme la culture la plus consommatrice en eau : qu'en est-il exactement ? 40 % et 7 % des surfaces, respectivement en maïs grain et maïs ensilage, sont irriguées et la sole irriguée est consacrée à 50 % au maïs. Cependant, depuis quelques années, les surfaces de maïs irriguées subissent d'importantes variations : diminution de l'ordre de 15 % entre 2004 et 2006, suivie d'une augmentation de l'ordre de 14 % entre 2006 et 2008. Mais n'oublions pas que la totalité de la sole irriguée française ne représente qu'environ 6 % de la SAU.

Face à ce géant des cultures de printemps, le sorgho grain fait figure de culture modeste avec en 2009 56 000 hectares en grain et 13 500 hectares en fourrage, principalement situés dans le Sud-Ouest et le Centre-Est, dont seulement 25 % sont irrigués. Si actuellement l'alimentation animale en grains constitue son principal débouché, il possède potentiellement des atouts comparables à ceux du maïs pour l'ensilage (sa valeur énergétique étant celle d'un maïs de qualité moyenne et sa valeur azotée légèrement supérieure à celle du maïs), la production de bioéthanol et de

biomasse. Par contre, les efforts d'amélioration génétique du sorgho sont beaucoup moins importants que ceux du maïs.

Le maïs grain est majoritairement cultivé en monoculture : à l'échelle de l'ensemble du territoire, la moitié de la sole maïs est en monoculture, mais, dans les principaux départements producteurs, ce chiffre s'élève de 70 à 90 %. À l'inverse, le sorgho est cultivé dans le cadre de rotations céréalières et souvent sur des sols à moindre réserve hydrique que le maïs. Les conditions de culture du sorgho, plus rustiques que celles du maïs, expliquent en grande partie la moindre productivité de la culture : 60 q/ha contre 90 q/ha (exprimée à la teneur en eau de référence) pour le maïs en moyenne nationale.

B Protocole de simulation de CLIMATOR

Les deux cultures sont simulées avec le modèle STICS. La culture de maïs est simulée 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 (ou ETM*), alors que la culture de sorgho est simulée dans le cadre d'une rotation pluviale.

Sites	12 sites métropolitains dont un site d'altitude
Systèmes	3 systèmes : monoculture de maïs (MI), rotation maïs-blé tendre-colza-blé dur (MBCB), rotation tournesol-blé tendre-sorgho-blé dur (TBSB)
Conduite	Maïs : irrigation à 80 % des besoins, 200 kg N ha^{-1} en 2 apports, incorporation des chaumes Sorgho : pluviale, 120 kg N ha^{-1} en 2 apports, incorporation des pailles Commun aux deux cultures : semis le 10/04, doit être récolté avant le 01/10 en rotation
Sols	Sol 1 : sol de limon profond à réserve utile* élevée (226 mm) et fertilité moyenne Sol 2 : rendzine à faible réserve utile (104 mm) et faible fertilité Sol 3 : sol lessivé hydromorphe à forte réserve utile (317 mm) et fertilité élevée
Variété	Maïs : Méribel (cycle court) et DKC5783 (cycle long) Sorgho : Friggo (cycle court) et Fulgus (cycle long)
Modèle	STICS
Climat	SRES : A1B*, ARPÈGE, méthodes de régionalisation* : TT*, QQ* et ANO*

Quelques essais ponctuels ont également été réalisés ; ils concernent les sites de Colmar et Toulouse :

- calcul des dates de semis de façon à optimiser la croissance de la plantule (température suffisante, absence de gelées, teneur en eau du sol ni trop humide, ni trop sèche) ;
- simulation de sorgho irrigué.

C Cartes d'identité écophysiologique du maïs et du sorgho dans le contexte du changement climatique

Ce qui les rapproche

Maïs et sorgho sont des plantes au métabolisme en C4, ce qui freine la valorisation du CO_2 atmosphérique en termes à la fois de photosynthèse et de fermeture stomatique par rapport aux plantes en C3, comme le blé, le tournesol ou le colza. Par ailleurs, leur cycle d'été, très similaire, est uniquement piloté par la température, ce qui les rend très sensibles au raccourcissement de

la durée de leurs phases induit par le réchauffement. Pour les mêmes raisons, on peut cependant fonder quelques espoirs sur l'anticipation des semis et l'esquive* face au déficit hydrique.

Ce qui les différencie

Le sorgho présente d'indéniables atouts d'adaptation à la sécheresse, tant au niveau de son système racinaire, plus profond que celui du maïs, que de son feuillage moins exubérant. Cependant, grâce à une importante antériorité d'amélioration variétale, le maïs conserve l'avantage en termes de productivité potentielle.

D Impacts du changement climatique sur les cultures de maïs et de sorgho, leur fonctionnement et leur conduite

Dans leur contexte de production actuelle, que nous tentons de reproduire par une monoculture de maïs irriguée et une culture pluviale de sorgho en rotation, les niveaux de rendement* des deux cultures sont très différents et difficilement comparables. Cependant, compte tenu des utilisations potentielles du sorgho équivalant à celles du maïs, un regard parallèle sur le comportement des deux cultures face au changement climatique* nous semble indispensable pour envisager toutes les composantes de l'adaptation.

Niveaux de production

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 (tab. 1). Cette diminution de l'ordre de 0,5 à 1 t.ha^{-1} dans le futur proche (FP*) pourra dépasser les 1,5 t.ha^{-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 fraîches (Mirecourt, Mons, Clermont-Theix).

	FP		FL	
Sites	Maïs	Sorgho	Maïs	Sorgho
Avignon	**-1.0**	ns	**-1.5**	ns
Bordeaux	**-0.9**	**-0.8**	**-1.5**	0.6
Clermont	**2.3**	ns	**8.2**	**6.3**
Colmar	**-0.8**	ns	**-1.3**	ns
Dijon	*-0.3*	ns	**-0.8**	0.7
Lusignan	**-0.6**	-0.7	**-1.1**	ns
Mirecourt	**4.2**	**5.8**	**3.4**	**5.7**
Mons	**3.2**	**4.2**	**2.5**	**4.7**
Rennes	ns	**2.2**	ns	**4.0**
Saint-Étienne	**-1.2**	ns	**-1.6**	ns
Toulouse	**-1.0**	-0.7	**-1.8**	-1.2
Versailles	**1.3**	**2.6**	**0.8**	**3.8**

Tableau 1 : *évolution des rendements (en t.ha^{-1}) de maïs et de sorgho dans le cadre de leur conduite actuelle (irrigation du maïs en monoculture, sorgho en pluvial dans une rotation céréalière, variétés à cycle long à Toulouse, Bordeaux et Avignon, et court ailleurs). La significativité de l'évolution par rapport à la variabilité interannuelle est notée de la façon suivante :* **Gras** *(p < 0.01), Italique (p < 0,05),* Normal *(p < 0,10), ns (non significatif).*

Au sujet du 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 fraîches apparaissent comme de futures zones d'accueil de la culture du sorgho.

La figure 3 montre que, malgré ce meilleur comportement du sorgho, le maïs garde l'avantage en termes de rendement, en particulier pour les sites* à faible pluviométrie estivale comme Toulouse. Cependant, on voit la différence entre les deux cultures diminuer, ce qui rend pertinent une amélioration des conditions de culture du sorgho.

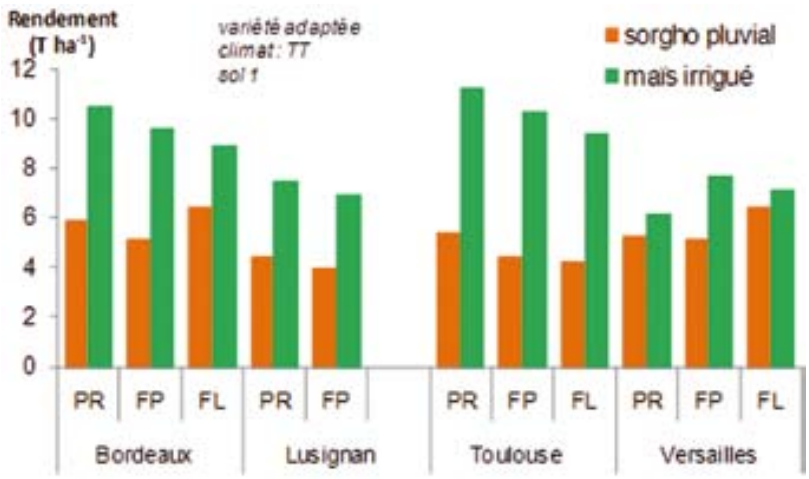


Figure 3 *: comparaison de l'évolution des rendements moyens du maïs irrigué et du sorgho pluvial, lorsqu'elle est significative (cf. tab. 1).*

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 de juin, juillet et août, c'est-à-dire les mois les plus chauds de l'année. Par conséquent, la durée de remplissage des grains sera, elle aussi, raccourcie, anticipant encore davantage la récolte et provoquant la baisse de rendement du maïs irrigué. L'anticipation de la récolte sera bien plus importante dans le Nord avec, par exemple pour la monoculture de maïs, une récolte plus précoce d'un mois dans le FP et un mois et demi dans le FL à Versailles, Colmar, Dijon, Lusignan, Mons et Rennes, alors que, dans le Sud, la récolte du maïs ne sera avancée que de quinze jours dans le FP et un mois dans le FL. Le sorgho subit également cette anticipation, mais avec l'amplification due à la sécheresse (augmentation de la température de culture, rapidité de la phase de dessiccation du grain), de sorte que l'anticipation de la récolte est de 5 à 7 jours plus importante chez le sorgho que chez le maïs. Et donc, malgré une durée physiologique de remplissage théoriquement un peu plus longue chez le sorgho, ce dernier serait presque toujours récolté avant le maïs.

L'eau

Pour les deux cultures, la problématique hydrique ne se raisonne pas de la même façon, tout au moins dans leur cadre actuel de production. En effet, pour le maïs, il s'agit d'analyser l'évolution des quantités d'eau apportées pour irriguer la culture, alors que pour le sorgho, cultivé en pluvial, il s'agit d'analyser l'évolution du stress hydrique* subi par la plante.

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 (de l'ordre de –100 mm dans le FP et de –200 à –300 mm dans le FL par rapport au passé récent (PR*), les besoins en eau additionnels seront augmentés, ayant tendance à accroître les besoins en eau d'irrigation. Cependant, dans l'hypothèse où les variétés resteraient inchangées, la période d'irrigation se trouvera considérablement raccourcie en raison du raccourcissement du cycle induit par l'augmentation des températures, ce qui aura tendance à freiner cette augmentation de l'irrigation. Les figures 4 montrent que ce frein ne jouera que modérément dans le FP et qu'il faut s'attendre à une augmentation de l'irrigation proportionnelle au déficit climatique dans un rapport grosso modo de 1/2, c'est-à-dire de l'ordre de + 40 mm en moyenne par cycle cultural.

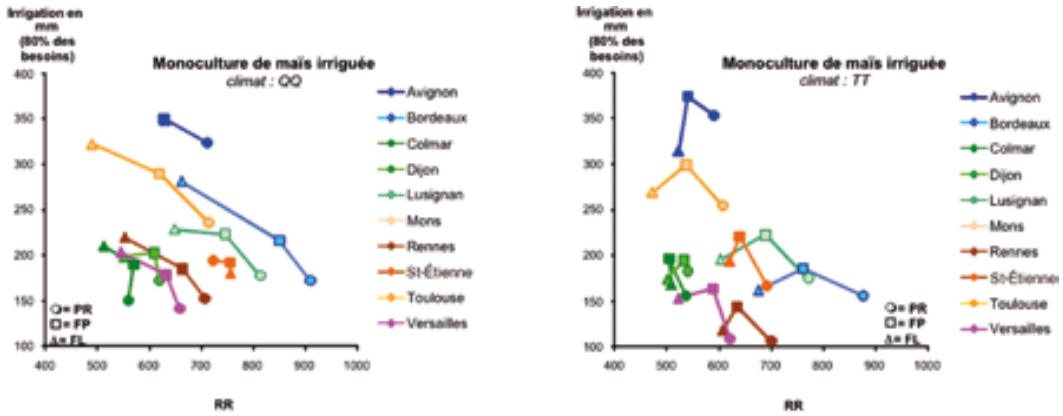


Figure 4 *: évolution de l'irrigation moyenne par période d'une monoculture de maïs pour le sol 1, en fonction de la pluviométrie moyenne annuelle prédite par la méthode de régionalisation* TT (scénario SRES A1B).*

Dans le FL, le frein phénologique* jouera davantage et il se pourrait qu'il puisse compenser l'augmentation du déficit climatique : c'est ce que prévoit la méthode de régionalisation TT. Nous sommes donc là confrontés à une incertitude* importante sur le long terme, mais qui ne doit pas cacher la certitude de l'augmentation importante d'irrigation à moyen terme.

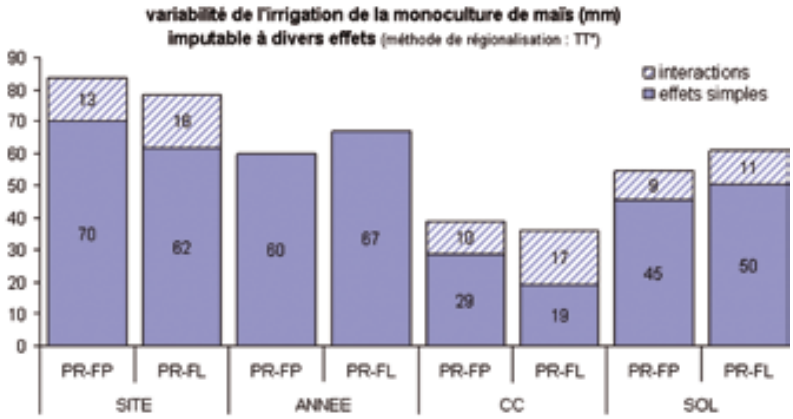


Figure 5 *: comparaison de l'impact* du changement climatique sur l'irrigation par rapport aux autres sources de variation. Deux analyses ont été réalisées séparément pour les deux horizons temporels associant d'une part PR et FP et d'autre part PR et FL.*

Si l'on compare cette évolution aux principales autres sources de variation des quantités d'eau apportées par irrigation (fig. 5), elle est substantielle : elle correspond aux 2/3 de la variabilité interannuelle, mais aussi à la moitié de la variabilité géographique et aux 2/3 de la variabilité pédologique échantillonnées dans le projet ; ce qui permet d'envisager des relocalisations. Des éléments plus précis sont fournis dans les fiches IRRIGATION et EAU.

En ce qui concerne le sorgho, il est indéniable que le confort hydrique de la culture va se détériorer dans le FP (fig. 6), mais, pour les mêmes raisons que précédemment, on peut espérer, dans le FL, une amélioration sur certains sites par effet d'esquive qui compenserait l'augmentation du déficit hydrique climatique. Ce scénario optimiste est le résultat de la méthode de régionalisation par types de temps (TT) alors que l'autre méthode (QQ) provoque une amplification de la détérioration du confort hydrique du sorgho.

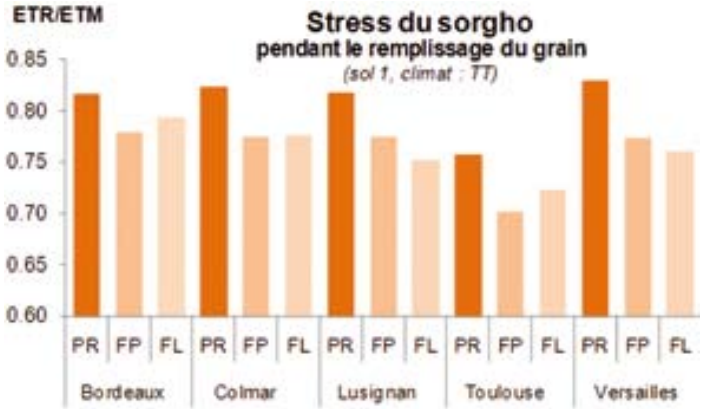


Figure 6 : *évolution du confort hydrique du sorgho défini comme le rapport ETR*/ETM pendant la période floraison-récolte.*

Dans ce contexte, le sol peut jouer un rôle important pour surtout éviter les sécheresses préfloraison, préjudiciables à la mise en place des grains. Ainsi, dans la plupart des sites, la différence de rendement entre les sols à forte réserve (type sol 1) et les sols à faible réserve (type sol 2) s'accroît.

Stress azoté : la fertilisation azotée du maïs doit-elle être remise en cause ?

La quantité d'azote absorbée par les plantes de maïs en monoculture a tendance à diminuer, de façon très modeste dans le FP jusqu'à des valeurs de l'ordre de 15 à 30 unités dans le FL. Cette évolution est liée à la moindre croissance des plantes en raison de la réduction du cycle et à l'augmentation du lessivage des nitrates par l'augmentation de l'irrigation qui empêche la culture de bénéficier de la minéralisation supplémentaire. Toutefois, dans le contexte de ce système de culture* où l'incorporation des résidus est faible, ce supplément d'azote apporté par minéralisation est modeste et décroît avec le temps. Pour autant, nos résultats montrent qu'il n'y a pas de diminution significative de l'indice de nutrition azotée à la floraison (qui reste de 0,75 en moyenne), indiquant qu'il n'y a pas lieu d'augmenter la fertilisation azotée*.

À l'inverse, pour le sorgho, aucune tendance significative n'est mise en évidence ; l'alimentation azotée de la culture est compatible avec les niveaux de rendement obtenus. Signalons toutefois que le sorgho dispose d'un supplément d'azote, lié à la minéralisation, qui est plus important que dans le cas de la monoculture de maïs, car les pailles de toutes les cultures de la rotation sont recyclées. L'absence d'irrigation évite le lessivage de cet azote, mais la sécheresse ne permet pas d'absorber tout l'azote disponible.

À l'échelle de la rotation

Le maïs en rotation avec des cultures d'hiver devient possible 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 (cf. fiche BLÉ). Le tableau 2 montre que les rendements du maïs en rotation deviennent, dès le FP, tout à fait compétitifs par rapport à la monoculture. Ce résultat s'explique en partie par le meilleur confort azoté des cultures en rotation, auquel on peut ajouter, même si ce n'est pas modélisé, le meilleur état sanitaire. Notons que la très faible valeur du rendement de maïs en rotation à Colmar pour le PR est liée à l'impossibilité pour la culture d'atteindre le stade de récolte, avec les bonnes préconisations d'humidité du grain, avant la mise en place de la culture de blé qui suit. En réalité, les agriculteurs ont recours à des techniques de séchage pour pallier cet inconvénient.

		Colmar		Bordeaux	
		monoculture	rotation	monoculture	rotation
Rendement (t ha^{-1})	PR	7.9 (0.9)	1.4 (0.4)	10.5 (1.2)	6.9 (0.6)*
	FP	7.2 (0.5)	7.7 (0.6)	9.6 (0.9)	8.4 (0.9)
	FL	6.6 (0.5)	7.0 (0.7)	8.9 (0.9)	9.8 (1.2)
Azote plante à la récolte (kg N ha^{-1})	PR	214 (18)	227 (30)	201 (20)	205 (29)
	FP	209 (22)	258 (38)	187 (18)	264 (36)
	FL	199 (19)	250 (50)	193 (29)	275 (53)

Tableau 2 : *comparaison de la productivité et de l'absorption d'azote (valeurs moyennes et écarts-types) du maïs en monoculture et en rotation avec une variété à cycle court à Colmar et à cycle long à Bordeaux sauf *.*

E Quelles adaptations possibles ?

Avancer les semis

Cette évolution, déjà perceptible depuis quinze ans, pourra continuer, comme le montre la figure 7, à un rythme de l'ordre d'un jour tous les quatre 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. Sans changer de variété, les résultats obtenus avec les deux méthodes de régionalisation TT et QQ 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 ! Ce résultat s'explique très bien en analysant de près les données climatiques : l'augmentation de température va de pair avec une diminution de la pluviométrie (cf. fiche CLIMAT) qui s'accompagne d'une augmentation du rayonnement qui, lui-même, provoque une augmentation de la demande climatique. Or chez les plantes en C4, comme le maïs et le sorgho, cette augmentation n'est pas contrebalancée par un effet antitranspirant du CO_2.

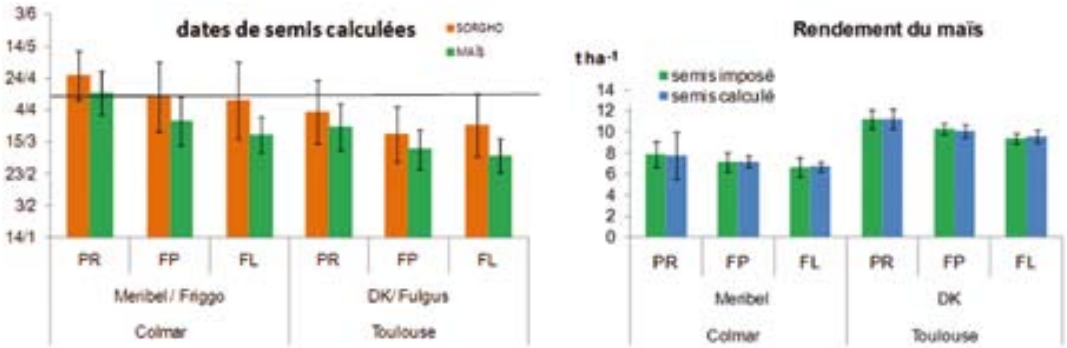


Figure 7 *: calcul des dates de semis les plus précoces optimisant les conditions d'implantation en termes de température et d'humidité du sol (le trait correspond à la date imposée dans l'exercice standard du projet, le 10 avril) et impact sur le rendement du maïs pour les sites de Colmar et Toulouse (sol 1, méthode de régionalisation : TT).*

Changer les variétés

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 (tab. 3).

SITE	AVI	BOR	CLE	COL	DIJ	LUS	MIR	MON	REN	STE	TOU	VERS
PÉRIODE						PR						
MAÏS	DKC	DKC	--	MER	MER	MER	--	--	MER	MER	DKC	MER
SORGHO	FUL	FUL	--	FRI	FRI	FRI	--	--	--	FRI	FUL	--
PÉRIODE						FP						
MAÏS	DKC	DKC	--	DKC	DKC	DKC	MER	MER	MER	DKC	DKC	MER
SORGHO	FUL	FUL	--	FUL	FUL	FUL	FRI	FRI	FRI	FUL	FUL	FRI
PÉRIODE						FL						
MAÏS	DKC	DKC	MER	DKC	DKC	DKC	DKC	DKC	DKC	DKC	DKC	DKC
SORGHO	FUL	FUL	FRI	FUL	FUL	FUL	FUL	FUL	FUL	FUL	FUL	FUL

Tableau 3 : *variétés testées dans le projet CLIMATOR qui optimise les disponibilités thermiques pour un semis du 10 avril parmi les deux variétés testées dans le projet : à cycle long (DKC5783 et FULGUS) et à cycle court (Méribel et Friggo). '--' : quand la culture ne peut accomplir son cycle plus de 8 années sur 10 à cause du froid hivernal ou de la nécessité de semer une céréale (cas du sorgho).*

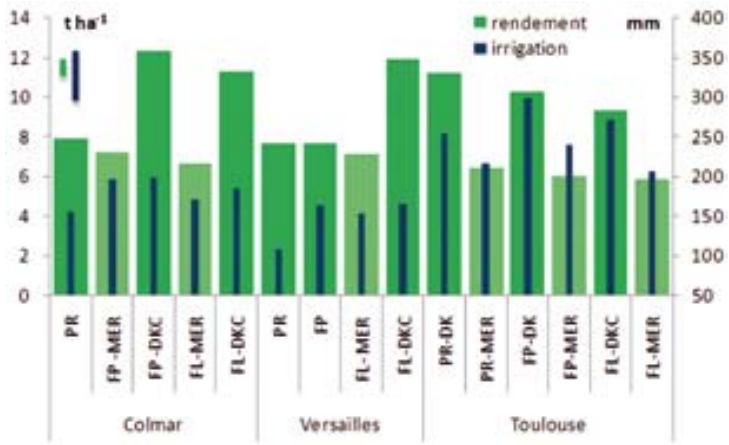


Figure 8 *: effet du changement de variétés de maïs sur le rendement et l'irrigation pour 3 sites (sol 1, méthode de régionalisation : TT).*

Cependant il est à craindre que l'irrigation n'augmente et ne remette en question ce possible allongement du cycle cultural. La figure 8, montrant des résultats issus du même jeu de données climatiques, met en évidence le réel bénéfice en termes de productivité à Colmar et Versailles, avec un coût hydrique supplémentaire modeste : 4 à 5 t.ha^{-1} de rendement en plus pour 10 à 20 mm d'eau additionnels. Ces chiffres peuvent être comparés aux économies d'eau réalisées par une politique d'esquive dans le Sud-Ouest : à Toulouse (fig. 8), en semant des variétés à cycle court, on perdrait de 3 à 4,5 t.ha^{-1} en économisant de l'ordre de 60 mm.

Irriguer le sorgho

Nous avons vu que, dans son contexte actuel de production (sans irrigation, en rotation), le sorgho n'est pas du tout compétitif par rapport au maïs ; c'est pourquoi nous avons tenté un essai prospectif de culture du sorgho à Toulouse, dans les mêmes conditions d'irrigation que le maïs (80 % des besoins) et en irrigation rationnée (50 % des besoins). Il apparaît (fig. 9) 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. Notons toutefois qu'il est un peu moins régulier que le maïs : il est soumis à une variabilité* interannuelle plus importante. Par ailleurs, le sorgho supporte très bien le rationnement puisque, à 50 % de ses besoins en eau (grosso modo 45 mm en moins), la diminution de rendement est inférieure à 1 t.ha^{-1}. Donc sa rusticité donne au sorgho un certain nombre d'atouts qui le favorisent face au changement climatique par rapport au maïs.

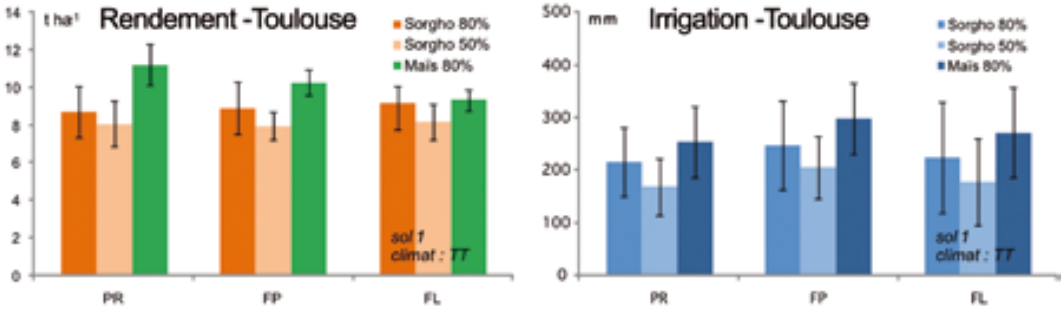


Figure 9 *: comparaison d'une simulation d'une monoculture de sorgho irriguée (à 80 et 50 % de ses besoins en eau) avec la monoculture de maïs en productivité et en besoin en eau (méthode de régionalisation TT et sol 1).*

Localisation géographique et édaphique des cultures

Compte tenu de la limitation des ressources en eau (cf. fiche EAU), la culture du maïs grain dans le Sud-Ouest est fortement menacée. En effet, une valeur limite moyenne de 250 mm par an (ce qui correspond, de fait, à une variabilité de l'irrigation entre 120 et 380 mm selon les années) sera dépassée à Toulouse dès le FP et à Bordeaux dans le FL (avec le scénario QQ). À contrario, le changement climatique offre des opportunités dans les zones plus septentrionales qui pourraient accueillir la culture de maïs grain avec des rendements tout à fait compétitifs (fig. 10). La culture du sorgho, actuellement surtout présente dans le Sud-Ouest (Midi-Pyrénées + Aquitaine + Poitou-Charentes = 65 % des surfaces), peut tirer profit du changement climatique pour opérer une extension vers les régions du Centre-Est et de l'Ouest dans le FP puis à tout l'hexagone dans le FL. Elle peut également remplacer le maïs dans le Sud-Ouest, car plus économe en eau.

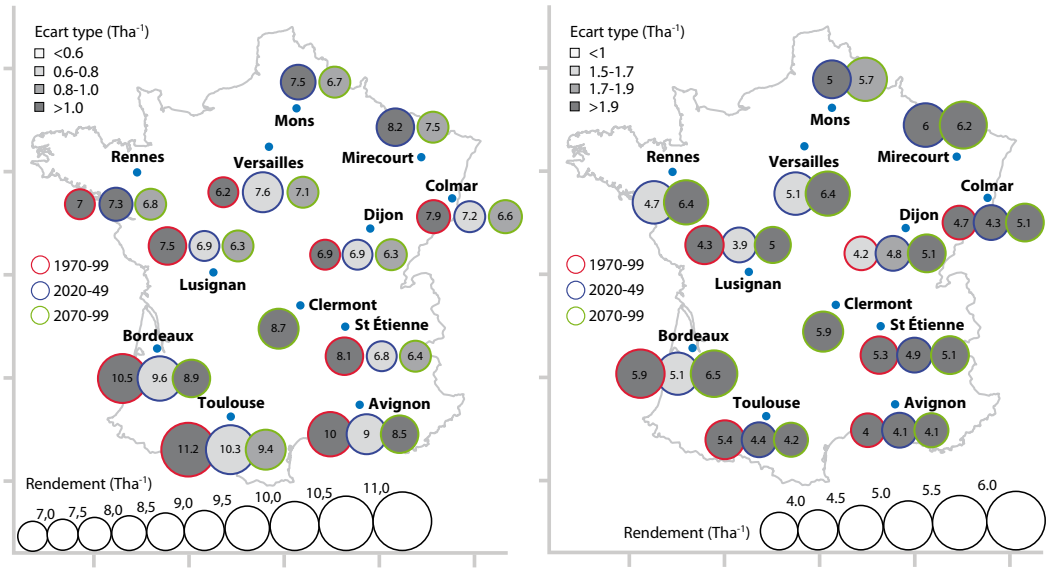


Figure 10 *: évolution du rendement de la monoculture de maïs irriguée (gauche) et de sorgho pluvial (droite) quand celles-ci sont réalisables (faisabilité* > 80 %) avec la méthode de régionalisation TT et le sol 1.*

En ce qui concerne les sols, il peut être intéressant de mettre à profit certains sols à excès d'eau (comme le sol 3) qui pour une légère diminution de rendement, lié à la pénalisation racinaire, permettent d'économiser une quantité non négligeable d'eau d'irrigation : par exemple –1,5 t.ha^{-1} de rendement pour –40 mm d'eau à Toulouse entre sol 1 et sol 3. À l'inverse, ne pas cantonner le sorgho dans des sols superficiels pourrait lui permettre d'exprimer son potentiel de rendement qui est loin de la moyenne nationale : par exemple, entre le sol 2 et le sol 1, l'écart moyen, à Toulouse, dépasse 3 t.ha^{-1}.

Changements de système de culture

S'il devait y avoir une réduction des surfaces en maïs, elle pourrait se faire au profit des rotations qui sont favorisées par le changement climatique et offrent un meilleur confort azoté à la plante (cf. fiche EAU pour voir l'impact sur la restitution d'eau au milieu). Par ailleurs, nous avons montré que le sorgho valorisait bien l'irrigation et donc il serait tout à fait profitable d'introduire une irrigation de complément.

F Les incertitudes

Nous avons déjà signalé l'incertitude introduite par les méthodes de régionalisation du climat (cf. fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS) qui est une source majeure de variation des données climatiques et surtout de la cohérence physique entre les variables. Elle joue surtout sur le sens de variation des besoins en irrigation dans le FL : la méthode de régionalisation TT estime des besoins décroissants entre le FP et le FL, alors que pour la méthode QQ ses besoins continuent de croître à un rythme moindre. Nous avons voulu voir si cette différence entre méthodes pouvait remettre en cause le résultat selon lequel une variété à cycle long n'était pas plus consommatrice en eau qu'une variété à cycle court, à Colmar. En ne regardant que les médianes, il semble effectivement que l'on aboutisse à cette conclusion (fig. 11), mais la valeur dépassée 2 années sur 10 augmente de 40 mm dans le FL et avec elle le risque de dépassement du seuil de 250 mm. Cet exemple souligne l'importance de considérer la variabilité interannuelle dans les études d'impact du changement climatique.

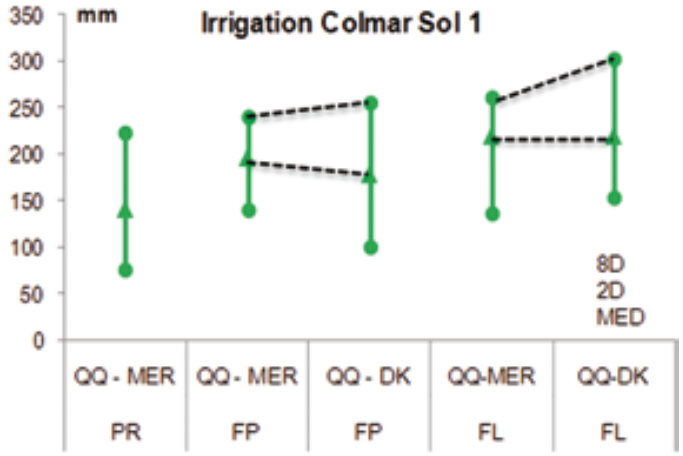


Figure 11 : *comparaison des statistiques de l'irrigation à Colmar avec variété à cycle long et à cycle court pour la méthode de régionalisation QQ. Les points correspondent aux 2° et 8° déciles et à la médiane.*

Il permet aussi de mettre en évidence l'importance de considérer le positionnement du cycle par rapport aux contraintes climatiques et non pas simplement sa longueur.

Ce qu'il faut retenir

- ✓ La monoculture de maïs grain irriguée sera très défavorisée par le changement climatique, en particulier dans les zones actuelles de production. La première raison est le positionnement estival de son cycle de culture qui, sans changement variétal, engendre des raccourcissements de la période de remplissage des grains, provoquant des baisses de rendement de l'ordre de 1 à 1,5 $t.ha^{-1}$ pour respectivement le FP et le FL. La seconde raison est l'augmentation du déficit hydrique climatique qui se traduit par un supplément d'irrigation de l'ordre de 40 mm en moyenne dans le FP. Dans le FL, l'évolution de l'irrigation est plus incertaine et il se peut que le frein phénologique compense l'augmentation du déficit climatique. Pour le sorgho, cultivé dans un contexte pluvial, l'évolution à la baisse des rendements, liée à la détérioration du confort hydrique, est moins marquée, avec même des perspectives d'augmentation dans les zones septentrionales. Pour les deux cultures, des opportunités apparaissent dans les zones actuellement en limite nord de l'aire du maïs, mais aussi dans de nouvelles zones du Nord-Est ou d'altitude.
- ✓ Une avancée des semis de 1 jour tous les 4 ans en moyenne sera possible, mais ne permettra pas de diminuer les besoins en irrigation du maïs ou le stress hydrique du sorgho. En revanche, l'allongement des cycles variétaux apparaît comme un élément déterminant pour le maintien, voire l'augmentation, de la production dans les zones Nord, pour un coût hydrique modeste. Cela pourrait compenser l'utilisation de cycles courts dans le Sud-Ouest pour économiser de l'eau.
- ✓ Des changements de systèmes sont à envisager : l'intégration du maïs au sein d'une rotation céréalière, qui devient réalisable presque partout sans avoir recours au séchage des grains, et l'irrigation du sorgho qui, à terme, présentent des productivités comparables à la monoculture de maïs irriguée.
- ✓ Plus que pour d'autres cultures, il semble important d'envisager la relocalisation géographique et édaphique des cultures de maïs et de sorgho.
- ✓ Dans le futur, la maturité beaucoup plus précoce des cultures de maïs permettra un séchage sur pied important et de grandes économies de frais de séchage qui représentent actuellement un coût élevé.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ Compte tenu de l'acuité du problème hydrique et des acquis des précédents travaux (en particulier, Lacroix *et al.*, 2009), il semble important de traiter de façon exhaustive l'incertitude climatique en analysant l'ensemble des scénarios. De même, il serait intéressant d'utiliser un second modèle de culture pour cerner l'incertitude épistémique, liée à la représentation des mécanismes dans les modèles.
- ✓ D'autres hypothèses techniques intermédiaires entre les cas extrêmes traités dans le projet pourraient être étudiées : variétés de précocités intermédiaires, irrigation de complément par exemple aussi bien pour le maïs que pour le sorgho.
- ✓ On pourrait également souhaiter une collaboration avec les généticiens pour envisager l'amélioration de la productivité du sorgho.

Pour en savoir plus….

Amigues J.-P., Debaecke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F. et Thomas A., (2006) - Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. *Expertise collective scientifique, synthèse du rapport*, INRA Editions. 72 p.

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.

Brisson N., Gervois S., Diaz R., Benoit M., (2007) - Changements climatiques et pratiques agricoles : Regards vers le passé et le futur, In *Seminary STICS, 20-22 mars 2007*, Reims, France.

Lacroix B., Ruget, F. Lorgeou, F., Souverain F., (2009) - Impact du changement climatique sur maïs grain et maïs fourrage. Questions posées et pistes d'adaptation. *Changement climatique : conséquences et enseignements pour les grandes cultures et l'élevage herbivore : colloque de restitution du projet ACTA*, 22/10/2009, 73-84.

Lobell D.-B., Asner. G.-P., (2003) - Climate and management Contributions to recent Trends in U.S. Agricultural Yields, *Science* 299 : 10-32.

Ruget F., Bethenod O., Combe L., (1996) - Repercussions of increased atmospheric CO_2 on maize morphogenesis and growth for various temperature and radiation levels. *Maydica* 41, 181-191.

Tardieu F. et Zivy M. (2006) - Amélioration génétique de la tolérance des cultures à la sécheresse. In: Amigues J.-P., Debaecke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F. et Thomas A. (eds). *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise collective scientifique, rapport*, INRA (France). 380 p + annexes.

Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts

Jean-Louis Durand, Frédéric Bernard,
Romain Lardy, Anne-Isabelle Graux

C 4
Prairie

A Quelques chiffres sur la production française actuelle

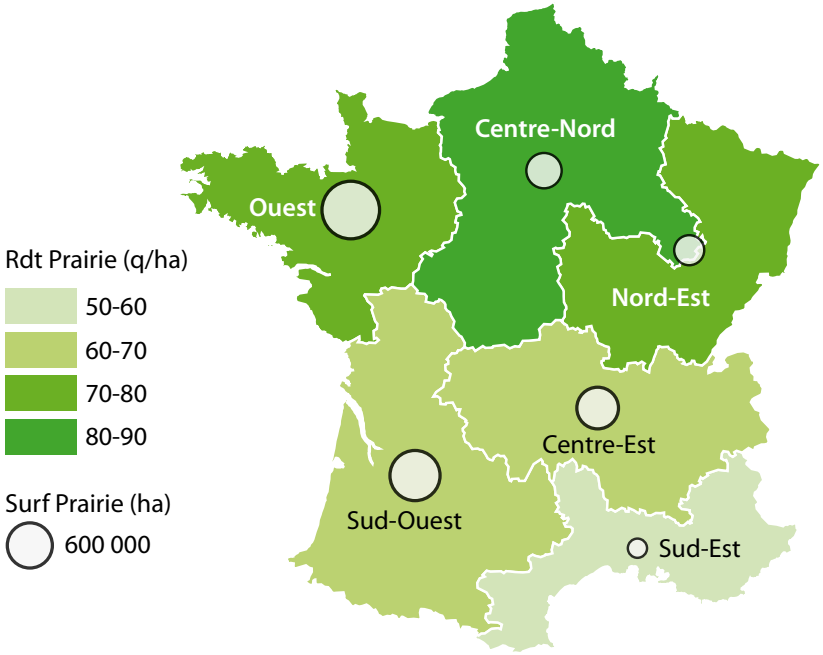


Figure 1 *: rendements et surfaces de prairie dans les régions CLIMATOR. Moyennes 2000-2007. Source Agreste.*

En 2007, les prairies temporaires (prairies semées de moins de 6 ans et contenant au moins une espèce de graminée) occupaient 2,8 millions d'hectares, soit environ 10 % de la SAU française (Agreste, 2009). Ces surfaces constituent un maillon essentiel des systèmes fourragers. Pour le maintien de leurs troupeaux, les agriculteurs doivent produire un foin de qualité et en quantité suffisante pour satisfaire les besoins sur l'ensemble de l'année. Outre ses fonctions de production, la prairie joue également un rôle de protection de l'environnement (limitation du lessivage), de la biodiversité, en tant que puits de carbone, et de détoxification des polluants des sols. Elle est une composante importante du paysage.

B Protocole de simulation de CLIMATOR

La prairie simulée est une prairie de graminée, fauchée et confortablement fertilisée. Semée en septembre, elle reste en place pendant les cinq années qui suivent. Elle est conduite en pluvial.

Sites	12 sites métropolitains dont un site d'altitude
Systèmes	1 système : semis de la prairie le 9 septembre et exploitation par quatre fauches par an durant 6 ans (semis inclus)
Conduite	Pas d'irrigation, 200 kg N ha^{-1} an^{-1}, exportation de la totalité de la biomasse avec une biomasse résiduelle d'une tonne par hectare.
Sols	Sol 1 : 226 mm de RU, 140 cm de profondeur, texture LM en surface Sol 2 : 92 mm de RU, 60 cm de profondeur, texture ALS en surface Sol 3 : 287 mm de RU, 210 cm de profondeur, texture LS en surface
Espèces	Ray grass anglais et fétuque élevée
Modèles	STICS et PASIM
Climat	SRES : A1B, ARPÈGE, régionalisation : TT et QQ

C Carte d'identité du système prairial dans le contexte du changement climatique*

Impacts attendus du changement climatique sur la prairie, son fonctionnement et sa conduite

Trois variables climatiques majeures modifiées par le changement climatique ont un impact significatif sur la physiologie des plantes : la concentration en CO_2 de l'air (notée [CO_2]), la température et la quantité d'eau disponible pour la culture. Leurs impacts sur les variables d'intérêts simulées dans le cadre de cette étude sont résumés dans la figure 2.

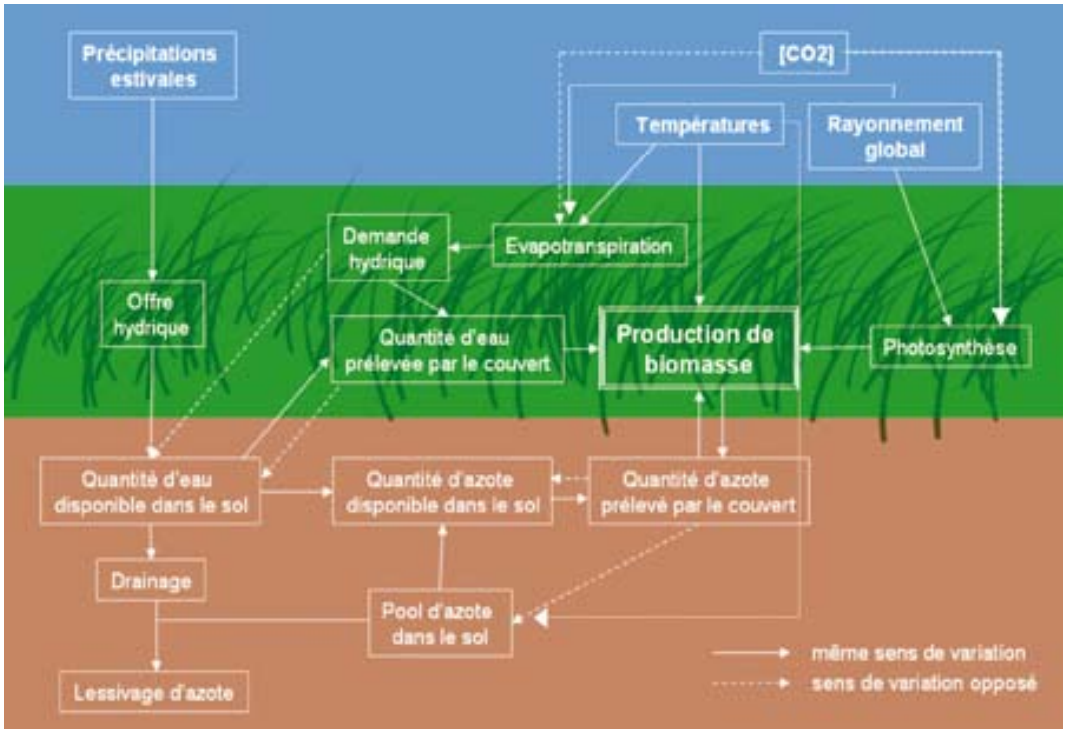


Figure 2 *: schéma conceptuel de l'impact du changement climatique sur la prairie.*

Le changement climatique simulé selon diverses méthodes de calcul et dans les scénarios choisis réduit les précipitations estivales, associé à une augmentation du rayonnement et de l'ET0, ce qui diminue plus ou moins sévèrement l'humidité du sol, la production de feuilles (Durand, 2007) et, donc, avec un impact immédiat sur la production. La variation d'humidité du sol et la percolation sont également réduites, ce qui modifie le régime de lessivage d'azote. En revanche, l'accroissement du taux de CO_2 et des températures tend à accroître la production, notamment en période humide. La phénologie* des prairiales tempérées est globalement avancée par l'élévation de la température, d'environ 4 à 5 jours en moyenne par degré de réchauffement (Chuine *et al.*, 2006). De plus, l'ensemble des processus concourant à la production végétale a des températures optimales supérieures aux moyennes observées actuellement (Durand *et al.*, 1999) ; l'activité de la morphogenèse devrait donc être accélérée par le réchauffement climatique. Selon le bilan des phénomènes positifs et négatifs, en particulier au printemps, période de production maximale, la production augmente ou diminue selon les sites* et le niveau de sensibilité pris en compte dans les modèles de culture*. Il en résulte un stockage plus ou moins important de carbone et d'azote dans la matière organique. Enfin, les modifications des conditions hydriques et thermiques dans le sol affectent l'activité des micro-organismes et la minéralisation*, modifiant finalement en retour la disponibilité de l'azote pour les plantes et la croissance* végétale.

Cartes d'identité écophysiologique du ray grass et de la fétuque dans le contexte du changement climatique

Ce qui les rapproche

Ces deux graminées fourragères sont des plantes au métabolisme en C3*, ce qui permet la valorisation de l'accroissement du CO_2 atmosphérique en termes à la fois de photosynthèse* et de fermeture stomatique (donc d'économie d'eau). Par ailleurs, leur cycle annuel très similaire est essentiellement piloté uniquement par la température, ce qui valorise l'allongement de la durée de production en début et en fin d'hiver, induit par le réchauffement.

Ce qui les différencie

La fétuque présente d'indéniables atouts d'adaptation à la sécheresse, d'abord au niveau de son système racinaire plus profond que celui du ray grass, mais aussi par une sénescence foliaire et racinaire beaucoup moins sensible à la sécheresse. Dans les zones humides de l'Ouest, la valeur alimentaire du ray grass et sa pérennité (liée à des capacités de tallage élevées) le favorisent, tandis que la fétuque est très présente dans les herbages du Centre et du Centre-Ouest.

D Impacts du changement climatique sur la productivité prairiale

L'ensemble des processus précédemment décrits est précisément pris en compte avec un poids variable selon les phénomènes considérés dans les simulations mathématiques des modèles STICS et PASIM, à partir des séries climatiques fournies (cf. fiche CLIMAT).

Variabilité* interannuelle de la production

Avant toute chose, il est indispensable de rappeler que la plus grande source de variabilité des rendements* des prairies, au-delà de l'effet du changement climatique, reste largement la variabilité interannuelle (fig. 4) que l'on simule très clairement avec le modèle STICS et avec PASIM (quoique la variabilité soit moins forte pour celui-ci).

La contrainte hydrique

Le taux de satisfaction des besoins en eau d'une culture se mesure par le rapport entre l'évapotranspiration réelle (ETR*) d'une culture dans les conditions réelles (selon la quantité d'eau disponible dans le sol) et l'évapotranspiration maximale (ETM*) qui représente la quantité d'eau évapotranspirée par la même culture conduite en conditions non limitantes en eau. Ainsi, le rapport ETR/ETM caractérise l'état hydrique des cultures (cf. fiche EAU). Les deux simulations PASIM et STICS s'accordent à montrer une dégradation de l'état hydrique des prairies à l'échelle annuelle, quelle que soit l'espèce et de façon plus importante en période estivale (fig. 3). La dégradation de l'état hydrique des prairies s'explique assez logiquement, le cas échéant, par une demande accrue due à l'augmentation des rendements sous l'effet de l'augmentation de [CO_2] et à l'élévation des températures et du rayonnement (cf. fiche CLIMAT) qui augmente l'évapotranspiration du couvert. Parallèlement, la diminution des précipitations, surtout en été, moment où la demande est la plus forte, amplifie le stress hydrique. Ainsi, les résultats montrent une diminution du confort hydrique* des prairies plus importante sur le sol superficiel qui a une réserve utile* inférieure à celle du sol profond. Selon les simulations des deux modèles, l'effet bénéfique du CO_2 sur la fermeture des stomates et la diminution de l'évapotranspiration réelle ne suffirait pas à compenser l'augmentation des sécheresses et des températures qui induisent une augmentation de la demande hydrique (Tubiello *et al.*, 2007).

Répartition annuelle du rendement

L'un des résultats majeurs de cette étude est la modification nette de la répartition de la production au cours de l'année. Les tendances montrent en effet une accélération de la production en hiver et au printemps dans le futur, jusqu'à utilisation complète de l'eau disponible dans le sol. En été, il y a alors diminution du rendement journalier, compte tenu de l'accentuation des épisodes de sécheresse qui se prolongent jusqu'à l'automne. Ainsi, le changement climatique devrait accentuer le problème de surproduction d'herbe au printemps et de manque de fourrages en été.

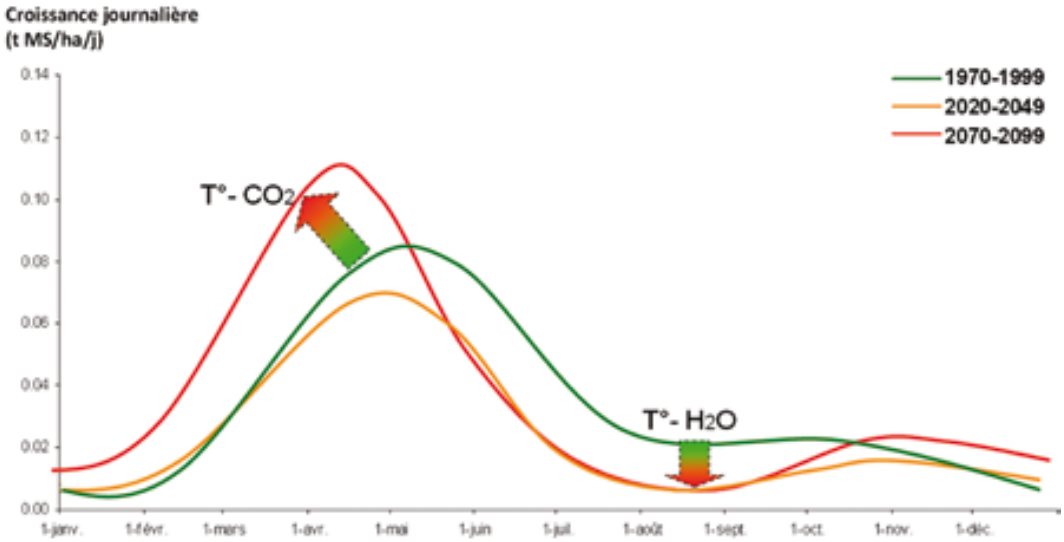


Figure 3 : *évolution annuelle de la production journalière au court de l'année – Exemple de la fétuque cultivée à Rennes sur sol superficiel, scénario A1B simulé avec STICS avec la méthode de régionalisation* climatique QQ.*

Niveau de production et qualité

Pour le ray grass anglais, les deux modèles de simulation se rapprochent. STICS calcule en revanche des rendements supérieurs à ceux de PASIM pour la fétuque, probablement en raison de la plus grande sensibilité des fonctions de croissance racinaire et foliaire dans STICS, qui exprime plus fortement les différences de paramètres affectés à chaque espèce. L'intensité de la tendance en réponse au changement climatique varie également entre les deux modes de simulation. Bien que la prévision d'une tendance à l'augmentation des rendements moyens semble acquise pour les deux méthodes de régionalisation comparées (QQ et TT) dans le futur lointain, l'ampleur de cette évolution est cependant variable en fonction des espèces, des sols et des sites.

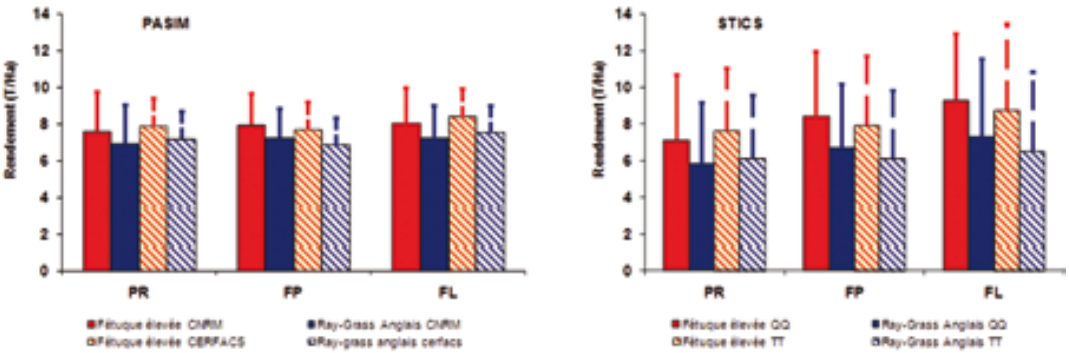


Figure 4 : *évolution moyenne des rendements en matière sèche annuels sur un sol superficiel, entre le PR, le FP et le FL, sur l'ensemble des 12 sites étudiés pour la fétuque (en rouge) et le ray grass anglais (en bleu), simulés avec STICS (à gauche) et PASIM (à droite) pour les méthodes de régionalisation QQ (en plein) et TT (en hachuré). Les écarts-types ont été calculés en faisant la moyenne des écarts-types interannuels de chaque station.*

Ainsi, sur l'ensemble du siècle, alors que les simulations à partir de la méthode QQ prévoient une augmentation moyenne de 22 % (PASIM 12 %) pour la fétuque par rapport à la période actuelle et 19 % (PASIM 10 %) pour le RGA, celles effectuées à partir de la méthode TT prévoient, parallèlement à des précipitations plus faibles, une augmentation plus faible avec seulement 8 % (PASIM 13 %) pour la fétuque et 6 % (PASIM 11 %) pour le RGA. Ainsi, bien que les séries climatiques provenant de deux méthodes de régionalisation différentes traduisent des tendances similaires, on s'attend à des gammes de variations assez larges (traduisant la sensibilité du modèle STICS aux variations des données climatiques). Cependant, les tendances obtenues sont conformes aux observations rapportées de différentes expérimentations, réalisées en conditions naturelles et atmosphère enrichie en CO_2, qui prévoient des augmentations de rendements pour le RGA très variables, entre 0 et + 34 % (Lüscher *et al.*, 1998).

Teneur en azote de la récolte

L'Indice de Nutrition Azotée (INN) rend compte de l'état de nutrition azotée d'un peuplement végétal. Sa valeur est le rapport entre la teneur en azote observée et la teneur critique qui est fonction de la biomasse du peuplement (Lemaire et Gastal, 1997). Même pour le PR, période pour laquelle les rendements sont les plus faibles malgré une fertilisation minérale simulée de 200 kg de N par an, le modèle calcule toujours un déficit azoté sur l'année (INN moyen annuel < 1). Autrement dit, l'apport d'azote est insuffisant pour atteindre la productivité maximale, ce qui est conforme aux études précédentes (Lemaire et Gastal, 1997) pour lesquelles le niveau d'azote optimal était atteint pour une fertilisation de l'ordre de 100 à 150 kg N.ha^{-1} pour la fétuque, pour la seule coupe d'été (contre 40 kg N.ha^{-1} dans le cas de nos simulations).

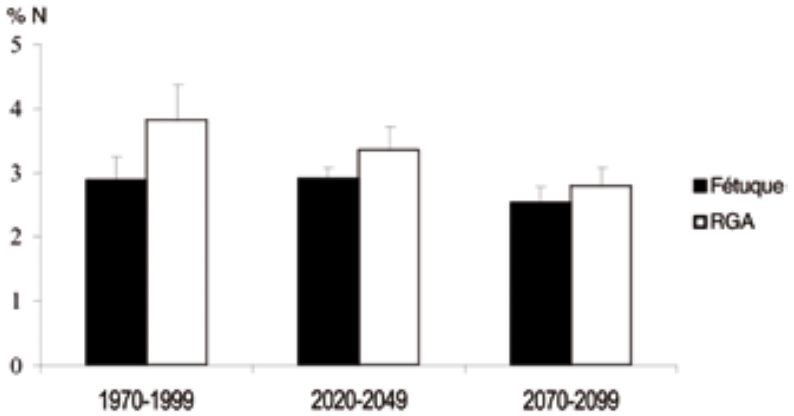


Figure 5 *: teneur en azote moyenne sur trente ans de la fétuque (noir) et du RGA (blanc) dans le fourrage récolté pour Lusignan, simulée avec STICS à partir des données climatiques du scénario A1B simulé par la méthode de régionalisation QQ.*

Bien que, sur ce plan, les modèles soient plus délicats à paramétrer, notamment à cause du poids de la dynamique de la matière organique, il existe une interaction positive entre le niveau d'alimentation hydrique et le niveau de nutrition azotée, qui se traduit par une amplification de l'effet de l'azote sur la croissance en matière sèche lorsque le niveau d'alimentation hydrique devient optimal. L'augmentation de la sécheresse estivale dans le futur risque de réduire la quantité d'azote disponible pour la prairie et donc de diminuer sa croissance estivale et sa teneur en azote. Cependant, aucune tendance de l'INN n'est généralement nette : les effets négatifs et positifs se compensent.

Le changement climatique pourrait en revanche s'accompagner d'une nette réduction de la teneur en azote dans le contexte d'une augmentation du [CO_2] et des rendements. Dans le cas de simulations réalisées avec des niveaux de fertilisations constants entre 1970 et 2100, l'augmentation des rendements entraîne logiquement une baisse de la teneur en azote de la production, par effet de dilution. La diminution de la teneur en azote pour le ray grass anglais est en moyenne de 27 %, ce qui correspond d'ailleurs aux essais menés par Soussana et al. (1996) qui observaient une diminution de l'ordre de 25 à 33 % dans des conditions expérimentales semblables.

Bilan environnemental

La prairie contribue, comme toutes les cultures pérennes, à consommer l'eau sur une période longue, ce qui prélève d'autant sur la lame d'eau drainante. Cependant, avec le temps et comme pour l'ensemble des cultures, la réduction des précipitations s'accompagne d'une réduction moindre de la percolation. La qualité de cette eau ne pose pas problème, en général, sous prairie de fauche. Les résultats des simulations montrent que la lixiviation* est quasiment nulle sur le sol profond, tant pour la fétuque que pour le ray grass anglais, du fait de sa profondeur et de sa teneur en argile qui lui permettent de stocker une quantité d'eau importante. Sur le sol superficiel, la lixiviation est plus importante et supérieure pour le ray grass anglais (enracinement moins profond) que pour la fétuque.

À l'échelle annuelle, les résultats sur l'ensemble des sites et des situations montrent des teneurs en nitrates toujours plus faibles que la norme de potabilité de l'eau des nappes phréatiques fixée à 50 mg.l^{-1}. Cependant, la tendance indique un risque d'aggravation dans les régions déjà affectées par le problème (Poitou-Charentes) et notamment dans les zones où les sols sont les moins profonds. Un ajustement (à la baisse) de la fertilisation semblerait alors nécessaire, aggravant d'autant, sans doute, l'état de nutrition azotée de la culture et la teneur en azote de la production. Enfin, les prairies peuvent également jouer un rôle pour le stockage du carbone dans les sols. Tout dépendra, en fin de compte, du bilan de la matière organique du sol (cf. fiche MATIÈRE ORGANIQUE).

Les nuances régionales

L'augmentation des rendements de la fétuque est souvent plus importante dans les stations situées à l'est de la France (fig. 6). Ce résultat est à relier avec la diminution moins importante des quantités de précipitations annuelles prévue dans l'est que dans l'ouest et le sud de la France, ce qui confirme que le facteur hydrique est celui qui limiterait encore plus la production fourragère de ces régions dans le futur. Dans le cas du ray grass anglais, les calculs produisent une moindre disparité géographique d'évolution des rendements.

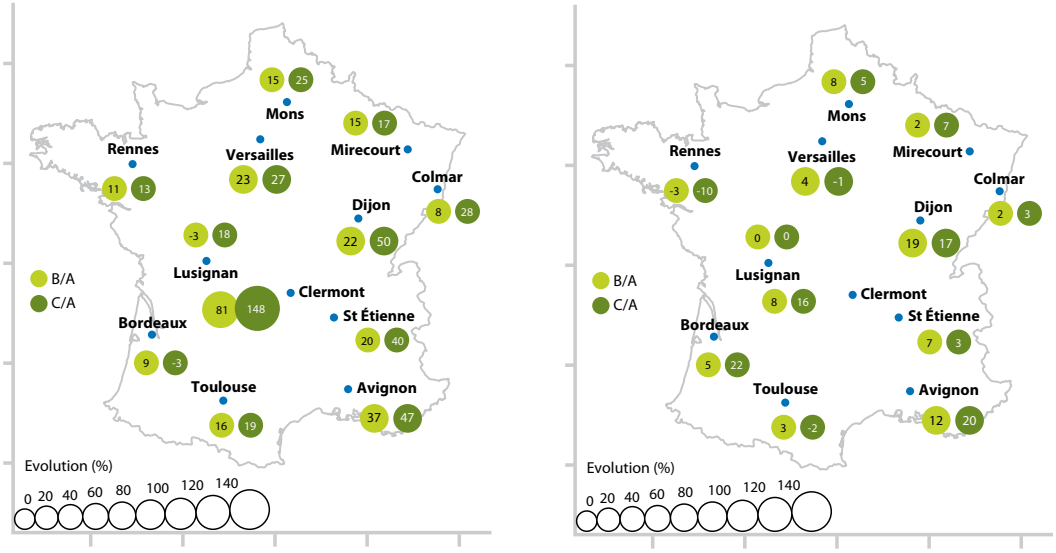


***Figure 6** : évolution (en %) des rendements en fétuque pour les périodes FP et FL par rapport à la période du PR. Cas de la série CNRM sur sol superficiel. À gauche STICS, à droite PASIM.*

Quelles adaptations des pratiques envisageables ?

Nos simulations ont été réalisées à des doses de fertilisation azotée fixes, quelle que soit l'année. L'augmentation de la production due au changement climatique ne semblerait pas nécessiter une adaptation de la fertilisation, sinon pour maintenir de fortes valeurs de teneur en protéine du fourrage. Le changement climatique devrait donc assurer le confort d'une production de matière sèche annuelle élevée. D'autant qu'au cours des cinquante dernières années, l'amélioration variétale a conduit à augmenter la production des prairies en été et à l'automne, régularisant la production dans l'année. Cette amélioration génétique a, par exemple, permis d'améliorer le rendement des prairies de ray grass anglais de 0,29 $t.ha^{-1}$ en moyenne tous les dix ans (Sampoux *et al.*, 2009), soit trois fois plus environ que l'impact le plus élevé du changement climatique simulé par cette étude. Cependant, localement, l'augmentation du stress hydrique estival pourrait être freinée par quelques irrigations d'appoint.

Ce qu'il faut retenir

- ✓ En tant que culture pérenne, la croissance de la prairie se poursuit tout au long de l'année. Or, lorsque le principal facteur limitant la croissance est la température, le réchauffement climatique devrait permettre un allongement de la période de production et donc une exploitation (fauche ou pâturage) plus tôt au printemps et plus tard en fin d'année, à condition que les parcelles soient praticables. À l'inverse, on prévoit également une diminution du rendement estival, ce qui pourrait accentuer le déséquilibre de production en été par rapport au printemps, et donc augmenter les reports de fourrages qui constituent une charge de travail importante pour les agriculteurs.
- ✓ Ainsi, le changement climatique aura un impact modéré et plutôt positif sur les niveaux de production fourragère en France. Les résultats de cette étude (dans les limites qui ont été exposées précédemment) prévoient globalement une augmentation de l'ordre de 5 à 20 % de la production fourragère d'ici à 2100 avec, cependant, une dégradation des états hydriques et azotés des prairies, une faible baisse tendancielle de la teneur en azote de la production pour le ray grass.
- ✓ Les systèmes d'élevage, basés sur l'exploitation de l'herbe, directement dépendants des effets du climat qui déterminent à la fois la croissance de l'herbe et la constitution des stocks fourragers (Lemaire et Pflimlin, 2007), devraient nécessairement adapter non seulement la conduite des prairies (fertilisation notamment) mais aussi l'exploitation, à travers une gestion différente de la production, avec probablement plus de reports et une plus grande diversification de la production fourragère (autres espèces herbacées, légumineuses, sorgho…), afin d'assurer une production suffisante compte tenu des incertitudes climatiques. L'extension de la période de production en hiver et au début du printemps aboutirait probablement à une révision des calendriers de mise à l'herbe et de gestion de la reproduction du troupeau.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ Les modèles climatiques* actuels ne permettent pas de prévoir de façon fiable les épisodes extrêmes tels que les canicules ou, à l'inverse, les gels intenses. Ainsi, il est difficile de prévoir actuellement l'incidence qu'auront ces évènements climatiques extrêmes qui pourraient devenir plus fréquents. Par exemple, dans le cas des canicules, il est envisageable de penser qu'elles auront un impact non négligeable sur la mortalité des prairies, due aux effets combinés des températures élevées et des sécheresses. Mais il reste que ces cultures semblent très résistantes à ces contraintes, même si leur production serait gravement réduite durant des périodes plus longues qu'en année normale.

Pour en savoir plus…

Agreste (2009) - *Statistiques agricoles annuelles 2006, 2007 définitives et 2008 provisoire.* [En ligne], Disponible sur : http://agreste.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/saa2009T3a-2.pdf

Chuine I., Morin X., Roy J., Salager J.-L., Sonié L. and Staudt M. (2006) - Fonctionnement d'une communauté végétale soumise à un réchauffement atmosphérique et à une sécheresse édaphique. *Programme GICC Gestion et Impact du Changement Climatique – Séminaire de restitution*, 11-12 mai 2006, Paris.

Durand J.-L. (2007) - Les effets du déficit hydrique sur la plante : aspects physiologiques. *Fourrages*, 190, 181-195.

Durand, J.-L., Schäufele R. and Gastal F. (1999) - Grass leaf elongation rate as a function of developmental stage and temperature: morphological analysis and modelling. *Annals of Botany*, 83: 577-588.

Lemaire G. and Denoix A. (1987b) - Dry matter summer growth of tall fescue and cocksfoot in western France. II – Interaction between water consumption and nitrogen nutrition. *Agronomie*, 7 (6), 381-389.

Lemaire G. and Gastal F. (1997) - On the critical N concentration in agricultural crops. N uptake and distribution in plant canopies. In: Lemaire G. (Ed.), *Diagnosis of the Nitrogen Status in Crops*. Springer-Verlag, Heidelberg, pp. 3-44.

Lemaire G. and Pflimlin A. (2007) - Les sécheresses passées et à venir : quels impacts et quelles adaptations pour les systèmes fourragers ? *Fourrages*, 190, 163-180.

Lüscher A., Hendrey G.-R. and Nösberger J. (1998) - Long-term responsiveness to free air CO_2 enrichment of functional types, species and genotypes of plants from fertile permanent grassland. *Oecologia*, 113, 37-45.

Sampoux J.-P., Métral R., Ghesquière M., Baudouin P., Bayle B., Béguier V., Bourdon P., Chosson J.-F., De Bruijn K., Deneufbourg F., Galbrun C., Pietraszek W., Tarel B. and Viguié A. (2009) - Genetic improvement in ray-grass (Lolium perenne) from turf and forage breeding over the four past decades. *XVIIIth Meeting of the Eucarpia Fodder Crops and Amenity Grasses Section. Book of Abstracts,* p. 84.

Soussana J.-F., Casella E. and Loiseau P. (1996) - Long-term effects of CO_2 enrichment and temperature increase on a temperate grass sward. II. Plant nitrogen budgets and root fraction. *Plant and Soil*, 182, 101-114.

Tubiello F.-N., Soussana J.-F. and Howden S.-M. (2007) - Crop and pasture response to climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104 (50), 19686-19690.

Changement climatique et culture du colza : l'essentiel des impacts

Nadine Brisson

C 5
Colza

A Quelques éléments clés sur la culture du colza en France

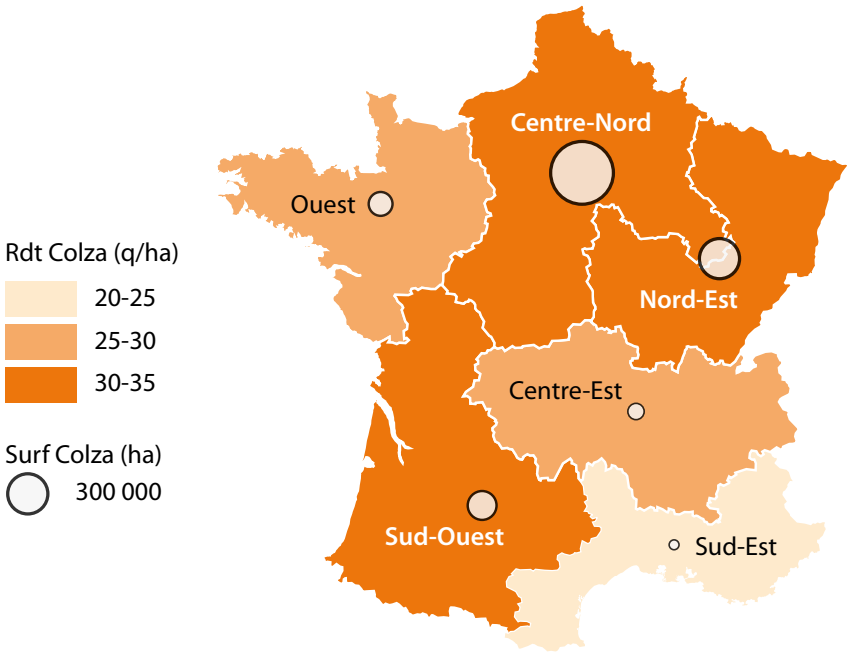


Figure 1 : surfaces emblavées en colza dans les régions CLIMATOR. Moyennes 2000-2007. Source Agreste.

Avec plus d'un million d'hectares qui lui sont consacrés, le colza est une culture importante en France, qui arrive au 4e rang après le blé, le maïs et l'orge. Plus de la moitié de ces surfaces se situent dans le Centre-Nord. Les rendements moyens tournent autour de 3 $t.ha^{-1}$ et c'est dans le Nord-Est que les rendements sont les plus élevés (cycles longs quand la culture ne gèle pas). Depuis 2002, les surfaces emblavées en colza sont en augmentation alors que les rendements ont tendance à stagner. Le colza est cultivé pour son huile et ses protéines. Les débouchés pour l'alimentation humaine et animale sont concurrencés par les débouchés industriels, en particulier la filière bioénergétique (production de Diester). La part des surfaces destinées à la production de biocarburants est passée de 30 % en 2005 à 60 % en 2008 ; ce qui explique l'augmentation des surfaces.

Le colza est une culture majeure des rotations céréalières. Son cycle long, de septembre à juin, et son aptitude à une forte absorption d'azote sont autant d'atouts pour réduire le lessivage des nitrates. Libérant la parcelle au début de l'été, elle permet un semis précoce et crée de bonnes conditions d'implantation des céréales d'hiver suivantes. Après la récolte, il est fréquent que des repousses apparaissent, pouvant constituer un atout pour limiter les pertes d'azote (engrais vert). Au plan phytosanitaire, le colza a beaucoup d'ennemis (phoma, sclerotinia, oïdium, charançon…) qui nécessitent un contrôle assidu.

B Protocole de simulation de CLIMATOR

La culture de colza a été étudiée comme une composante d'une rotation* quadriennale de grande culture intensive à base de céréales irriguées.

Sites	12 sites métropolitains dont un site d'altitude
Système	une seule rotation : maïs - blé tendre - colza - blé dur
Conduite	pluviale, semis le 20/08, 180 kg N ha^{-1} en 2 apports
Sols	Sol 1 : sol de limon profond à réserve utile* élevée (226 mm) et fertilité moyenne Sol 2 : rendzine à faible réserve utile (104 mm) et faible fertilité Sol 3 : sol lessivé hydromorphe à forte réserve utile (218 mm) et fertilité élevée
Variété	Olphi (cycle court) et Pollen (cycle long) qui diffèrent par la durée de montaison
Modèle	STICS
Climat	SRES : A1B*, ARPÈGE, méthode de régionalisation* : TT*, QQ* et ANO*

C Carte d'identité écophysiologique du colza dans le contexte du changement climatique

Atouts

En tant que plante en C3, le colza valorisera bien l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère qui, en l'absence de toutes autres contraintes, permettra une stimulation de la photosynthèse*. Le colza est très sensible au gel du feuillage pendant sa phase hivernale qui peut intervenir dès que la température minimale descend en dessous de –4 °C, la température létale se situant autour de –15 °C : ces risques de gel seront nettement atténués par l'augmentation des températures minimales. Par ailleurs, le positionnement calendaire de son cycle cultural (septembre à juin) confère au colza des propriétés d'esquive* face au manque d'eau estival de fin de cycle, qui combinées à son enracinement profond en font une culture résistante à la sécheresse. Cependant, les besoins photopériodiques (plante de jours longs) et vernalisants* du colza tendront à limiter les raccourcissements à la phase printanière du cycle. Le colza, qui est également réputé pour ses bonnes propriétés d'absorption d'azote, résultant à la fois de besoins élevés et de bonnes capacités racinaires, devrait être en mesure de valoriser le supplément d'azote provenant de la stimulation de la minéralisation* de la matière organique. Encore plus qu'aujourd'hui, introduit dans la rotation, le colza permettra de freiner la perte des nitrates par lessivage pendant la durée de son cycle.

Faiblesses

Les difficultés d'implantation du colza en fin d'été risquent de s'accentuer à cause de la sécheresse et peuvent conduire à un décalage des semis, pénalisant pour la culture.

C'est selon…

Malgré ses bonnes capacités d'absorption d'azote, le colza va laisser un sol fortement pourvu en azote minéral à l'automne. En effet, on peut s'attendre à ce que la quantité d'azote provenant de la minéralisation de la matière organique du sol laissé nu par la culture soit augmentée, car le colza libèrera les parcelles de plus en plus tôt et le sol sera soumis à des fortes températures, même si l'action de ces températures sera diminuée par la sécheresse. Cela constitue un avantage pour stimuler le démarrage d'une culture suivante semée tôt dans l'automne (exemple du blé), mais aussi un inconvénient au plan de la pollution diffuse si le sol reste nu trop longtemps (exemple d'une culture de printemps).

D Impacts du changement climatique sur la culture du colza dans une rotation céréalière

Évolution des niveaux de production

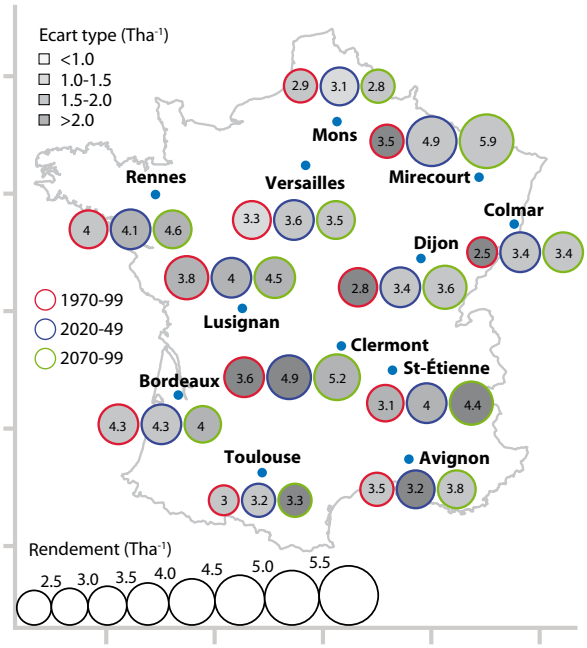


Figure 2 *: évolution du rendement* du colza sur l'ensemble des sites, rotation : MBCB, cv : Olphi, sol 1, semé le 20/08, méthode de régionalisation du climat TT.*

Sur la carte représentée en figure 2, les niveaux de production du passé récent (PR*) sont une image de la facilité d'implantation de la culture en fin d'été (semis fixé partout au 20 août) et de la gélivité des sites* ; ils sont donc plus élevés sur la bordure atlantique. Nous nous attacherons surtout à regarder leurs évolutions : de façon générale, le rendement du colza tend à augmenter. Cependant, cette augmentation est surtout importante dans les sites de la bordure est (Mirecourt, Colmar, Dijon, Saint-Étienne) et en montagne (Clermont), traditionnellement plus froids en automne-hiver. C'est donc la diminution des gels hivernaux qui semble, au premier ordre, piloter l'augmentation des rendements de colza. Dans les zones traditionnelles de grande culture, on notera la relative stagnation des rendements pour Versailles, Mons, Rennes et Toulouse.

On retrouve, dans le tableau 1, le bénéfice significatif que les sites des régions Est peuvent tirer de la culture du colza.

	FP-PR	FL-PR
Avignon	ns	ns
Bordeaux	ns	ns
Clermont	**1.4**	**1.7**
Colmar	**0.7**	**0.9**
Dijon	*0.6*	**0.9**
Lusignan	ns	*0.8*
Mirecourt	**1.4**	**2.5**
Mons	ns	ns
Rennes	ns	ns
St-Étienne	**1.0**	**1.5**
Toulouse	ns	ns
Versailles	ns	ns
Tous sites	**0.5**	**0.8**

Tableau 1 : *évolution des rendements de colza (sol 1, climat : TT). La significativité de l'évolution par rapport à la variabilité* interannuelle est notée de la façon suivante :* **Gras** *(p < 0.01), Italique (p < 0.05),* Normal *(p < 0,10), ns (non significatif).*

Gel hivernal

La diminution des gels hivernaux des couverts de colza est sans doute l'évolution la plus positive induite par le changement climatique*. En effet, si le gel létal du colza se produisait 3 années sur 10 à Clermont-Theix et Mirecourt et 2 années sur 10 à Colmar, Dijon et Saint-Étienne dans le PR, ces risques seront partout inférieurs à 1 année sur 10 dans le futur proche (FP*), pour finalement devenir très rares dans le futur lointain (FL*). Ces résultats sont convergents avec toutes les méthodes de régionalisation climatique.

Phénologie

En prenant l'exemple de Versailles, la figure 3 permet de comprendre l'évolution de la durée des phases du colza. Les phases automno-hivernales, correspondant à la levée et à la période de vernalisation, sont allongées à cause de la sécheresse pour l'une et de l'augmentation des températures pour l'autre.

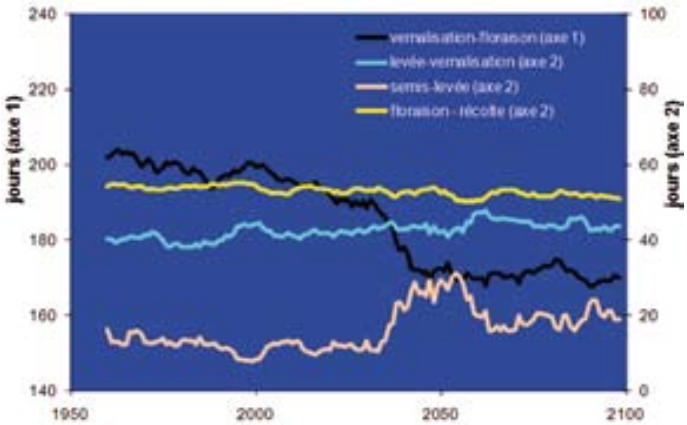


Figure 3 *: décomposition de l'évolution de la durée des phases du colza à Versailles, représentée en moyenne glissante sur 10 ans.*

À l'inverse, la montaison aboutissant à la floraison du colza est considérablement raccourcie, alors que la phase reproductrice est très peu affectée. Pourquoi ? La phase de montaison se produit dans un contexte thermique augmenté pour deux raisons : à cause du retard calendaire lié au retard de la vernalisation et à cause de l'augmentation des températures. Par la suite, l'avancée calendaire de la phase reproductrice compense peu ou prou l'augmentation des températures. Ces évolutions ne se produisent pas de façon continue tout au long du siècle, mais semblent focalisées sur la période du FP.

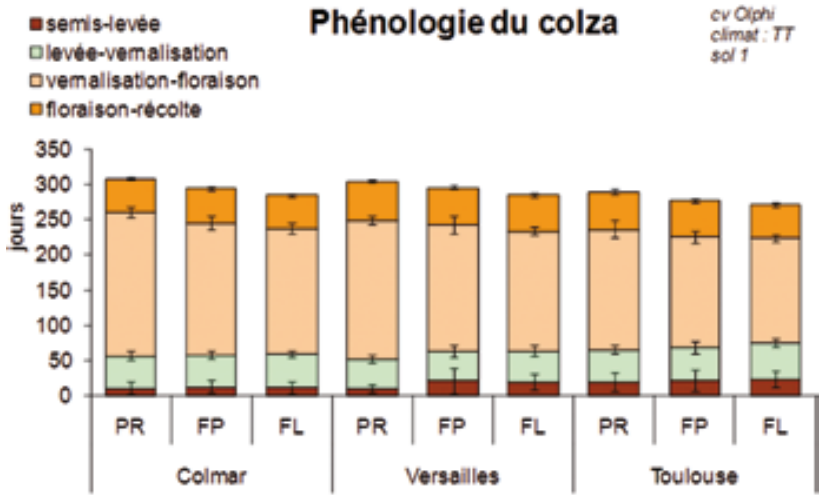


Figure 4 *: décomposition de la durée des phases du colza pour trois sites sur les trois périodes d'intérêt (barres d'erreur = écarts-types*).*

À l'échelle de l'ensemble du cycle (fig. 4), si un raccourcissement se fait sentir, il est limité à une vingtaine de jours et ne concerne que la phase de montaison. L'allongement de la levée, accompagnée d'une augmentation de la variabilité interannuelle sera préjudiciable à l'installation de la culture.

Colza et azote

La stimulation de la minéralisation de la matière organique du sol (cf. fiche MATIÈRE ORGANIQUE) nous avait laissé escompter une augmentation de l'absorption en azote. Rien de franc ne se dessine, au contraire…

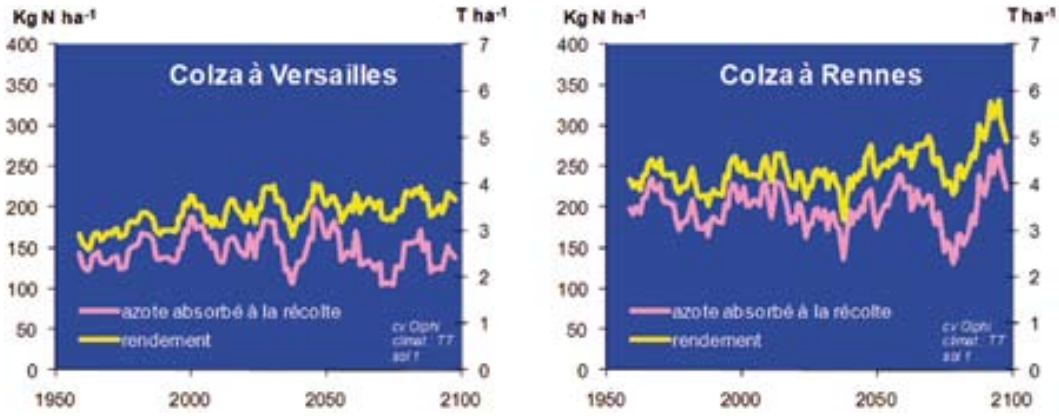


Figure 5 *: évolution comparée du rendement et de l'absorption d'azote à Rennes (droite) et à Versailles (gauche) en moyennes glissantes sur 10 ans.*

S'il y a bien parallélisme entre rendement et absorption d'azote, il semble que l'écart entre l'évolution des deux dynamiques augmente à partir de 2050 (fig. 5). Ce phénomène est particulièrement important à Versailles où l'absorption stagne alors que le rendement augmente à la fin du siècle, mais il existe aussi à Rennes. La question importante est de savoir si cela correspond à une limitation du rendement par l'azote qui ainsi limiterait l'effet positif du CO_2.

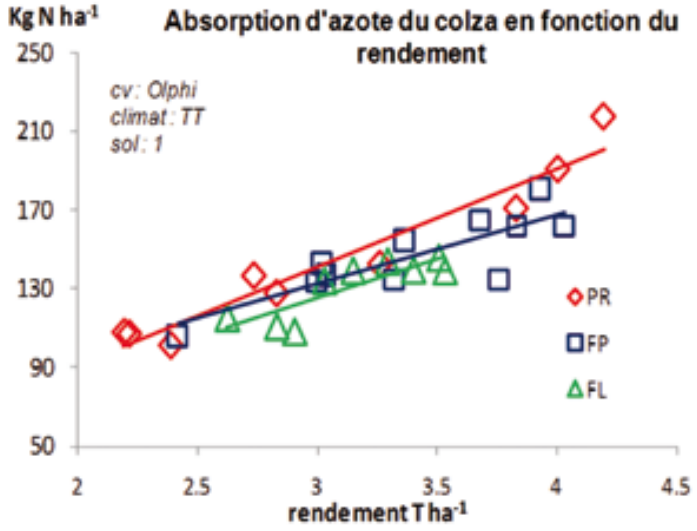


Figure 6 *: relations entre rendement et absorption d'azote en moyenne trentenaire pour l'ensemble des sites.*

De façon plus générale, la figure 6 montre clairement qu'à même rendement, l'azote accumulé dans la plante sera inférieur. Cela est dû au déficit hydrique pendant la partie végétative du cycle qui limite l'absorption par la plante, alors que l'azote minéral est de plus en plus abondant à cause de la stimulation de la minéralisation par le réchauffement. Pour illustrer ces phénomènes, voici les valeurs du stock d'azote minéral dans le sol (en kg N ha^{-1}) et de l'indice de nutrition azoté (INN) en moyenne par période pour le site de Versailles au 1er avril, aux alentours de la floraison : PR(50, 0,8), FP(80, 0,7) et FL(100, 0,6). Autrement dit, une augmentation de la fertilisation azotée* ne pourrait pas servir à compenser cette défaillance azotée au niveau de la plante.

Stress hydrique

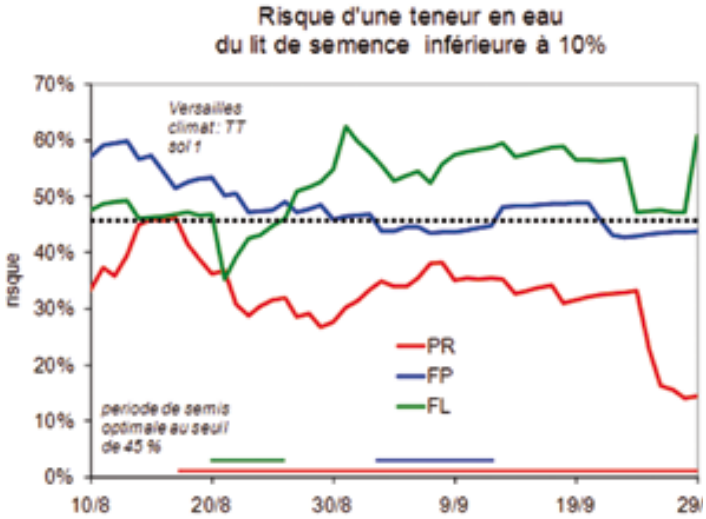


Figure 7 *: risque de sécheresse du lit de semence (10 premiers cm) par période sur la base d'un seuil de 10 % de teneur en eau pondérale.*

L'accentuation des déficits hydriques va agir, chez le colza, sur la phase végétative et en particulier sur l'installation de la culture.

Par exemple, à Versailles (fig. 7), l'humidité du lit de semence sera non seulement plus faible (passant de 12 % dans le PR à respectivement 10 puis 9 % dans les FP et FL, en moyenne), mais sa dynamique d'évolution sera différente à cause d'occurrences différentes des orages de fin d'été. Cela engendre des conséquences sur la décision de semis. On montre ainsi, en supposant que l'agriculteur accepte un risque de 45 % de sécheresse du sol en surface, que les semis devront être décalés de plus d'un mois dans le FP. Quant au FL, les choses semblent devenir plus aléatoires avec une fenêtre acceptable fin août / début septembre, mais qui comporte des risques pour la survie des plantules, compte tenu de l'augmentation des risques de sécheresse au cours du mois de septembre. Des phénomènes comparables peuvent être mis en évidence sur les autres sites.

La figure 8 confirme que le confort hydrique* du colza pendant la phase de remplissage est très peu affecté par les déficits pluviométriques. La durée (de l'ordre de 50 jours) et l'anticipation* (de l'ordre de 20 jours) permise par l'augmentation des températures expliquent ce résultat. Sur ce thème, le comportement du colza est bien meilleur que celui du blé (et à fortiori que les autres cultures), justifiant l'inutilité d'apports d'eau supplémentaires pendant le remplissage.

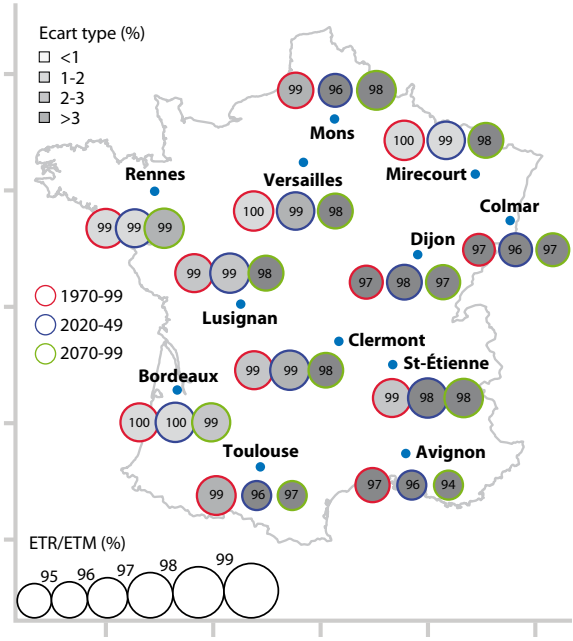


Figure 8 *: évolution de la satisfaction des besoins en eau (en %) pendant la phase de remplissage. MBCB, cv : Olphi, sol : 1, méthode de régionalisation du climat TT.*

L'impact de la réserve utile du sol agit essentiellement sur la satisfaction des besoins en eau pendant la phase végétative, ce qui influence le rendement *via* le nombre de graines. Ainsi les différences de production entre le sol à faible réserve utile (sol 2) et les sols à plus forte réserve utile (sol 1 et 3) tendent à augmenter avec le changement climatique : de l'ordre de 0,7 $t.ha^{-1}$ en PR, elles passent à 1 $t.ha^{-1}$ en FP puis 1,2 $t.ha^{-1}$ en FL.

À l'échelle de la rotation

Comme prévu, nous constatons une augmentation de la quantité d'azote minéral présent dans le sol en octobre, lors du semis de la culture de blé, quelle que soit la culture précédente. Cependant, si cette augmentation est du même ordre de grandeur dans le futur proche pour les « précédents » colza et maïs (~ + 25 kg N ha^{-1}), elle est double pour le colza dans le futur lointain (~ + 70 contre ~ + 35 kg N ha^{-1}). La présence d'une couverture végétale, après une culture de colza, s'avère donc de plus en plus importante pour limiter les risques de lixiviation*. À contrario, ce supplément d'azote disponible est bénéfique à la culture du blé qui suit.

E Adaptations envisageables

Légère préférence pour les variétés à cycle court

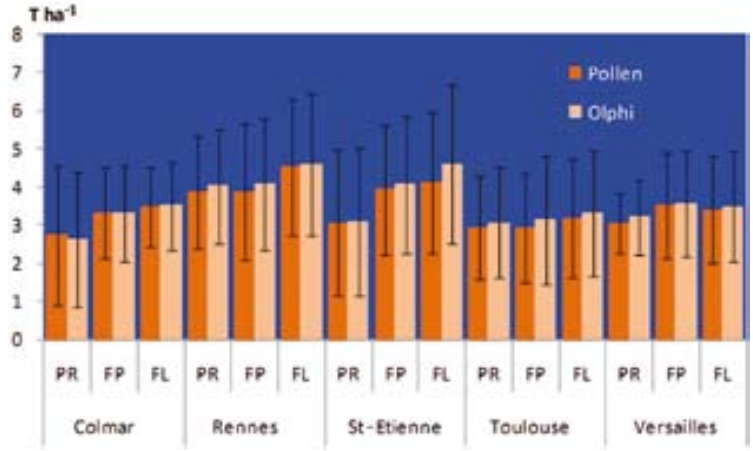


Figure 9 *: comparaison des rendements des variétés Olphi et Pollen (méthode de régionalisation du climat TT, sol 1).*

Il est bien difficile, sur la base de nos résultats (fig. 9), d'annoncer une réelle préférence pour l'une ou l'autre des variétés. Il semble toutefois que la variété Olphi à cycle plus court par sa montaison rapide (60 degrés-jours en moins par rapport à la variété Pollen) sera légèrement favorisée à l'avenir. Ce résultat s'explique par une meilleure absorption d'azote pendant la phase végétative, permise par ce léger phénomène d'esquive, qui favorise la mise en place du nombre de graines.

Faire face au problème du semis

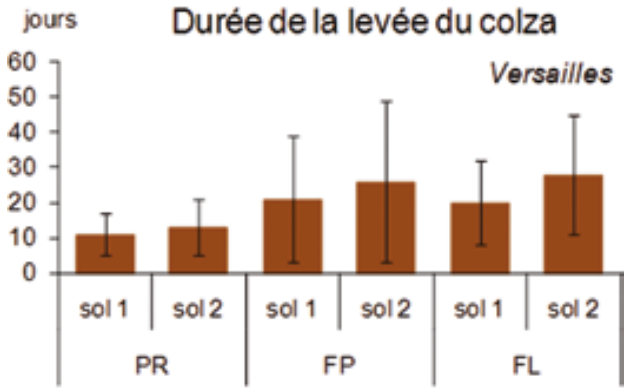


Figure 10 *: influence du sol sur la durée de la levée du colza et de sa variabilité interannuelle.*

L'acuité du problème d'implantation du colza requiert d'envisager des adaptations*. Nous avons déjà évoqué le retard des semis qui dans le FP devra être décalé de 20 à 30 jours. Mais compte tenu du changement de la dynamique climatique à l'automne, cette tactique ne suffira plus dans le FL où il faudra peut-être envisager une irrigation « starter ». Il faut également considérer le poids de la nature des sols. Les sols à texture légère en surface, donc plutôt « séchants », vont accentuer les problèmes de levée. Ainsi entre le sol 1 et le sol 2, de texture plus légère, la différence de durée de levée, négligeable dans le PR, s'accentue à la fois en moyenne (passant de 5 puis à 8 jours dans respectivement les FP et FL) et en variabilité * (fig. 10).

Irrigation de complément au printemps pour améliorer la qualité de l'huile

Selon le statut du colza dans la rotation et les débouchés envisagés, il peut être important de maintenir la qualité* de l'huile. Dans ce cas, une ou deux irrigations de complément au printemps seront à l'avenir très profitables.

F Incertitudes

Les incertitudes* que nous avons sur les prévisions climatiques, et qui sont bien représentées par les trois méthodes de régionalisation TT, QQ et ANO, provoquent en cascade des incertitudes sur la valeur des résultats agronomiques. Elles confirment, par analyse statistique, que certaines faibles évolutions de rendement obtenues avec la méthode TT (fig. 1) ne sont pas significatives : cas de Rennes, Toulouse, Avignon ou Mons. Toutefois, ces incertitudes ne remettent pas en cause les tendances générales, ainsi que peuvent l'illustrer les figures 11 : en effet, ni les conclusions sur l'aggravation de la phase de levée, ni celles sur la diminution de l'azote absorbé par tonne de colza produit ne sont changées.

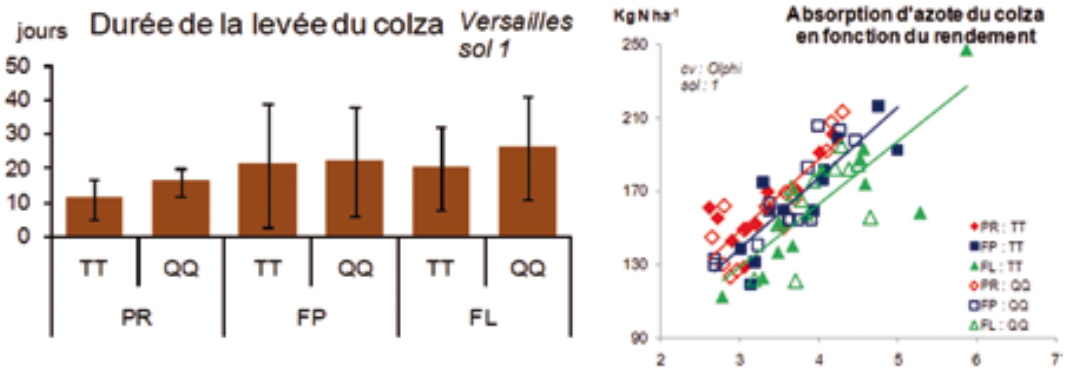


Figure 11 *: influence de la méthode de régionalisation sur les résultats agronomiques a) durée de levée (à mettre en relation avec la figure 10) et b) relation azote absorbé-rendement pour l'ensemble des sites par période (à mettre en relation avec la figure 6).*

Ce qu'il faut retenir

- ✓ Le colza présente des atouts face au changement climatique. Avec une diminution puis une disparition des risques de gel létaux pendant l'hiver, les sites du Nord-Est et du Centre-Est deviennent terres d'accueil pour la culture. Protégé par ses besoins photopériodiques et vernalisants, le cycle du colza conservera une durée non pénalisante pour le rendement. Au sein de la rotation, le précédent colza pourra fournir davantage d'azote aux céréales d'hiver.
- ✓ Si sa phénologie*, couplée à un bon enracinement, lui permet d'esquiver les sécheresses pendant le remplissage des graines (même avec des variétés à cycle long), le colza sera en revanche gravement confronté aux sécheresses de début de cycle, en particulier au moment de son implantation. Cet aspect constitue sa principale fragilité face au changement climatique. Ces sécheresses automnales mettent en péril non seulement l'installation de la culture, mais également son absorption d'azote pendant la phase végétative et la qualité de l'huile en fin de cycle, et ce en particulier dans les zones traditionnelles de la culture dans le Centre-Nord. Ce déficit d'absorption azotée empêche le colza de bien valoriser l'augmentation du CO_2 atmosphérique. Pour esquiver un petit peu ces difficultés d'absorption d'azote, il sera préférable d'utiliser des variétés à montaison rapide. Les régions de l'Ouest, un peu moins touchées par ce problème, apparaissent comme des zones refuges pour la culture du colza.
- ✓ On peut toutefois envisager de retarder les semis et d'utiliser des irrigations de complément ponctuelles pour stimuler la levée et l'absorption d'azote.
- ✓ Si les incertitudes sur le climat à venir introduisent des variations autour des résultats chiffrés, elles ne remettent pas en cause les tendances et les conclusions ci-dessus.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ Il est indispensable d'envisager une étude spécifique sur l'évolution des maladies et des parasites du colza sous l'effet du changement climatique, car de cette évolution dépend une éventuelle diminution du nombre de traitements et la durabilité de la culture.
- ✓ Les solutions d'adaptation ont justes été esquissées, elles doivent être affinées. D'autres solutions sont peut être envisageables, en lien avec la génétique, comme par exemple la capacité des graines et des plantules à supporter des semis plus profonds.
- ✓ Au plan méthodologique, il serait bon d'utiliser un autre modèle de culture* pour intégrer l'incertitude agronomique aux résultats.

Pour en savoir plus…

CETIOM, 1988 – *Colza : Physiologie et élaboration du rendement*. 158 p.

CETIOM, 2000 - *Rencontres annuelles du CETIOM sur le Colza*, Paris, 30/11/2000. 34 p.

Colnenne C., Meynard J.-M., Roche R., Reau R., 2002 - Effects of nitrogen deficiencies on autumnal growth of oilseed rape. *Europ. J. Agronomy* 17 : 11-28.

Dejoux J.-F., Meynard J.-M., Reau R., Roche R., Saulas P., 2003 - Evaluation of environmentally-friendly crop management systems based on very early sowing dates for winter oilseed rape in France. *Agronomy* 23 : 725-736.

Éléments sur le changement climatique et la culture du tournesol

Lydie Guilioni, Nadine Brisson, Frédéric Levrault

C 6
Tournesol

A Quelques éléments clés sur la culture du tournesol en France

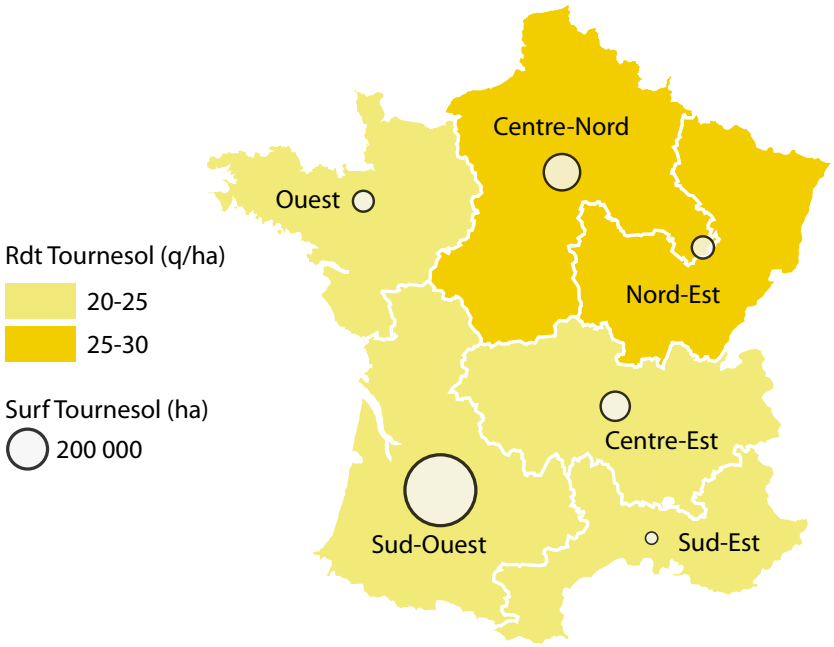


***Figure 1** : rendements et surfaces emblavées en tournesol dans les régions CLIMATOR. Moyennes 2000-2007. Source Agreste.*

Occupant près de 660 000 hectares en France, soit 2,5 % de la SAU nationale, le tournesol est à l'origine de la deuxième huile produite et consommée en France, après l'huile de colza. Il est également utilisé en alimentation animale sous forme de tourteaux et fourrage, ainsi que pour la chimie végétale (agrosolvants, biolubrifiants, agrocarburants).

Le tournesol est une culture de printemps à besoins modérés en eau, dont les rendements agricoles par zone* CLIMATOR oscillent entre 21 et 27 quintaux par hectare (moyennes 2000 à 2007). Il se satisfait de conditions hydriques relativement contraignantes, valorise particulièrement bien une irrigation de complément, facilite la gestion de la flore adventice dans les rotations* céréalières et joue un rôle favorable sur la structure du sol.

Actuellement, il est plus particulièrement présent dans la zone Sud-Ouest où il occupe 7 % de la SAU (moyenne 2000 à 2007). Le réchauffement climatique devrait étendre les possibilités de culture dans les zones actuellement plus fraîches du territoire.

B Protocole de simulation de CLIMATOR

Le tournesol a été étudié 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).

Sites	12 sites métropolitains dont un site d'altitude
Système	Monoculture (TT) et rotation (TBSB) : tournesol - blé tendre - sorgho - blé dur
Conduite	Pluviale, semis le 10/04 en standard, 60 kg N ha^{-1} au semis, récolte avant le 30/09 en rotation et le 31/10 en monoculture
Sols	Sol 1 : sol de limon profond à réserve utile* élevée (226 mm) et fertilité moyenne Sol 2 : rendzine à faible réserve utile (104 mm) et faible fertilité
Variété	Prodisol (cycle court) et Mélody (cycle long)
Modèle	SUNFLO (TT) et STICS (TT et TBSB)
Climat	SRES : A1B*, ARPÈGE, méthodes de régionalisation* : TT*, QQ *et ANO*

Quelques essais prospectifs sur les dates de semis ont également été réalisés ponctuellement pour les sites de Toulouse et Colmar :

- test d'une gamme de dates de semis élargie du 01/03 au 30/05 avec le modèle SUNFLO ;
- calcul des dates de semis de façon à optimiser la croissance de la plantule (température suffisante, absence de gelées, teneur en eau du sol ni trop humide, ni trop sèche) avec le modèle STICS.

C Carte d'identité écophysiologique du tournesol dans le contexte du changement climatique

Atouts

Le tournesol est une plante en C3 et cet atout de son fonctionnement photosynthétique lui permettra de bien valoriser l'augmentation de la teneur en CO_2 de l'atmosphère. De plus, le tournesol dispose de plusieurs mécanismes d'adaptation à la sécheresse qui, dans les conditions de déficit hydrique futures, lui procurent quelques avantages. Il s'agit en particulier de sa capacité à garder les stomates ouverts plus longtemps, dans des conditions d'alimentation en eau limitantes, qui prolonge la croissance au début de l'installation du stress hydrique. Dans le même temps, le tournesol réduit fortement sa surface foliaire en limitant la croissance de son feuillage ou en accélérant sa sénescence. Ce mécanisme pénalise le rendement en conditions hydriques défavorables, mais confère au tournesol une grande plasticité dès le retour à de meilleures conditions.

Faiblesses

À cause de son cycle estival, le tournesol sera, comme toutes les cultures, soumis à l'anticipation des stades phénologiques induite par l'augmentation de température, mais il sera également pénalisé par une réduction de la phase de remplissage des graines, car l'avancée de la phase en milieu d'été amplifiera le réchauffement climatique subi. On peut craindre que ces conditions de remplissage aient aussi un impact négatif sur la formation des graines dont l'embryogenèse est perturbée au-delà d'une température maximale de 32 °C. Par ailleurs, cultivé le plus souvent en pluvial, de bonnes conditions d'implantation sont essentielles à la réussite de la culture ; or il est probable que l'état hydrique des premières couches de sol soit moins favorable à l'avenir.

D Impacts du changement climatique sur la culture du tournesol

La productivité

Alors que dans les zones actuelles de production, le rendement évolue peu en moyenne, on observe une forte extension de la zone de culture du tournesol entre le passé récent (PR*) et le futur proche (FP*) au nord de la France. En analysant les résultats plus en détail, nous notons que les cartes de la figure 2, représentant deux extrêmes en termes de conditions pédologiques, montrent qu'un sol avec une bonne réserve utile autorise une légère augmentation des rendements en moyenne. Mais la variabilité* interannuelle augmente.

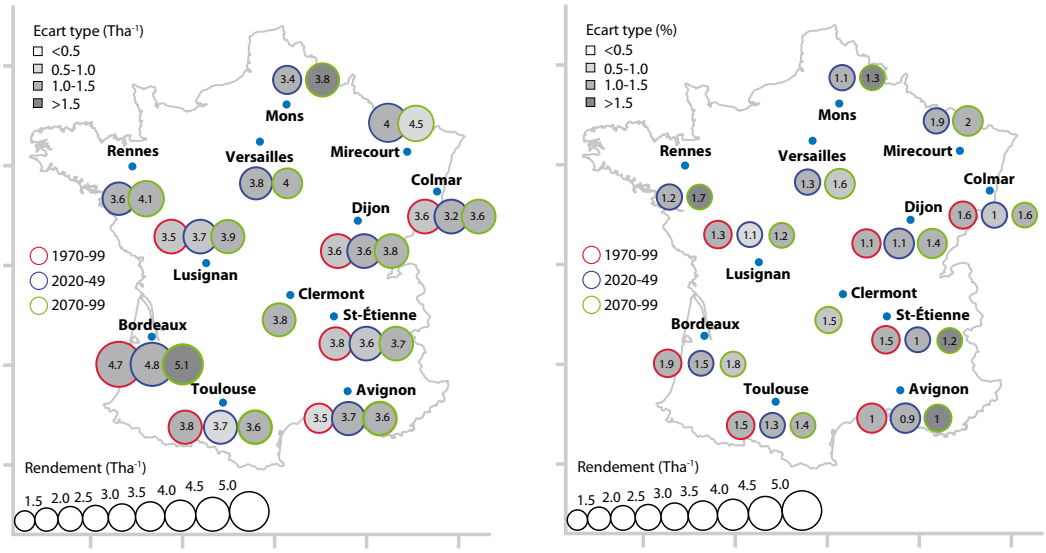


***Figure 2** : évolution du rendement du tournesol en rotation sur l'ensemble des sites (modèle STICS) pour le sol 1 à gauche et le sol 2 à droite et le climat TT, avec les variétés Mélody à Bordeaux, Toulouse et Avignon et Prodisol ailleurs.*

Si l'on tient compte de cette variabilité interannuelle (tab. 1), on s'aperçoit que, pour les sites traditionnels de culture du tournesol, le rendement n'évolue pas significativement et que l'augmentation générale se fait au bénéfice des marges Nord ou d'altitude : Clermont-Theix, Mirecourt, Mons, Versailles et Rennes.

Pourtant le nombre de jours où la photosynthèse* fonctionne sans restriction thermique augmente partout : elle passe par exemple de 25 en PR à 40 en FP, puis 50 en futur lointain (FL*) à Colmar et de 40 en PR à 50 en FP, puis 60 en FL à Toulouse. C'est donc que des contraintes majeures s'exercent sur la culture.

	FP-PR	FL-PR
Avignon	ns	ns
Bordeaux	ns	0.4
Clermont	0.6	3.9
Colmar	ns	ns
Dijon	ns	ns
Lusignan	ns	ns
Mirecourt	2.7	3.2
Mons	1.9	2.2
Rennes	1.0	1.6
St-Étienne	ns	ns
Toulouse	ns	ns
Versailles	1.4	1.6
Tous sites	**0.6**	**1.1**

Tableau 1 : *évolution des rendements de tournesol en rotation (sol 1, climat TT). La significativité de l'évolution par rapport à la variabilité interannuelle est notée de la façon suivante :* **Gras** *(p < 0.01), Italique (p < 0.05), ns (non significatif).*

Phénologie

Sans changements variétaux, on observe une 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. 3) : 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 (effet plus marqué sur la variété à cycle long).

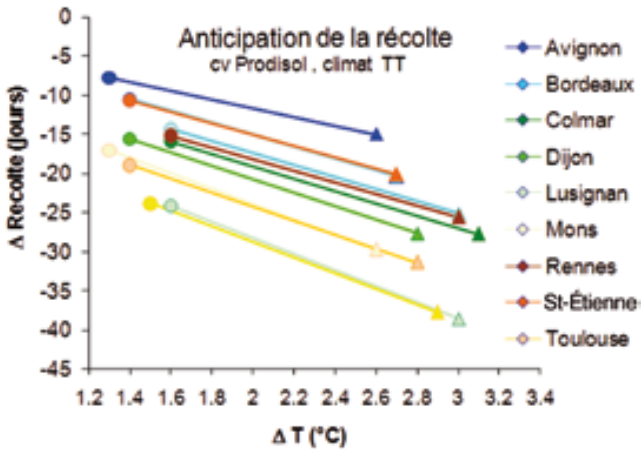


Figure 3 *: anticipation de la récolte du tournesol (cv Prodisol) pour la méthode de régionalisation TT. Les ● correspondent à FP-PR et les ▲ à FL-PR*

Si l'on regarde de près la durée des stades (fig. 4), on remarque que 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. On observe qu'à Toulouse le raccourcissement de la levée atteint un seuil (cf. § E) à cause de l'assèchement du lit de semence qui agit en sens inverse.

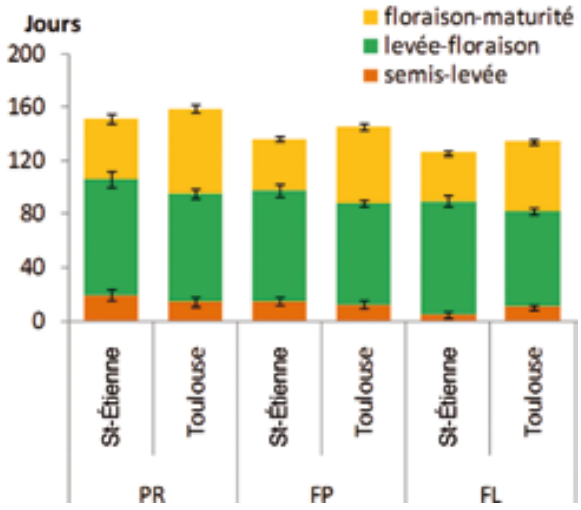


Figure 4 *: décomposition du cycle pour Toulouse (cv Mélody) et Saint-Étienne (cv Prodisol) avec STICS et méthode de régionalisation du climat TT.*

C'est cette nouvelle donne phénologique* qui permet l'extension de la culture du tournesol vers le Nord dans des rotations à base céréalière, comme le montre la figure 5.

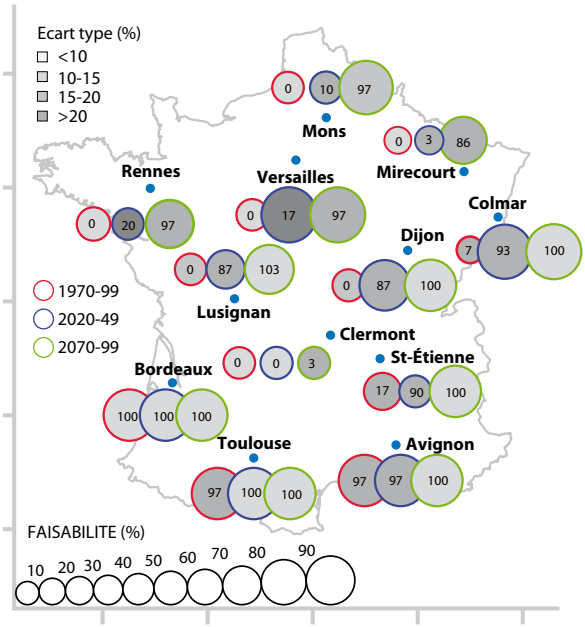


Figure 5 *: faisabilité de Mélody en rotation TBSB pour la méthode de régionalisation TT.*

Stress hydrique

La culture du tournesol, traditionnellement conduite en pluvial, sera confrontée à des contraintes hydriques de plus en plus prégnantes tout au long de son cycle, en particulier dans ses sites traditionnels comme le Sud-Ouest.

En début de cycle, si la levée ne semble pas trop menacée (même si un peu retardée : cf. § précédent) car le lit de semence conserve au mois d'avril une humidité compatible avec la germination, la croissance de la jeune plantule le sera. En effet, les risques de voir le sol (fig. 6 : couche 10-30 cm) se dessécher en deçà du point de flétrissement permanent augmente jusqu'à atteindre 25 % dans le FL à Toulouse.

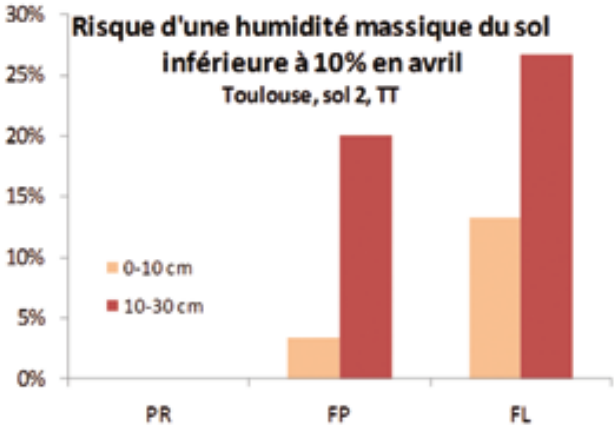


Figure 6 *: assèchement du sol pendant l'implantation du tournesol à Toulouse.*

Pendant la phase de remplissage (fig. 7), on assiste à une diminution du confort hydrique* (variable ETR*/ETM* : cf. fiche EAU) déjà très faible dans l'exemple du 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 (augmentation du confort hydrique entre FP et FL), qui seront bénéfiques au rendement (cf. fiche RENDEMENT) et indiquent ainsi une voie d'adaptation* par avancée des dates de semis (cf. § E).

Un déplacement de la zone de culture vers le Nord, autorisé par le réchauffement, permettrait de faire face à ce problème prégnant de stress hydrique* (fig. 7).

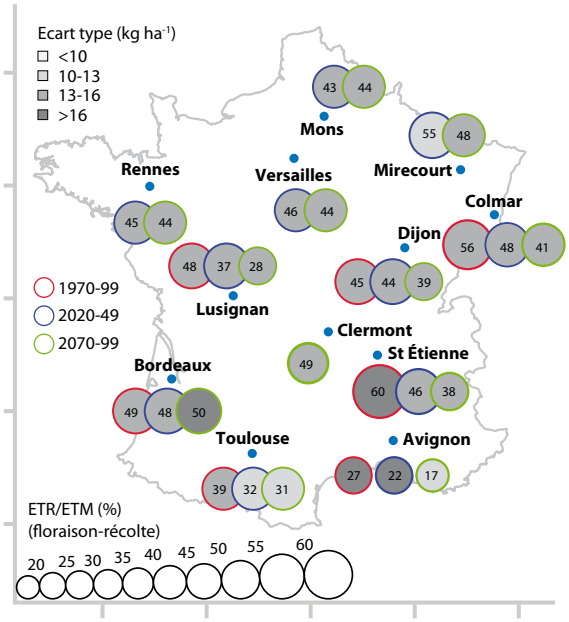


Figure 7 *: évolution de la satisfaction des besoins en eau (en %) pendant la phase de remplissage. SUNFLO, cv Prodisol au Nord et Mélody au Sud, sol 2, méthode de régionalisation du climat TT.*

Stress thermique

L'élaboration du rendement du tournesol est optimale à l'intérieur d'une certaine fenêtre thermique. En effet, au début du processus, l'initiation florale requiert des températures minimales au-dessus de 15 °C, alors que l'embryogenèse, 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 (fig. 8), c'est-à-dire que le premier diminue peu (ou tardivement) alors que le second augmente de façon importante (à date de semis fixée) dans les sites du Sud.

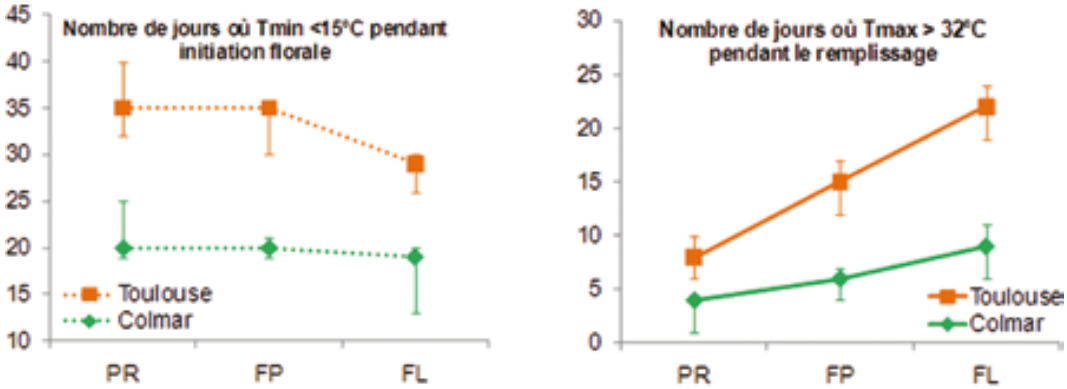


Figure 8 *: évolution des stress thermiques à Toulouse et Colmar en médiane (valeur centrale) et en 2° et 8° déciles (valeurs extrêmes). À gauche, stress de températures basses pendant l'initiation florale et à droite, stress de températures élevées pendant le remplissage des graines. Méthode de régionalisation du climat QQ.*

E Adaptations envisageables

Choix variétal

L'augmentation des disponibilités thermiques va permettre progressivement d'allonger les cycles culturaux* par l'utilisation de variétés à cycle plus long. Pour les deux précocités extrêmes testées dans le projet, on note (tab. 2) que le remplacement de Prodisol par Mélody se fait plus rapidement pour certains sites (Saint-Étienne) que pour d'autres (Dijon, Lusignan), mais qu'à la fin du siècle l'ensemble des sites (sauf le site de montagne) seront aptes à cultiver une variété comparable à Mélody.

SITE	AVI	BOR	CLE	COL	DIJ	LUS	MIR	MON	REN	STE	TOU	VERS
PR	MEL	MEL	--	PRO	PRO	PRO	--	--	--	PRO	MEL	-
FP	MEL	MEL	--	PRO	PRO	PRO	PRO	PRO	PRO	MEL	MEL	PRO
FL	MEL	MEL	PRO	MEL	MEL	MEL	MEL	MEL	MEL	MEL	MEL	MEL

Tableau 2 : *variété testée dans le projet CLIMATOR qui optimise les disponibilités thermiques pour un semis du 10 avril parmi les deux variétés testées dans le projet : à cycle long (MÉLODY) et à cycle court (PRODISOL). '--' : quand la culture ne peut accomplir son cycle plus de 8 années sur 10. Méthode de régionalisation TT.*

La figure 9 montre que ces choix variétaux permettront de maintenir, voire d'augmenter les rendements.

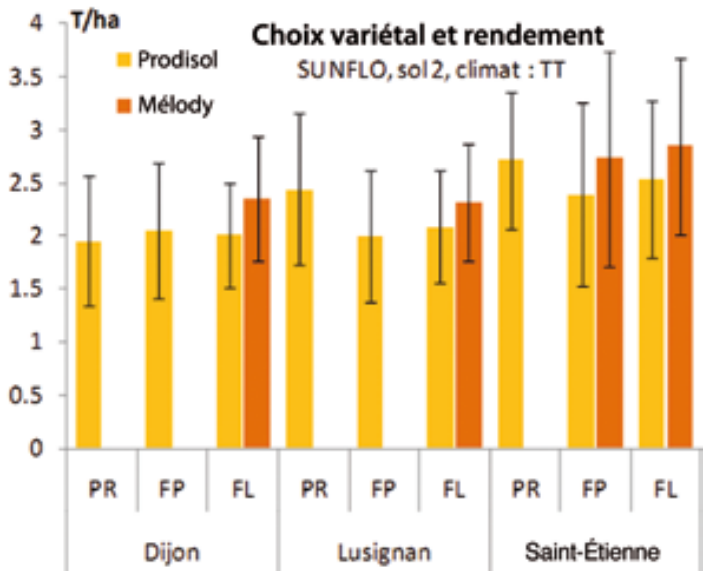


Figure 9 *: rendement du tournesol à Dijon, Lusignan et Saint-Étienne en optimisant le choix variétal. SUNFLO, sol 2, méthode de régionalisation du climat TT.*

Choix de la date de semis

Une autre façon d'allonger le cycle est d'avancer la date de semis (fig. 10). Les avancées testées ici ne tiennent pas compte des contraintes techniques de réalisation des semis, ni du succès de l'implantation, mais simplement des conséquences induites sur le rendement. Par rapport à la date prescrite du 10 avril, l'avancée paraît plus intéressante à Toulouse qu'à Colmar et surtout dans le FL où elle peut certaines années (2 années sur 10) augmenter le rendement de 80 % et surtout limiter les pertes de rendements les années très défavorables. À contrario, le retard du semis après la date prescrite est toujours pénalisant à Toulouse et le deviendra dans le FL à Colmar.

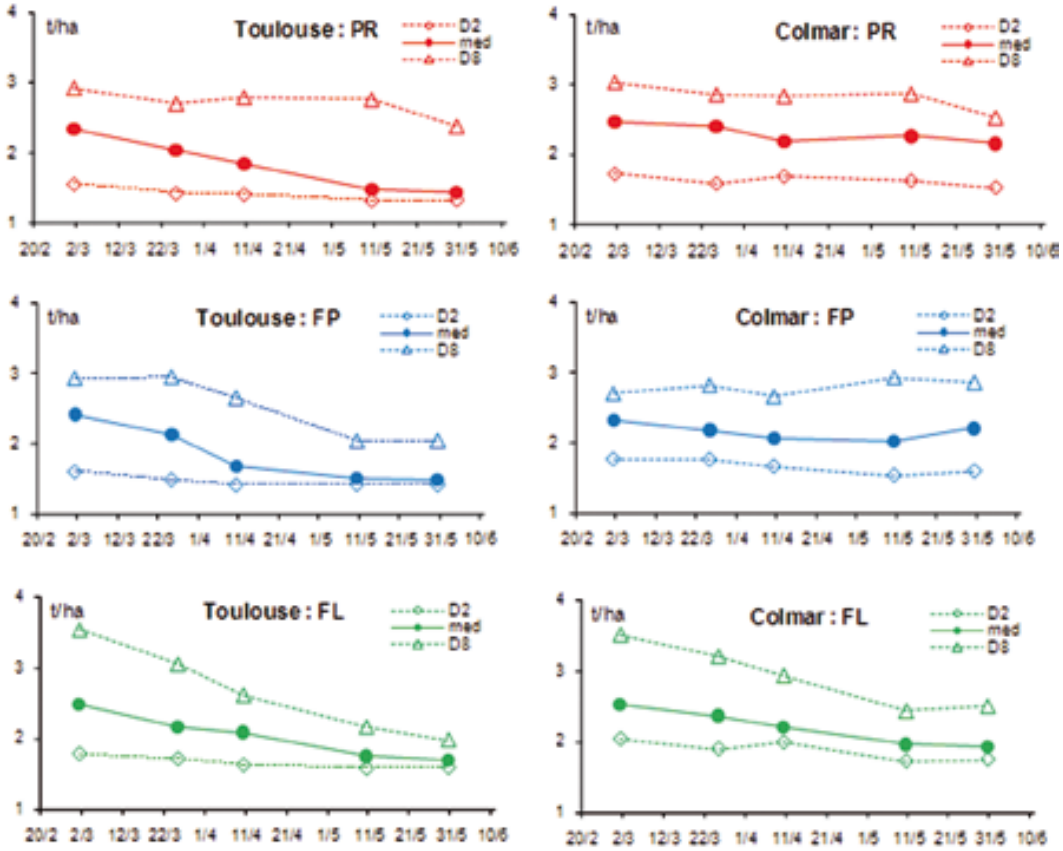


Figure 10 *: effet de la date de semis sur le rendement (médiane, 2° et 8° déciles) pour la variété Prodisol, simulé avec SUNFLO (sol 2, régionalisation du climat TT) à Toulouse et Colmar.*

Ces résultats s'expliquent un peu par l'esquive du stress hydrique pendant le remplissage à Toulouse (fig. 11), mais la principale explication est à rechercher ailleurs : l'avancée des semis permet tout d'abord une meilleure alimentation hydrique pendant la phase végétative et ensuite une esquive des stress thermiques de fin de cycle.

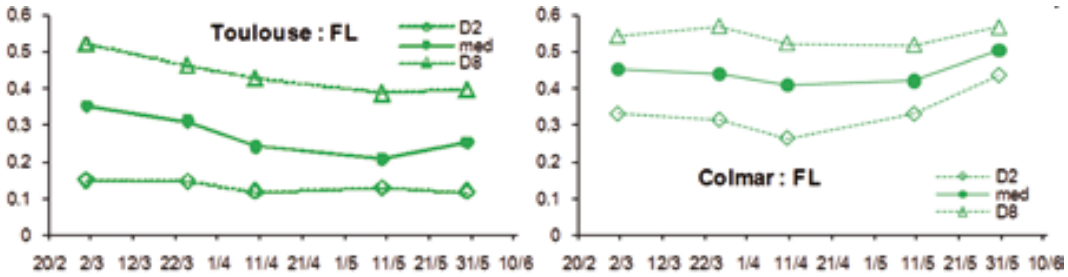


Figure 11 *: effet de la date de semis sur le confort hydrique pendant le remplissage (médiane, 2° et 8° déciles) pour la variété Prodisol, simulé avec SUNFLO (sol 2, régionalisation du climat TT) à Toulouse à gauche et Colmar à droite.*

Mais des contraintes techniques pèsent aussi sur la date de semis (sol pas trop humide), auxquelles s'ajoutent les contraintes liées à la physiologie de la germination et de la croissance de la jeune plantule pendant sa phase souterraine, de sorte que l'anticipation des semis se trouve limitée (fig. 12) : à Colmar, les semis pourront être avancés en moyenne du 20 au 5 avril et à Toulouse du 2 avril au 20 mars. On note dans le FL une tendance au retard des semis provoqué par l'assèchement du lit de semence.

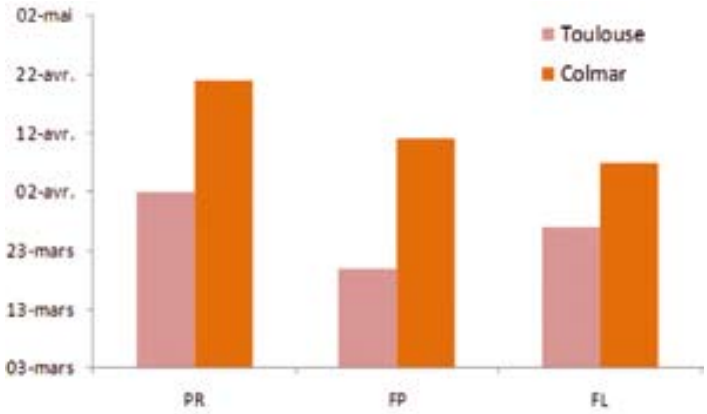


Figure 12 *: calcul de la date de semis optimisant l'implantation du tournesol (STICS, sol 1, régionalisation du climat TT) à Colmar et Toulouse.*

F Incertitudes

Les résultats proposés dans cette étude sont entachés d'incertitudes* (cf. fiche INCERTITUDES ET VARIABILITÉS). Nous pouvons cerner l'incertitude agronomique en analysant les différences majeures entre les deux modèles utilisés (STICS et SUNFLO : fig. 13).

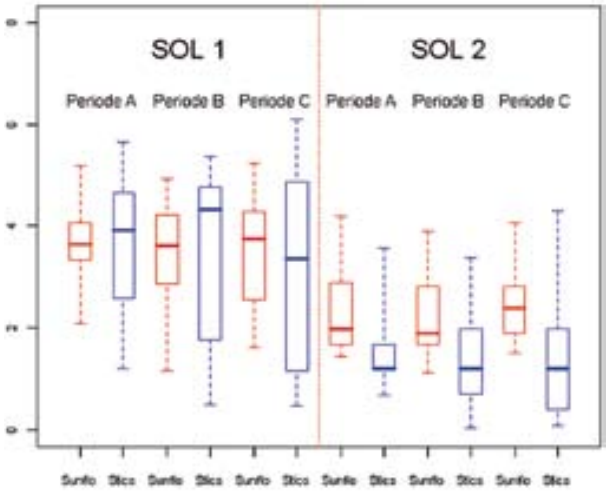


Figure 13 *: boxplots (avec valeurs extrêmes, médianes, 2° et 8° déciles) permettant de comparer les modèles STICS et SUNFLO à Toulouse pour le sol profond (1) et le sol superficiel (2). Les périodes sont identifiées par des lettres (A = PR, B = FP, C = FL).*

STICS est beaucoup plus variable et sensible au manque d'eau. Cette sensibilité joue, en particulier, en accélérant la sénescence du feuillage ou en limitant sa croissance en phase végétative. SUNFLO est beaucoup moins sévère, car il suppose cette sénescence induite par le stress hydrique négligeable. Il en résulte une production plus faible pour STICS en condition de sol superficiel, alors que sur un sol profond les deux modèles sont en moyenne très proches. STICS est également plus sensible à la sécheresse du FL. Cependant, en relatif, on trouve pour les deux modèles une faible évolution du rendement du tournesol à Toulouse.

Nous avons également testé l'incertitude climatique au travers des trois méthodes de régionalisation. Il apparaît que cette incertitude n'est pas significative sur l'estimation de l'anticipation des stades phénologiques, et ce quel que soit le modèle. En termes d'estimation de rendement, nous avons testé l'incertitude climatique avec le modèle le

plus sensible, c'est-à-dire STICS (fig. 14), et cette analyse démontre qu'à l'échelle du territoire le signal principal fourni par la tendance du climat est bien supérieur à l'incertitude qui entache cette tendance.

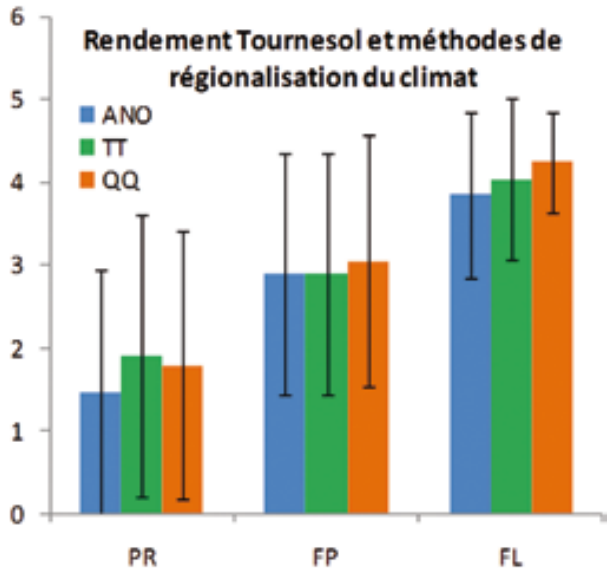


Figure 14 *: comparaison des rendements moyennés sur l'ensemble des sites pour les 3 méthodes de régionalisation. Modèle STICS et sol 1.*

Ce qu'il faut retenir

✓ 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 (cf. fiche IRRIGATION). 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.

Ce qu'il reste à étudier…

✓ Les interactions entre les effets des hautes températures et ceux du CO_2 sont méconnues et pourraient limiter les bénéfices de ce dernier. D'autres effets du changement climatique n'ont pas été abordés, comme l'impact sur les adventices et les pathogènes du tournesol. L'adaptation des pratiques n'a été que partiellement analysée pour deux sites : une étude plus systématique serait nécessaire.

Pour en savoir plus…

Casadebaig P., Debaeke P., 2008 - Exploring genotypic strategies for sunflower drought re-sistance by the means of a dynamic crop simulation model, in *Proceedings of the 17th International Sunflower Conference*.

Casadebaig P., Debaeke P., Lecoeur J., 2008 - Thresholds for leaf expansion and transpira-tion response to soil water deficit in a range of sunflower genotypes. *European Journal of Agronomy* 28, 646-654.

Debaeke P., Bertrand M., 2008 - Évaluation des impacts de la sécheresse sur le rendement des grandes cultures en France. *Cahiers Agriculture* 17 : 437-443.

Changement climatique et culture de la vigne : l'essentiel des impacts

Philippe Pieri

C7
Vigne

A Quelques éléments clés sur la vigne en France

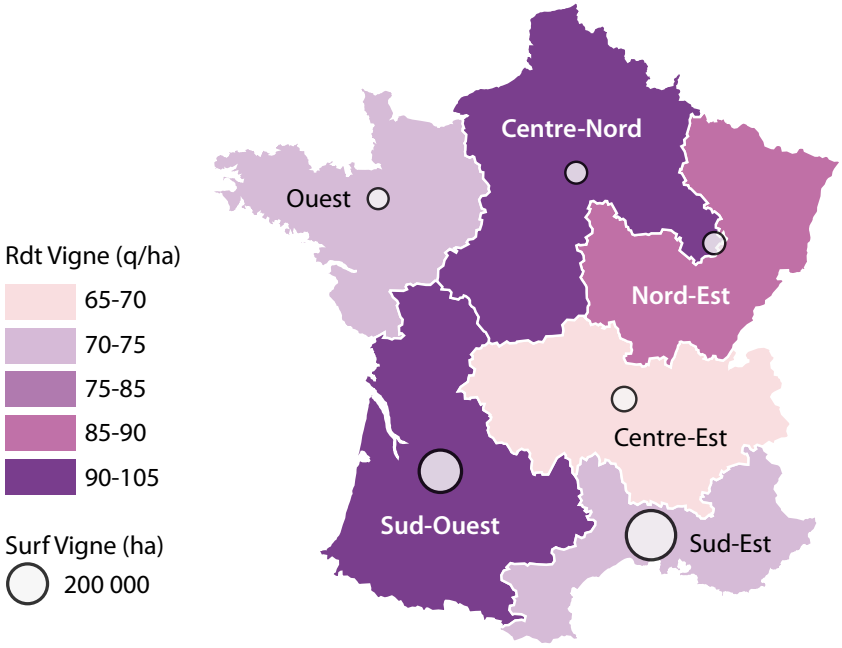


Figure 1 : *surfaces viticoles dans les régions CLIMATOR et rendements moyens. Moyennes 2000-2007. Source Agreste (voir aussi http://www.onivins.fr/pdfs/statiques/Localisation_du_vignoble_français.pdf).*

Le poids de la vigne dans l'économie agricole française est important. En effet, la vigne est l'une des premières productions agricoles en valeur brute, avec près de 9000 M€ de produit brut pour l'ensemble du pays (dont 2000 en Champagne et 1700 dans le Bordelais). C'est une culture qui profite d'une forte valeur ajoutée, comparativement aux autres productions agricoles. Le secteur viticole est aussi l'un des premiers employeurs agricoles. La production est segmentée en filières : raisin de table, vins d'appellation (VDP), autres vins et vins pour eau-de-vie. L'ensemble contribue fortement aux exportations nationales.

La vigne est une culture pérenne, souvent seule culture d'exploitations spécialisées. Les systèmes de production sont extrêmement variés, et fréquemment intégrés vigne-vin.

Il s'agit d'une culture où la valorisation économique de la qualité* est réelle et même primordiale. Or la qualité du produit est très sensible au climat* (« effet millésime » et, dans une certaine mesure, « effet terroir »). Une grande sensibilité au changement climatique est donc attendue. Le passé récent montre d'ailleurs des évolutions sensibles qui sont attribuées au changement climatique* (avancée de la phénologie* et des dates de vendanges, augmentation des concentrations en sucres, plus grande fréquence de bons millésimes, problèmes de maturité phénolique…).

Souvent (mais pas toujours) les résultats économiques sont découplés du rendement. La production repose sur des variétés (cépages) diverses, adaptées au climat de la région et au type de production. Dans les systèmes de production actuels, la vigne permet la valorisation de terrains « pauvres » ; c'est en effet une culture d'été mais économe en eau. La vigne joue également un rôle très important dans la constitution des paysages. La vigne et le vin sont donc à l'origine d'activités touristiques et culturelles notables.

B Protocole de simulation de CLIMATOR

Les résultats présentés reposent sur les simulations d'une vigne sur terrain horizontal, non enherbée, conduite en pluvial ou avec une irrigation d'appoint.

Sites	12 sites métropolitains dont un site d'altitude
Système	deux systèmes : un pluvial (VS) et un irrigué (VI) couplé à deux densités de plantation : 0,3 et 0,9 pl/m^2
Conduite	L'irrigation est une irrigation d'appoint satisfaisant 30 % des besoins en eau, 15 kg d'azote/ha sont apportés annuellement.
Sols	Sol 1 : sol commun de limon profond de grandes cultures à forte RU* (226 mm) Sol 2 : sol brun calcaire superficiel et faible RU (73 mm) Sol 3 : sol brun lessivé moyennement profond et RU de 150 mm
Cépages	Chardonnay, merlot et grenache qui diffèrent par la précocité à la floraison et la teneur en sucre requis à la récolte
Modèle	STICS, BHV, BOTRYTIS (cf. fiche SANTÉ)
Climat	SRES : A1B*, ARPÈGE, régionalisation* : TT*, QQ *et ANO*

C Carte d'identité écophysiologique de la vigne dans le contexte du changement climatique

Avantages

Dans les systèmes de production actuels, la vigne est une culture réputée pour sa tolérance* au manque d'eau. L'IF* généralement faible et la structure en rangs du couvert végétal contribuent à limiter la transpiration. Par ailleurs, le système racinaire des vignobles bien installés est souvent profond. Toutes les vignes en production sont greffées et une grande marge d'adaptation du porte-greffe serait potentiellement exploitable.

La qualité du raisin et du vin est globalement favorisée par un stress hydrique* modéré. L'évolution récente vers une plus grande fréquence de bons millésimes est attribuée à cet effet. Le changement climatique pourrait conduire à une résolution « automatique » des problèmes actuels de limitation de la vigueur végétative et des rendements. De même, il pourrait réduire les problèmes actuels de contrôle des maladies et donc amener à une réduction des intrants (cf. fiche SANTÉ).

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 », si besoin. De façon plus générale, il existe des marges de manœuvre liées à une très grande capacité d'adaptation* : cépage, porte-greffe, densité, enherbement, irrigation, fertilisation et autres opérations culturales…

On peut s'attendre également à une réduction des risques de gel de bourgeons et jeunes rameaux au printemps, si l'anticipation* phénologique ne met pas en phase débourrement et gels printaniers.

La vigne étant une culture pérenne, le changement climatique devrait favoriser l'activité photosynthétique post-vendanges et la reconstitution des réserves. Enfin, en tant que culture en C3, la vigne est réactive à l'augmentation de la concentration en CO_2, en particulier par l'effet antitranspirant du CO_2 ; on peut s'attendre à une amélioration de l'efficience d'utilisation de l'eau (WUE) en cas de sécheresse.

Inconvénients

La phénologie est fortement liée aux températures, donc pour une culture d'été, dont la maturation se situe après le maximum annuel des températures, le changement climatique devrait se traduire par une avancée de tous les stades phénologiques* et donc une maturation dans des conditions beaucoup plus chaudes et sèches.

De plus, 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. Autrement dit, on pressent de forts risques de dégradation de la qualité liée aux températures élevées pendant la maturation

D Les impacts du changement climatique sur la culture de la vigne, son fonctionnement et sa conduite

Phénologie et faisabilité

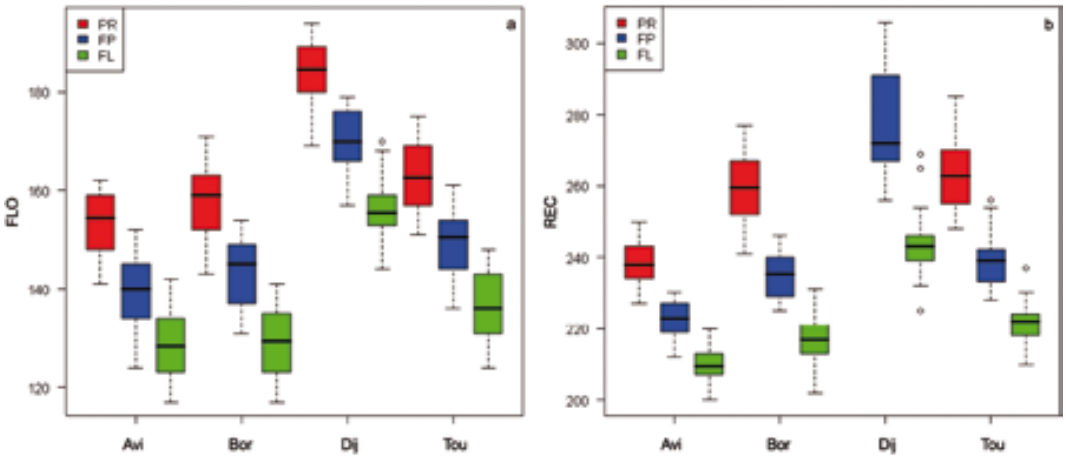


Figure 2 *: évolution des dates de floraison (a) et de récolte (b) simulées par BHV pour 4 sites viticoles. Cépage merlot, climat A1B, méthode de régionalisation* TT.*

La phénologie étant liée aux températures cumulées, le changement climatique se traduit par une avancée généralisée des différents stades phénologiques (fig. 2), et ce quelles que soient la variété et la méthode de régionalisation choisies (cf. fiche TIMING). Pour la date de floraison, cette évolution ne s'accompagne pas de changement notable de la variabilité* interannuelle. Pour la date de récolte, une évolution similaire est observée avec une tendance à la baisse de la variabilité ; 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 également par une baisse de la variabilité interannuelle. Pour les sites déjà viticoles, l'ensemble du cycle de culture serait avancé de 20 à 40 jours entre passé récent (PR*) et futur lointain (FL*).

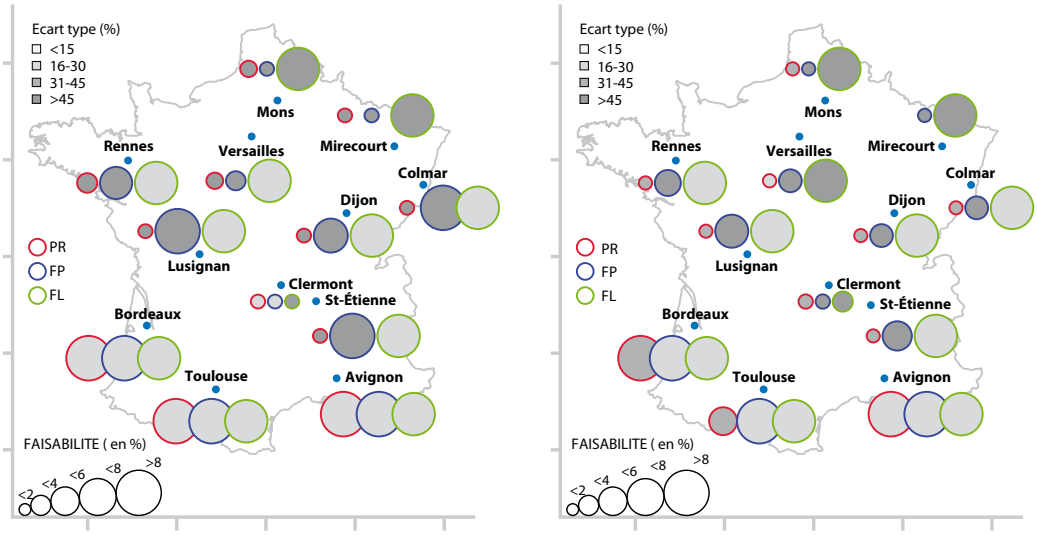


Figure 3 *: faisabilité*, moyennes sur 30 ans et écarts-types, cépage merlot, climat A1B, méthode de régionalisation TT (gauche) et QQ (droite).*

L'évolution de la faisabilité de la culture en différents lieux pour différentes variétés traduit simplement l'avancée de la phénologie et donc l'extension vers le nord de la zone de production potentielle (fig. 3) (cf. fiche GÉOCLIMATOLOGIE). La réduction de la variabilité dans le FL permettra, par exemple, à des sites comme Colmar, Versailles ou Rennes d'envisager la culture du merlot

sans plus de risques qu'à Bordeaux dans la période actuelle. Cette évolution est la même pour les deux méthodes de régionalisation représentées en figure 3.

Niveaux de production

Figure 4 *: évolution relative des niveaux de rendement pour 4 sites viticoles (les rendements en valeur absolue sont très différents), systèmes « secs », modèle STICS.*

Les niveaux de rendement et leur évolution simulés sont extrêmement variables selon les systèmes de culture* considérés (cépage x sol x densité x irrigation ou non) qui mettent en jeu des combinaisons de facteurs limitants divers. Pour les exemples présentés (fig. 4), la baisse constatée à Avignon et Toulouse peut être attribuée à l'effet d'un risque de stress hydrique croissant, tandis que l'augmentation à Dijon et Bordeaux est liée à un calendrier phénologique plus favorable, qui permet de valoriser la concentration en CO_2 croissante.

Confort hydrique

Le niveau de confort hydrique* de la vigne est évalué au moyen du rapport ETR*/ETM* moyen pendant la période floraison-maturation (cf. fiche EAU). Ce rapport est naturellement relié de manière déterministe au bilan hydrique pendant la même période phénologique. Nous constatons que, 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 Saint-Étienne accusent une franche diminution du rapport ETR/ETM. L'évolution future du rapport ETR/ETM est faible pour le site d'Avignon où le bilan hydrique climatique est déjà largement déficitaire. De même, à Bordeaux, l'évolution reste négligeable malgré un fort « assèchement » du bilan hydrique climatique (P-ET0), mais qui ménage encore quelques pluies estivales de sorte que les conditions ne sont pas très déficitaires.

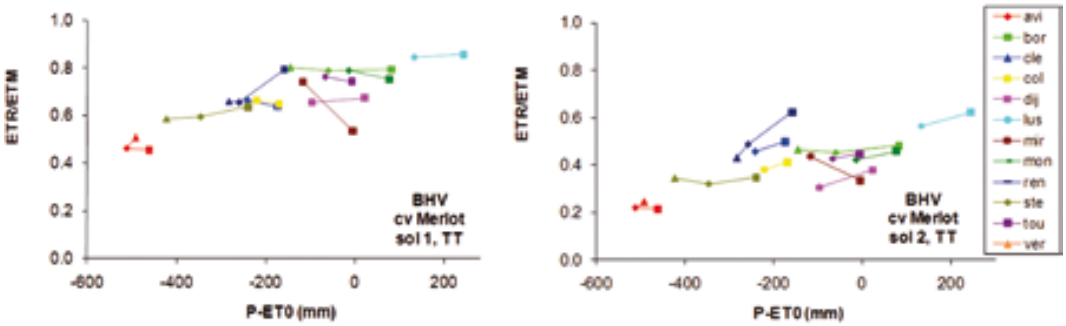


Figure 5 *: ETR/ETM moyen pendant la période floraison-maturation en fonction de l'indicateur climatique annuel de bilan hydrique (P-ET0), moyennes sur 30 ans, périodes PR (■), FP (◆), FL (▲), climat A1B, méthode de régionalisation TT, cépage merlot, sol 1 commun (à gauche) et sol 2 (à droite), densité 0.9, modèle BHV.*

En moyenne sur 30 ans, le rapport ETR/ETM reste corrélé à l'indicateur climatique annuel de bilan hydrique, P-ET0 (fig. 5), dès que celui-ci descend en dessous de –200 mm. Cet indicateur constitue donc un bon prédicteur de l'évolution du niveau de satisfaction des besoins en eau de la vigne. Les nouveaux sites où la culture de la vigne devient possible dans le futur se situent plutôt sur

le plateau au-delà de la valeur P-ET0 de –200 mm et semblent donc à l'abri d'une détérioration du confort hydrique. Mons apparaît comme un cas particulier où se dessine une amélioration à cause d'une interaction climatique favorable. L'allure de cette relation générale (plateau puis décroissance en fonction de la diminution de P-ET0) est modulée par les spécificités du système de culture.

Ainsi, l'effet de la réserve utile du sol est prépondérant et se traduit par un déplacement général du niveau du rapport ETR/ETM, sans changement notable de la pente dans la partie linéaire de la relation. La densité de plantation intervient au second ordre, car la baisse de transpiration de la vigne est largement compensée par l'augmentation d'évaporation de la surface du sol. En moyenne, la variété a également une influence assez réduite sur le rapport ETR/ETM, 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 donc d'autant moins sensible que la réserve utile du sol est plus grande et joue un rôle « tampon ».

Stress thermique et indice de qualité

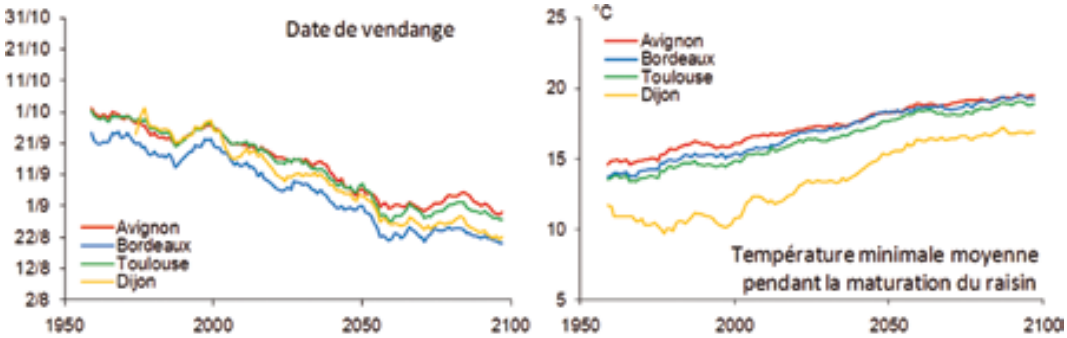


Figure 6 *: conséquences du changement climatique sur l'anticipation de la date de récolte (à gauche) et l'élévation de la température minimale moyenne pendant la maturation (véraison-maturité) (à droite) pour 4 sites et systèmes de culture « traditionnels » associés à ces sites.*

Comme la vigne est une culture d'été dont la récolte a lieu après les maxima de température annuels, l'avancée du calendrier phénologique (fig. 6 gauche) reporte la période de maturation plus tôt en été, donc dans des conditions généralement plus chaudes et plus sèches. L'avancée phénologique accentue donc l'effet du réchauffement de l'atmosphère et les températures réellement ressenties par les plantes et le raisin en cours de maturation devraient augmenter bien au-delà de l'échauffement moyen de l'atmosphère (fig. 6 droite). Par ailleurs, des études ont montré la pertinence d'un indicateur dit de « fraîcheur de nuits » pour la qualité de la vendange, en particulier du point de vue aromatique (Tonietto and Carbonneau, 2004). L'évolution prévisible de cet indicateur (QUAL : température minimale moyenne pendant la maturation) montre un changement drastique des conditions de maturation allant vers une dégradation de la qualité du raisin (fig. 5 droite). Même simple, cet indice est un bon révélateur d'impacts potentiellement négatifs du changement climatique sur la qualité du raisin, et en particulier sur la teneur en composés phénoliques. Cette interprétation est confortée par les problèmes de retard de maturité phénolique constatés ces dernières années.

Bilan environnemental : produits phytosanitaires et eau

En matière de consommation en intrants phytosanitaires, les impacts du changement climatique seront contrastés. Les simulations concernant Botrytis sur merlot indiquent que le niveau de risque épidémique, et donc le nombre de traitements, diminuera pour les sites du Sud où le cépage est déjà faisable actuellement, mais sera élevé pour les sites du Nord où il deviendra faisable. Par extrapolation à l'ensemble des maladies fongiques, le recours aux intrants phytosanitaires pourrait donc diminuer dans les régions déjà viticoles et être important pour les nouvelles régions viticoles (cf. fiches SANTÉ et GÉOCLIMATOLOGIE).

En matière de bilan hydrologique sous vigne, le changement climatique se traduit presque partout par une baisse très sensible de la restitution d'eau au milieu, c'est-à-dire aux nappes en profondeur. Cette restitution d'eau et son évolution future sont évaluées par la variable PERCOL* qui quantifie ce flux en cumul annuel sur l'année agricole, c'est-à-dire du 01/10 au 30/09 (cf. fiche EAU).

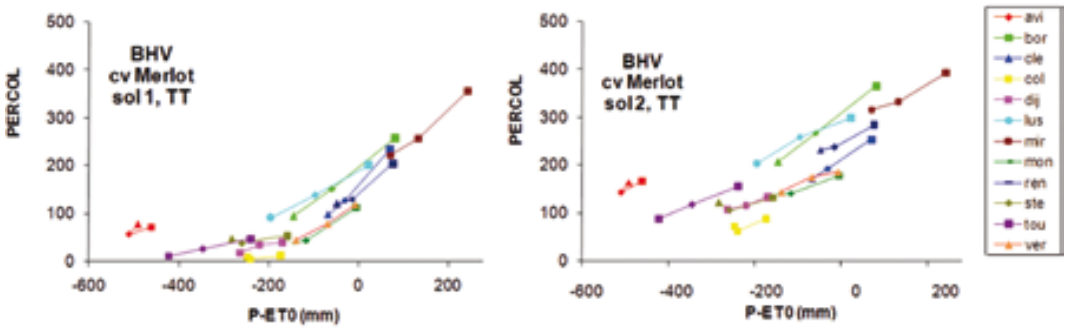


Figure 7 *: PERCOL moyen pendant l'année (mm) en fonction de l'indicateur climatique annuel de bilan hydrique (P-ET0) (mm), moyennes sur 30 ans, périodes PR (■), FP (◆), FL (▲), climat A1B, méthode de régionalisation TT, cépage merlot, sol 1 commun (à gauche) et sol 2 (à droite), densité 0.9, modèle BHV.*

PERCOL varie en fonction de l'indicateur climatique annuel de bilan hydrique (P-ET0), avec une relation linéaire lorsque P-ET0 est excédentaire ou peu déficitaire et un amortissement lorsque PERCOL s'approche de 0, son plancher physiquement infranchissable (fig. 7). Comme pour le confort hydrique, P-ET0 constitue donc une variable explicative facile d'emploi pour la prévision des répercussions du changement climatique sur PERCOL. Dans les conditions de bilan hydrique climatique peu ou pas déficitaires, la pente de la relation est proche de 1. Quand P-ET0 devient déficitaire, seul le site d'Avignon se distingue, probablement à cause de la forte intensité des pluies d'automne, spécificité du climat méditerranéen. L'impact du changement climatique est alors réduit, même si P-ET0 évolue fortement, comme par exemple à Toulouse, et négligeable à Avignon.

Cette relation est également modulée par les différents paramètres du système de culture, en premier lieu par la réserve utile du sol : une réserve plus importante permet de stocker de l'eau qui sera évaporée ou transpirée vers l'atmosphère, et donc de réduire PERCOL (cf. fiche EAU, fig. 7). Par le jeu des diverses compensations, la densité de plantation et la variété n'ont pas d'influence significative sur cette variable.

Incertitudes et hiérarchisation

Les incertitudes attachées aux prévisions climatiques* à long terme sont évaluées par les différences apparaissant entre séries climatiques issues de méthodes de régionalisation différentes (TT, QQ et ANO) pour un même scénario SRES (A1B). Au travers des modèles, elles se répercutent sur des incertitudes affectant les résultats agronomiques. Pour une variable peu filtrée par les modèles, comme QUAL, ces incertitudes sont directement apparentes. La méthode TT a par exemple tendance à réduire l'intensité de l'évolution liée au changement climatique (fig. 8). Cependant, la tendance générale dans l'évolution de la variable reste toujours cohérente. Le risque de dégradation de la qualité du raisin est donc bien confirmé.

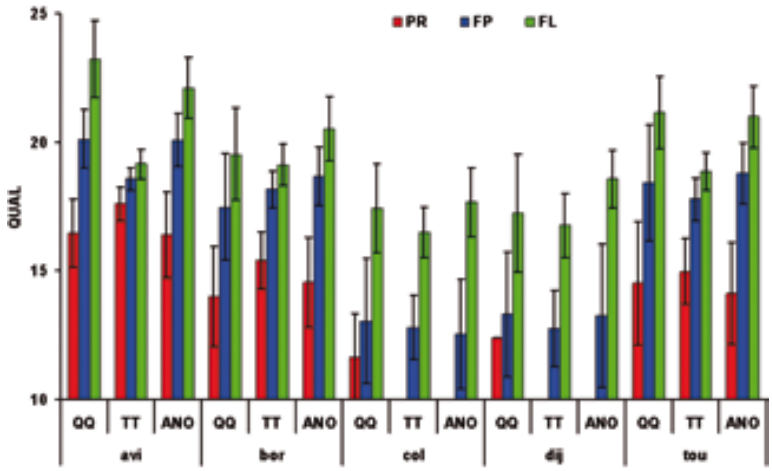


Figure 8 *: évolution de QUAL (moyennes trentenaires et écarts-types) en fonction de la méthode de régionalisation (QQ, TT et ANO) pour plusieurs sites viticoles. Cépage merlot, modèle BHV.*

D'autres variables, issues des modèles de culture, résultent de processus complexes et cumulatifs pouvant donner lieu à des interactions. Dans ce cas, l'incertitude globale, beaucoup moins prévisible, incorpore également l'incertitude produite par les modèles d'impact. Une analyse de la variance permet alors de hiérarchiser ces incertitudes croisées et de quantifier les interactions. Les résultats montrent, par exemple pour la variable ETR/ETM, l'importance des interactions et de forts effets du modèle (fig. 9). Ces résultats amènent à considérer avec prudence les prévisions concernant cette variable où l'effet du changement climatique est peu marqué.

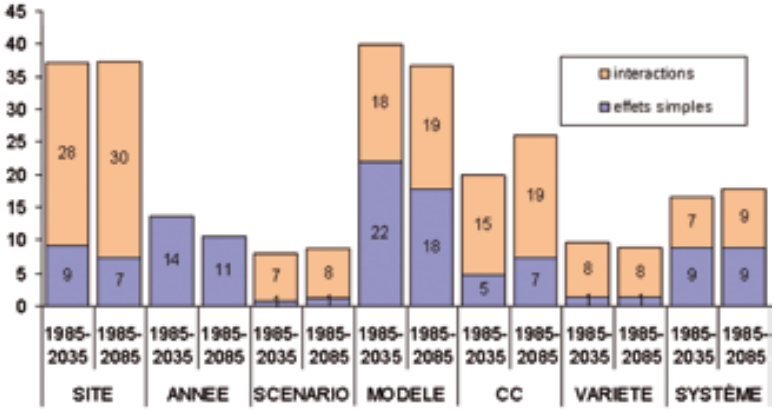


***Figure 9** : analyse de la variance de la variable ETR/ETM (expression en % de variance associée) pour les évolutions PR-FP et PR-FL. Décomposition en effets simples et interactions. L'effet année à l'intérieur de chaque période trentenaire correspond à la variance résiduelle.*

Adaptation et optimisation

La démarche consiste à examiner, en un lieu donné, quelle combinaison des modalités cépage x sol x densité de plantation x (système sec/irrigué) pourrait permettre de conserver à l'identique ($\delta = 0$ en moyenne trentenaire avec PR comme période de référence) ou de peu modifier certaines des variables d'intérêt (FLO*, REC*, ETR/ETM, PERCOL, QUAL) considérées séparément. Les résultats de cette tentative d'optimisation sont encore préliminaires, mais ils peuvent donner des indications quantifiées sur les marges de manœuvre potentielles.

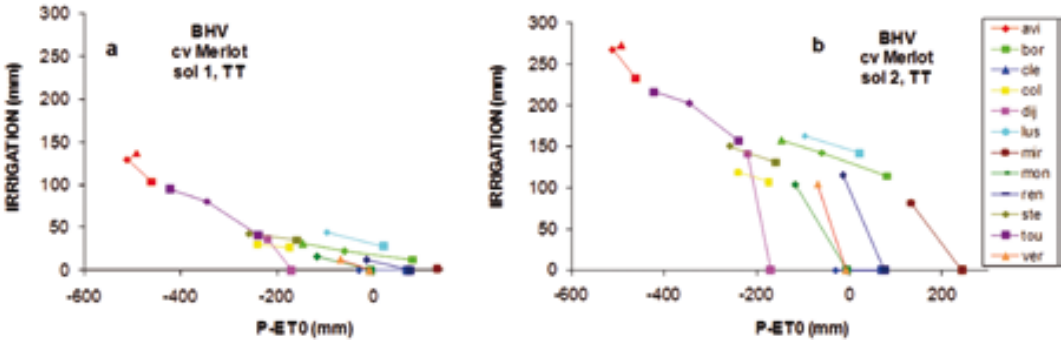


***Figure 10** : quantité totale annuelle d'eau d'irrigation (mm) nécessaire et suffisante pour maintenir ETR/ETM à 0,3 au moins en fonction de l'indicateur climatique annuel de bilan hydrique (P-ET0) (mm), moyennes sur 30 ans, périodes actuelle (■), FP (◆), FL (▲), climat cer1_A1B, cépage merlot, sol 1 (à gauche) et sol 2 (à droite).*

L'irrigation est un moyen de maintenir le confort hydrique des plantes, si de l'eau reste disponible. L'évolution des besoins en eau d'irrigation a été simulée par les modèles STICS et BHV, sur la base d'un protocole économe en eau (goutte-à-goutte enterré, maintien de ETR/ETM à 0,3 ou plus). Sans surprise, le changement climatique provoque clairement une augmentation des besoins en irrigation, surtout pour les climats les plus déficitaires en eau et pour les sols à faible RU (fig. 10). La puissance de l'indicateur climatique annuel de bilan hydrique (P-ET0) se confirme puisque, dès qu'ils ne sont pas nuls, les volumes d'eau d'irrigation nécessaires varient linéairement avec le déficit.

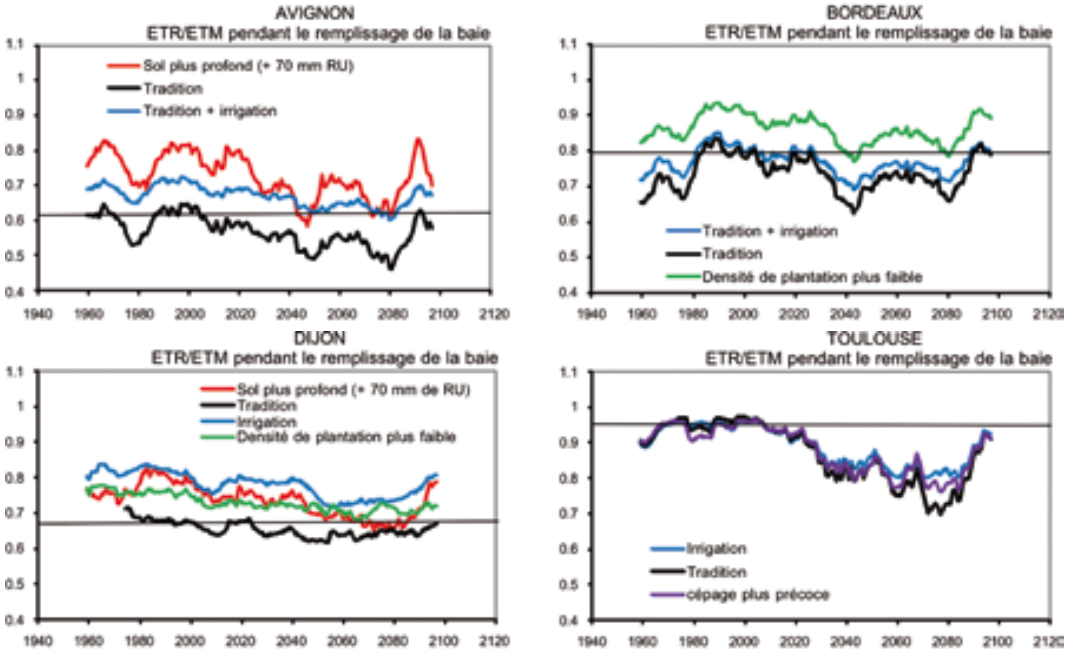


Figure 11 *: test de l'effet sur l'évolution du confort hydrique de changements de système de culture (au sens large) à partir de 4 systèmes traditionnels associés à 4 sites viticoles. Le trait noir correspond au niveau de confort hydrique actuel. Modèle STICS.*

La stratégie d'adaptation éventuelle au changement climatique des systèmes de culture a été testée de manière très rudimentaire pour le critère « confort hydrique », à partir de situations représentatives d'une « tradition » viticole (fig. 11). À Dijon et Avignon, l'irrigation permet de maintenir le confort hydrique au moins à son niveau actuel, alors qu'à Bordeaux le gain reste très marginal ; un changement de densité est alors bien plus efficace (mais probablement dommageable pour la qualité et le revenu). À Toulouse, en partant d'un système de basse densité, aucun moyen ne permet le maintien d'un confort hydrique initialement très élevé, même un changement de génotype. Cependant, cette baisse du confort hydrique peut dans ce cas être propice à une amélioration qualitative.

Par ailleurs, les conditions de maturation évoluent partout de manière défavorable à la qualité (fig. 6 et 8), une évolution encore accentuée avec une variété plus précoce et seulement provisoirement tempérée avec une variété plus tardive (fig. 12).

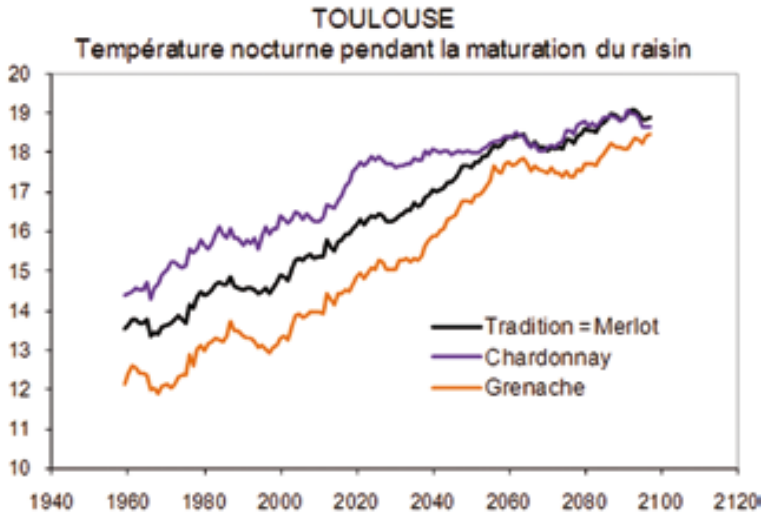


Figure 12 *: températures minimales moyennes pendant la maturation (véraison-maturité) à Toulouse pour les trois cépages.*

Ce qu'il faut retenir

- ✓ Pour la vigne, les effets du changement climatique probablement les plus nets sont ceux attendus sur la phénologie et donc aussi sur la faisabilité de la culture, dont l'aire de répartition devrait s'étendre vers le nord. Entre le passé récent et la fin du XXIe siècle, l'ensemble du cycle de culture serait avancé de 20 à 40 jours et des sites comme Rennes ou Versailles deviendraient tout à fait aptes à la viticulture.
- ✓ Conséquences directes de l'avancée phénologique, des impacts également très importants et négatifs sont prévisibles sur les conditions de maturation du raisin et donc sur la qualité, surtout en termes d'arômes et de polyphénols. En effet, pour les sites de tradition viticole, des élévations de température pendant la période de maturation de l'ordre de 5 °C au moins sont à prévoir pour la fin du siècle.
- ✓ Le fonctionnement hydrique des vignobles devrait évoluer globalement vers une baisse très modérée du confort hydrique, mais une baisse très nette de la restitution d'eau au milieu. Des « relations diagnostiques » établies avec l'indicateur climatique de déficit hydrique (P-ET0) permettent de facilement évaluer l'impact du changement climatique sur la vigne. Les sites et les séries climatiques simulées, où P-ET0 évolue le plus, engendrent les plus forts impacts sur le fonctionnement hydrique de la vigne.
- ✓ Pour l'avancée de la phénologie et le changement des conditions de maturation, il sera très difficile d'échapper à des impacts négatifs du changement climatique. Dans une certaine mesure, une adaptation des systèmes et techniques de culture peut être envisagée (coteaux exposés au nord, refroidissement par irrigation, abandon de l'effeuillage…), de même qu'une adaptation du matériel génétique. Pour le fonctionnement hydrique, de nombreux moyens d'action sont disponibles. Parmi eux, l'irrigation offre l'avantage de ne pas révolutionner l'ensemble du système de production, à la condition *sine qua non,* mais problématique, que de l'eau reste disponible.

Ce qu'il faut approfondir…

- ✓ Si les principaux impacts du changement climatique sur la culture de la vigne ont bien été quantifiés, au moins en tendance, certains aspects du fonctionnement et de la réponse au changement climatique n'ont pas été abordés, essentiellement par manque de modèle disponible simulant ces effets. En termes de fonctionnement de la culture, on peut citer par exemple les effets des hautes températures sur la photosynthèse, la croissance et le développement, les effets de relation entre la vigueur végétative, le rendement et la qualité, l'adaptation dynamique de l'enracinement, l'exposition aux risques de gel, l'augmentation de la croissance post-vendanges et donc de la mise en réserve. En termes d'adaptation, on peut citer les effets de l'enherbement, de la fertilisation, de l'effeuillage et d'autres opérations culturales, de l'adaptation du cépage et du porte-greffe…
- ✓ Certains aspects comme la maturation et le déterminisme climatique et microclimatique de la qualité sont encore mal connus et donc l'évaluation de l'impact du changement climatique dans ce domaine est encore partielle et imparfaite. De manière générale, les effets des hautes températures sur la photosynthèse, la croissance et le développement pourraient venir nuancer les résultats obtenus sur l'avancée de la phénologie.
- ✓ Enfin, l'évaluation des possibilités d'adaptation est encore partielle et peut être considérée comme simpliste puisqu'elle ne tient pas compte de toutes les interactions potentielles. Tout est en effet potentiellement adaptable : (climat) x cépage x sol x densité x (sec/irrigué)…
- ✓ Pourtant, bien évaluer l'impact du changement climatique et optimiser les choix sera crucial pour une culture pérenne de longue durée où les coûts d'installation sont importants : des plantations actuelles seront encore actives en 2050. La difficulté de la prise de décision est liée à l'imparfaite hiérarchisation des incertitudes, qui se superpose à l'évaluation du risque économique à long terme.
- ✓ Des aspects socio-économiques n'ont pas été abordés, qui pourraient freiner l'adaptation agronomique : cadre réglementaire très contraint, poids des traditions (notions de « terroirs » et de « typicité ») et forte segmentation du marché.

Pour en savoir plus…

Downey M.O., Dokoozlian N.K., Krstic M.P., 2006 - Cultural Practice and Environmental Impacts on the Flavonoid Composition of Grapes and Wine: A Review of Recent Research. *Am. J. Enol. Vitic*. 57: 257-268.

Duchêne E., Schneider C., 2005 - Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace. *Agron. Sustain*. Dev. 25:93-99.

Jones G.V., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K., 2005 - Climate change and global wine quality. *Clim. Change* 73: 319–343.

Lobell D.B., Field C.B., Cahill K.N., Bonfils C., 2006 - Impacts of future climate change on California perennial crop yields: Model projections with climate and crop uncertainties. *Agric. Forest Meteorol*. 141: 208-218.

Schultz H.R., Lebon E., 2005 - Modelling the effect of climate change on grapevine water relations. *Acta Hort*. 689:71-78.

Seguin B, de Cortazar IG., 2005 - Climate warming: Consequences for viticulture and the notion of 'terroirs' in Europe. *Acta Hort*. 689: 61-69.

Tonietto J. & Carbonneau A., 2004 - A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agric. Forest Meteorol*., 124: 81-97.

Éléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine

C8
Forêt

Nathalie Breda, Alexandre Bosc, Vincent Badeau

A Quelques éléments clés sur la forêt française métropolitaine (moyenne 2000-2007)

La forêt française métropolitaine couvre 15,7 millions d'hectares, soit 28,6 % du territoire (environ la moitié de la surface agricole). Sa surface augmente depuis le milieu du XIXe siècle. Elle couvre le territoire de façon hétérogène (fig. 1 gauche) après avoir été historiquement repoussée dans les zones non convoitées par l'agriculture.

La production moyenne annuelle est de 6 m³/ha/an et le volume de bois sur pied dans les forêts françaises est de 2,37 milliards de m³ (2005). Ce volume a augmenté de 28 % en 19 ans (1,85 milliards de m³ pour une année moyenne 1986) (fig. 1 droite). Durant la même période, le volume par hectare est passé de 138 m³/ha à 160 m³/ha ; l'accroissement de volume n'est cependant pas dû à l'augmentation de surface mais à une récolte inférieure à la production. Cette capitalisation de bois sur pied augmente la compétition dans les peuplements matures.

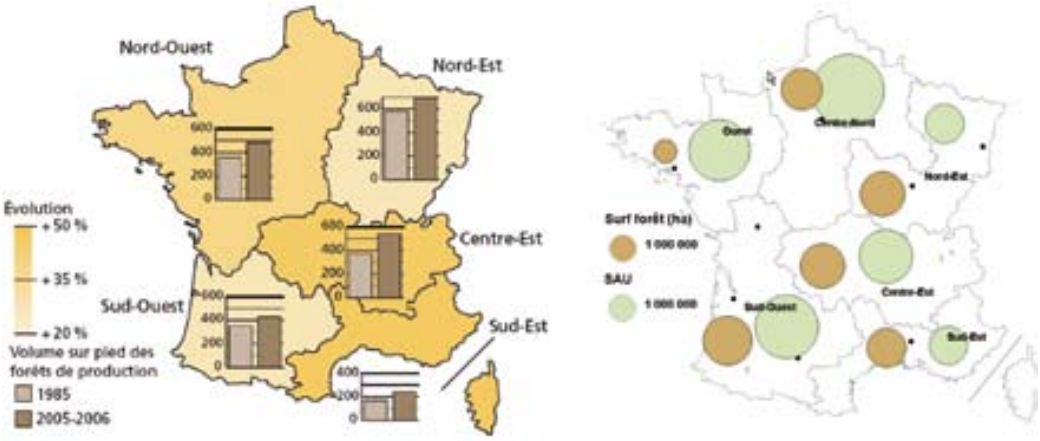


Figure 1 : *surfaces respectives dédiées à l'agriculture et à la forêt par région CLIMATOR (à gauche) et évolution du volume de bois sur pied dans les forêts de production sur 20 ans par inter-région (en millions de mètres-cubes) ; la couleur de fond illustre l'évolution en pourcentage, les histogrammes les volumes aux deux dates (à droite).*

La forêt française est majoritairement privée et feuillue. En effet, la forêt privée représente les trois quarts de la surface forestière métropolitaine, soit 11 millions d'hectares. Les forêts de pin maritime, abordées dans CLIMATOR, sont majoritairement des forêts privées et cultivées pour lesquelles nous traiterons des choix d'itinéraires techniques* (durées de rotation). La forêt française est principalement composée d'essence à feuilles caduques (cf. tab. 1).

Source IFN, 2008	Superficie forêts de production de bois (milliers d'ha)	Volume sur pied (millions de m³)	Production brute annuelle (millions de m³)
Feuillus	10 380 (69 %)	1 502 (62 %)	55,8 (55 %)
Conifères (total) dont	4 470 (30 %)	905 (38 %)	45,3 (45 %)
pin maritime	1 100 (7 %)	179 (7 %)	11,1 (11 %)
sapin, épicéa, douglas	1 610 (11 %)	456 (19 %)	23,1 (23 %)
Total	**14 970**	**2 407**	**101,1**

Tableau 1 : *composition spécifique de la forêt française.*

Les contraintes affectant la production de la forêt française métropolitaine

La forêt en France métropolitaine est aujourd'hui localisée sur les sols les plus contraignants, en termes de fertilité minérale et de contraintes physiques (charge en éléments grossiers, par exemple) et hydrodynamiques (excès d'eau). Dans CLIMATOR, nous ne traiterons que des limitations en termes de bilan hydrique, sans prise en compte des contraintes éventuelles de fertilité minérale.

B Protocole de simulation de CLIMATOR

Les impacts* du changement climatique* sur la forêt française ont été appréhendés à travers un ensemble de simulations reposant sur 5 critères :

Trois modèles* d'analyse des impacts du climat sur les forêts

Ils utilisent des approches spécifiques (tab. 2), précédemment mis en œuvre dans le cadre du projet forestier CARBOFOR (2010). BILJOU (bilan hydrique peuplement), GRAECO (bilan intégré eau, carbone, croissance avec gestion sylvicole), EVOLFOR (modèle de niche). *Attention, ces modèles conceptuellement différents ne sont pas intercomparables.*

Trois types de couverts

Feuillus décidus, conifères à fort indice foliaire* (type sapin, épicéa, douglas…), plantation de pin maritime avec sous-étage herbacé. Cette sélection restreinte de types de couvert ne représente pas l'ensemble de la forêt française, et en particulier pas les spécificités des couverts méditerranéens, des mélanges feuillus-résineux, des couverts montagnards et des plantations à vocation biomasse à très courte rotation.

Le climat*

Aux configurations standard (scénario d'émission A1B*, modèle ARPÈGE et les trois méthodes de régionalisation*) a été ajouté ponctuellement l'ensemble des autres configurations climatiques décrites dans la fiche CLIMAT, soit sept séries supplémentaires.

Modèle	Approche	Couvert type analysé dans CLIMATOR	Variable socle ou autre dans CLIMATOR	Pas de temps
BILJOU	Bilan hydrique peuplement	(1) Feuillus décidus IF = 6 saisons entre J122-300 (2) Conifères non pin IF = 6	Restitution au milieu (PERCOL*) (ETR*/ET0*) Spécifique : déficit hydrique	Journalier
GRAECO	Bilan intégré eau, carbone, croissance avec gestion sylvicole	Pin maritime + sous-étage (IF simulé à partir de 7 ans)	Rendement (bois tronc uniquement) Restitution au milieu (PERCOL*) Confort hydrique (ETR*/ETM*)	Horaire (reconstitué à partir du journalier)
EVOLFOR	Modèle de niche	(1) Hêtre (2) Chêne vert (3) Groupes biogéographiques	Spécifique : probabilité de présence (cf. fiche GÉOCLIMATOLOGIE) déplacement potentiel des cultures	Période

Tableau 2 : *comparaison des spécificités des modèles forestiers utilisés dans CLIMATOR.*

Le sol

Au sol commun (sol 1) ont été ajoutés quatre sols forestiers (tab. 3). Les caractéristiques des sols forestiers sont issues de la base de données de l'INRA-Orléans Infosol (cf. fiche MODÈLES). Pour le pin, les sols 2 et 3 sont comparables du point de vue réserve utile mais se distinguent par leurs propriétés hydrodynamiques en profondeur. Le sol 1, à forte réserve utile*, n'est actuellement pas rencontré sous pin maritime, mais a été utilisé pour comparaison avec les autres cultures étudiées dans CLIMATOR.

Sols	Sol 1 brun peu lessivé tronqué	Sol 2 brun	Sol 3 fersiallitique	Sol 4 rendzine brunifiée modale	Sol 5 lessivé acide
Prof. (cm)	140	90	125	70	140
RU (mm)	226	103	96	126	167
MO (%)	1.8	1.2	5.7	9.3	2.6
BILJOU	Forêt de conifères à fort indice foliaire			Forêt feuillue décidue	
GRAECO	Forêt de pin maritime avec sous-étage				

Tableau 3 : *caractéristiques des sols utilisés dans les simulations forestières.*

Trois itinéraires sylvicoles pour la forêt cultivée de pin

Rotation longue orientée bois d'œuvre (FCL, 80 ans), moyenne orientée bois rond (FCM, 50 ans) ou courte orientée production de biomasse (FCC, 28 ans). L'itinéraire sylvicole le plus utilisé aujourd'hui est la rotation moyenne (50 ans). Le mode opératoire des simulations est spécifique pour représenter une rotation longue en culture pérenne :

- le fonctionnement du peuplement au cours d'une année résulte à la fois des conditions climatiques de l'année, mais également de la structure du couvert (IF*) et de l'état hydrique du sol, résultant de l'intégration du fonctionnement des années précédentes ;
- le fonctionnement du couvert forestier d'une année donnée a été calculé comme la moyenne

du fonctionnement de n peuplements simulés en parallèle, représentant tous les âges rencontrés au cours de l'itinéraire sylvicole ;

- ce mode opératoire reproduit l'effet tampon des arbres vis-à-vis de la variabilité* climatique interannuelle.

C Carte d'identité écophysiologique des forêts dans le contexte du changement climatique

Avantages

Les essences forestières métropolitaines sont des plantes en C3* et, à ce titre, réagissent à l'augmentation en CO_2 atmosphérique qui stimule leur photosynthèse*. De par leur pérennité, les arbres stockent de manière plus durable le CO_2 atmosphérique que les plantes herbacées, prairies ou cultures. Pour certaines essences, comme le chêne, s'ajoute un effet antitranspirant du CO_2 qui permet une meilleure résistance à la sécheresse. De façon générale, les peuplements forestiers déploient diverses stratégies qui les rendent tolérants* au manque d'eau : système racinaire profond, capacité d'extraction meilleure que les plantes annuelles, forte régulation stomatique. De plus, l'ajustement interannuel du fonctionnement des couverts en réponse aux contraintes hydriques (diminution de l'indice foliaire) est un avantage à long terme pour assurer la pérennité des peuplements.

Inconvénients

Les indices foliaires élevés des essences à fort rendement* engendrent de fortes consommations en eau et une importante interception des précipitations par le feuillage qui réduit et retarde la réhydratation des sols. Ils génèrent une sensibilité de la productivité aux aléas climatiques qui, en réduisant ces forts indices foliaires, provoquent des déficits de rendement pouvant persister même après la disparition du stress. L'effet antitranspirant du CO_2 atmosphérique n'existe pas pour certaines essences, dont le pin maritime et le hêtre. En termes d'adaptabilité*, la marge d'action du sylviculteur est faible : périodicité d'action sylvicole contrainte par la durée des rotations, faible possibilité de substitution d'essence (méconnaissance, réglementation, filière…).

Ce qui différencie les couverts étudiés dans CLIMATOR

Leur phénologie* : période défeuillée non consommatrice en eau entre octobre et avril pour les décidus, indice foliaire faible en pin maritime (inférieur à 2,5), fort en conifères autres que pins (de 6 à 10), moyen à élevé en feuillus décidus (de 4 à 9).

Leur capacité d'interception des précipitations, plus importante sur conifères à indice foliaire équivalent.

D Impacts du changement climatique sur la culture de la forêt, ces bilans en eau, sa productivité et sa distribution

Bilan hydrique

Intensité de déficit hydrique

Le stress hydrique* est caractérisé ici par le déficit hydrique cumulé sur la saison de végétation chez les feuillus décidus ou sur l'année pour les conifères. Ce déficit est calculé comme la somme des écarts entre le contenu en eau relatif de chaque jour et 40 % de la RU (Granier *et al.*, 1999). L'intensité du déficit hydrique augmente au cours du temps, quels que soient le sol, la projection climatique* et le site* (fig. 2). Cette dégradation du bilan hydrique des forêts est particulièrement marquée pour les forêts de conifères (fig. 2 droite), et ceci dès le futur proche. Notons que cette dégradation est peu sensible pour la station de moyenne montagne (Clermont-Theix).

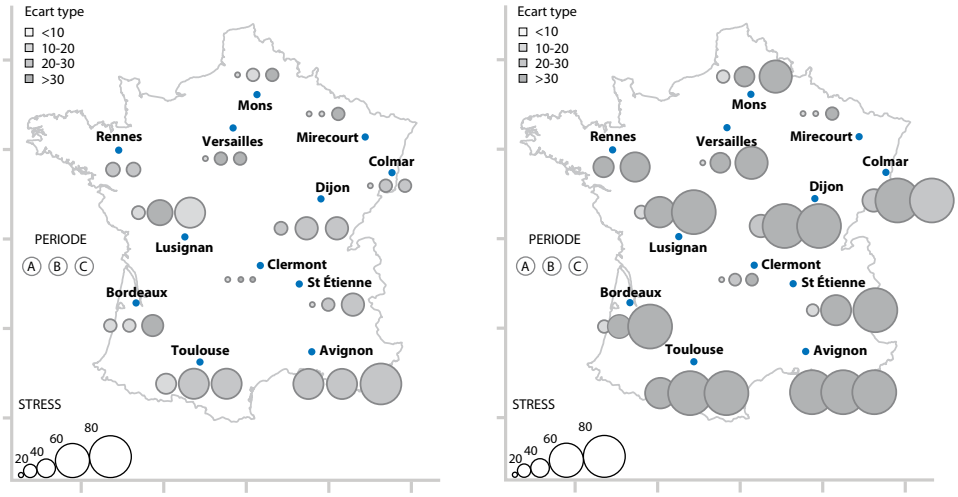


Figure 2 *: évolution de l'intensité du déficit hydrique pour une forêt de feuillus (à gauche) et une forêt de conifères (à droite), pour le passé récent (A), le futur proche (B) et le futur lointain (C).*

Restitution d'eau au milieu (cf. fiche EAU)

Les couverts de forêts feuillues et décidues restituent davantage d'eau au milieu que les couverts de conifères à feuillage persistant. L'eau est restituée en quantité au milieu, majoritairement en dehors de la période de végétation, particulièrement sous forêt feuillue décidue. On sait par ailleurs que cette eau percolée est de bonne qualité (interception des dépôts, pas de pesticides, pas d'intrants), ce qui confère un fort intérêt environnemental à ce type de couvert.

Consommation en eau des forêts et changement climatique

Le rapport ETR*/ETM* diminue du passé récent au futur lointain, quels que soient le modèle de bilan hydrique et le sol. La variabilité climatique interannuelle et les incertitudes liées à la méthode de régionalisation sont plus importantes à Toulouse qu'à Colmar (fig. 3). Bien que les deux modèles BILJOU et GRAECO ne calculent pas exactement la même variable (rapport ETR/ETM ou ETR/ET0), les tendances d'évolution de la consommation en eau entre les trois périodes sont comparables, dans le sens d'une réduction par effet sécheresse.

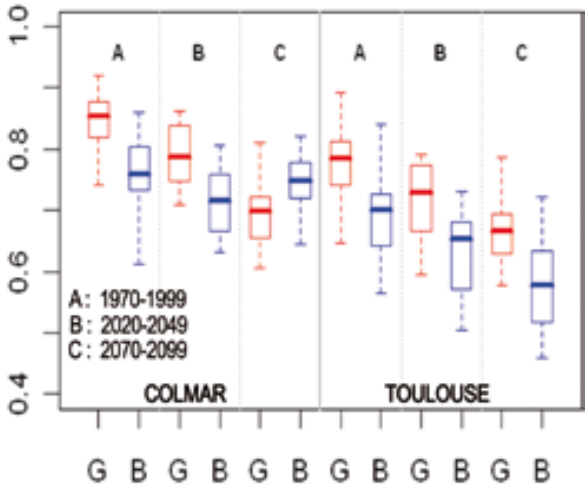


Figure 3 *: moyenne, écart-type et amplitude interannuelle des* $ETR_{(IF\ modèle)}$*/ETM, simulés avec GRAECO (G, rouge) pour une parcelle de pin maritime et des* $ETR_{(IF\ fixé)}$*/ET0 simulés par BILJOU (B, bleu) pour une parcelle de résineux à fort indice foliaire, pour les sites de Toulouse et de Colmar, pour les trois fenêtres temporelles.*

Effet du changement climatique sur le rendement du pin

Le rendement des pins baisse légèrement au futur proche et de manière plus forte au futur lointain (tab. 4). Si ces baisses sont significatives, elles restent en réalité assez faibles en relatif (–4,6 % en futur proche, –11,3 % en futur lointain). La forte significativité de ces résultats, comparativement à ceux obtenus sur d'autres cultures non pérennes, est liée à la capacité intégrative de la croissance des arbres.

Une grande part de l'incertitude liée à ces résultats apparaît corrélée à la méthode de régionalisation du climat (fig. 4). La méthode par type de temps du CERFACS aboutit à une perte de rendement moindre que les deux autres méthodes.

	FP-PR	FL-PR
Avignon	**-0.15 (-7.4%)**	**-0.34 (-17%)**
Bordeaux	*-0.08 (-3.0%)*	**-0.18 (-7.1%)**
Clermont	-0.04 (-0.9)	**-0.18 (-3.8%)**
Colmar	**-0.09 (-3.5%)**	**-0.17 (-6.7%)**
Dijon	**-0.09 (-3.7%)**	**-0.37 (-15%)**
Lusignan	**-0.33 (-13%)**	**-0.65 (-22%)**
Mirecourt	**+0.10 (+2.5%)**	**-0.19 (-4.3%)**
Mons	**-0.19 (-6.0%)**	**-0.41 (-12%)**
Rennes	**-0.13 (-4.3%)**	**-0.30 (-9.7%)**
Saint-Étienne	**-0.15 (-5.4%)**	**-0.45 (-16%)**
Toulouse	**-0.29 (-12%)**	**-0.57 (-23.5%)**
Versailles	**-0.13 (-4.0%)**	**-0.23 (-7.4%)**
Tous sites	**-0.14 (-4.6%)**	**-0.34 (-11%)**

Tableau 4 : *évolution des rendements de pin maritime (sol 3, climat TT) entre le passé récent (PR) et le futur proche (PR) ou lointain (FL). La significativité de l'évolution par rapport à la variabilité interannuelle est notée de la façon suivante :* **Gras** *(p < 0.01), Italique (p < 0.05),* Normal *(p < 0.10).*

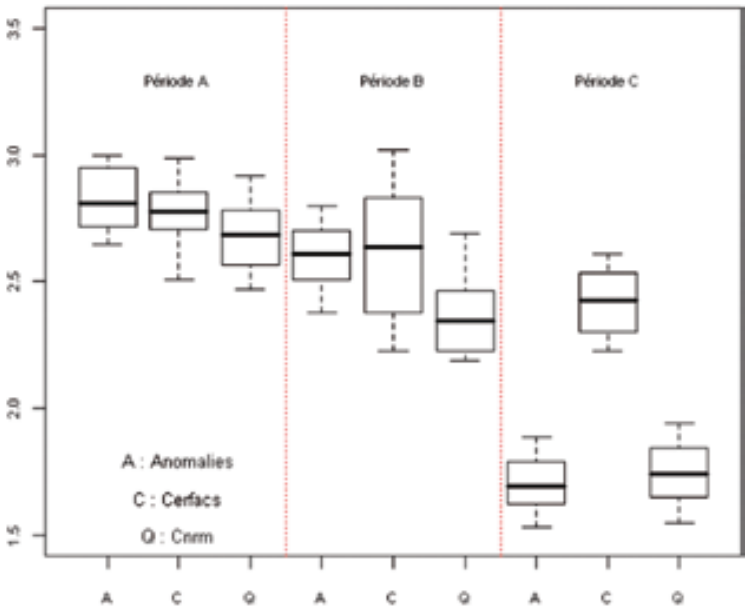


Figure 4 *: moyenne, écart-type et amplitude interannuelle des productivités (tonnes de matière sèche/ha/an) de pin maritime simulés avec GRAECO pour les trois fenêtres temporelles et les trois régionalisations du climat (A : ANO, C : TT, Q : QQ) à Bordeaux pour le sol 3 en rotation moyenne.*

À itinéraire sylvicole donné, le rendement moyen par période climatique est en premier ordre conditionné par la température annuelle moyenne, puis par la pluviométrie annuelle (fig. 5). Pour les forêts, à l'inverse de certaines cultures, l'augmentation de température à un effet négatif sur le rendement en augmentant la transpiration des arbres *via* l'augmentation du déficit hydrique de l'air. Cette contrainte est accentuée par la baisse concomitante de la pluviométrie, aboutissant à des stress hydriques plus importants dans les climats futurs. En bilan, pour les forêts, parmi les modifications climatiques attendues, seule l'augmentation du CO_2 se traduit par un effet positif.

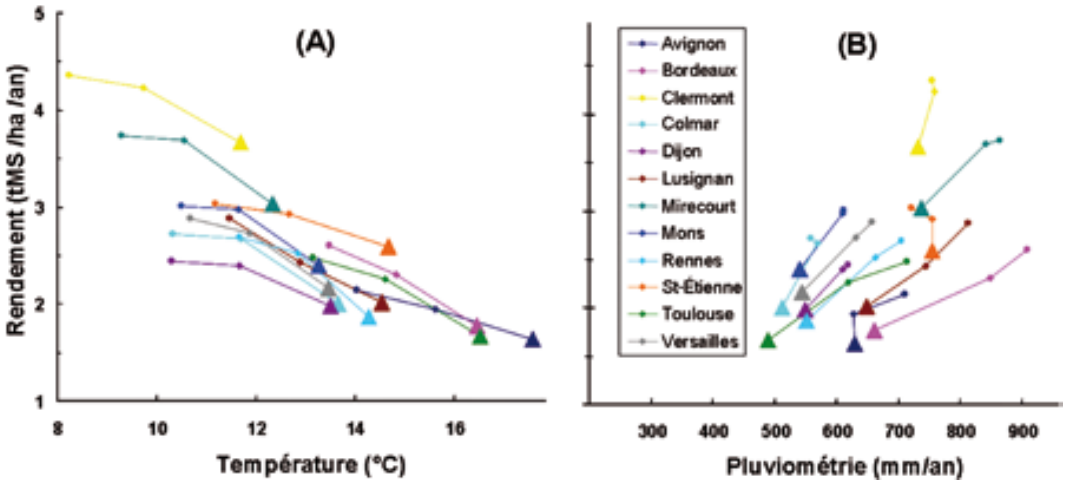


Figure 5 *: évolution, sur les 12 sites (scénario A1B, méthode de régionalisation QQ, Sol 3) du rendement du pin maritime (FCM) en fonction de la température annuelle moyenne (A) et de la pluviométrie annuelle moyenne (B). Pour chaque station, les trois points reliés représentent les trois périodes Passé récent (PR*), Futur proche (FP*) et Futur lointain (FL*), où FL est représenté par le triangle.*

Évolution des aires climatiques potentielles des essences forestières

L'approche « modèle de niche » a été utilisée ici sur des groupes d'espèces d'une part, et sur deux essences de référence (hêtre et chêne vert), d'autre part. L'utilisation des différentes méthodes de désagrégations régionales et de modèles climatiques permet d'évaluer l'incertitude climatique autour des projections d'aires.

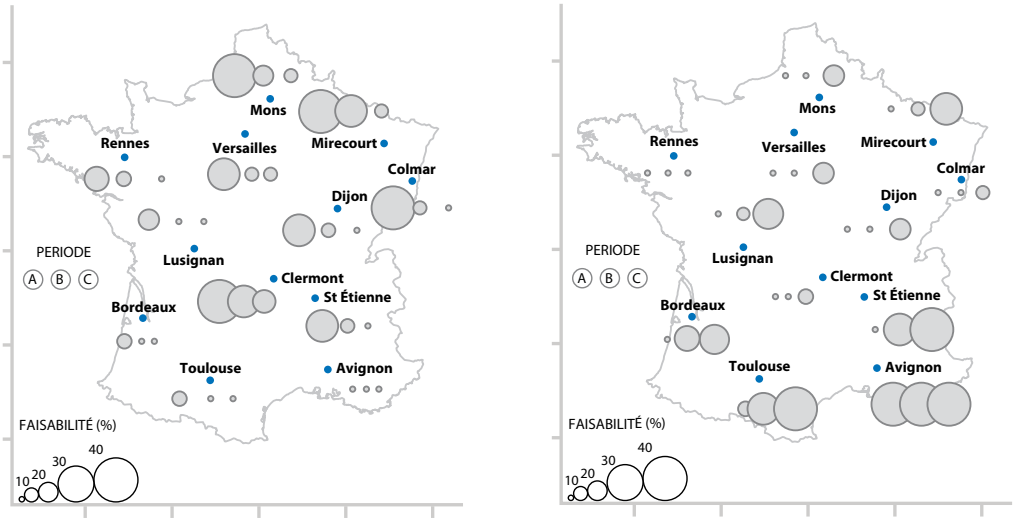


Figure 6 *: évolution de la probabilité de présence ou faisabilité (exprimée en %) du hêtre (à gauche) et du chêne vert (à droite) ; scénario A1B, méthode de régionalisation T ; le type de sol n'est pas pris en compte.*

La figure 6 illustre l'évolution de la probabilité de présence du hêtre (fig. 6 gauche) et du chêne vert (fig. 6 droite) entre le passé récent et les futurs proche et lointain. Les simulations réalisées montrent une forte évolution de la distribution potentielle des essences. On observe une progression vers le nord des composantes climatiques méditerranéenne et aquitaine, au détriment des influences océaniques, continentales et montagnardes. Ces tendances modifient le contour des aires potentielles de distribution des essences. À titre d'exemple, le hêtre tend à régresser dès le futur proche, alors qu'à l'inverse, le chêne vert se développe, surtout à partir du futur lointain, au nord d'une ligne Bordeaux/Saint-Étienne.

Quels que soient le site ou la série climatique, les probabilités de présence du hêtre sont en diminution dans les futurs proche et lointain, conformément aux résultats présentés sur la figure 6, traduisant une régression potentielle de l'espèce. Le signal est cependant fortement perturbé par l'incertitude climatique (fig. 7 haut). Pour le chêne vert (fig. 7 bas), et dans un futur proche, les probabilités de présence augmentent dans la moitié sud du territoire (de Lusignan à Avignon), puis cette augmentation est générale dans le futur lointain, correspondant à une remontée vers le nord de la limite climatique du chêne vert. Comme pour le hêtre, l'incertitude climatique est très forte (sauf dans le cas d'Avignon). Pour les sites les plus septentrionaux, l'incertitude est maximale avec des écarts de probabilités distribués de 0 à 0,9. Pour le hêtre, comme pour le chêne vert, l'impact du scénario A2 est supérieur à celui du scénario A1B, lui-même supérieur au scénario B1. En ce qui concerne les méthodes de désagrégation, la méthode QQ a l'impact le plus fort et la méthode des types de temps l'impact le moins fort. La méthode des anomalies (scénario A1B) a une influence plus faible sur les probabilités de présence des deux espèces que la méthode QQ appliquée au scénario B1.

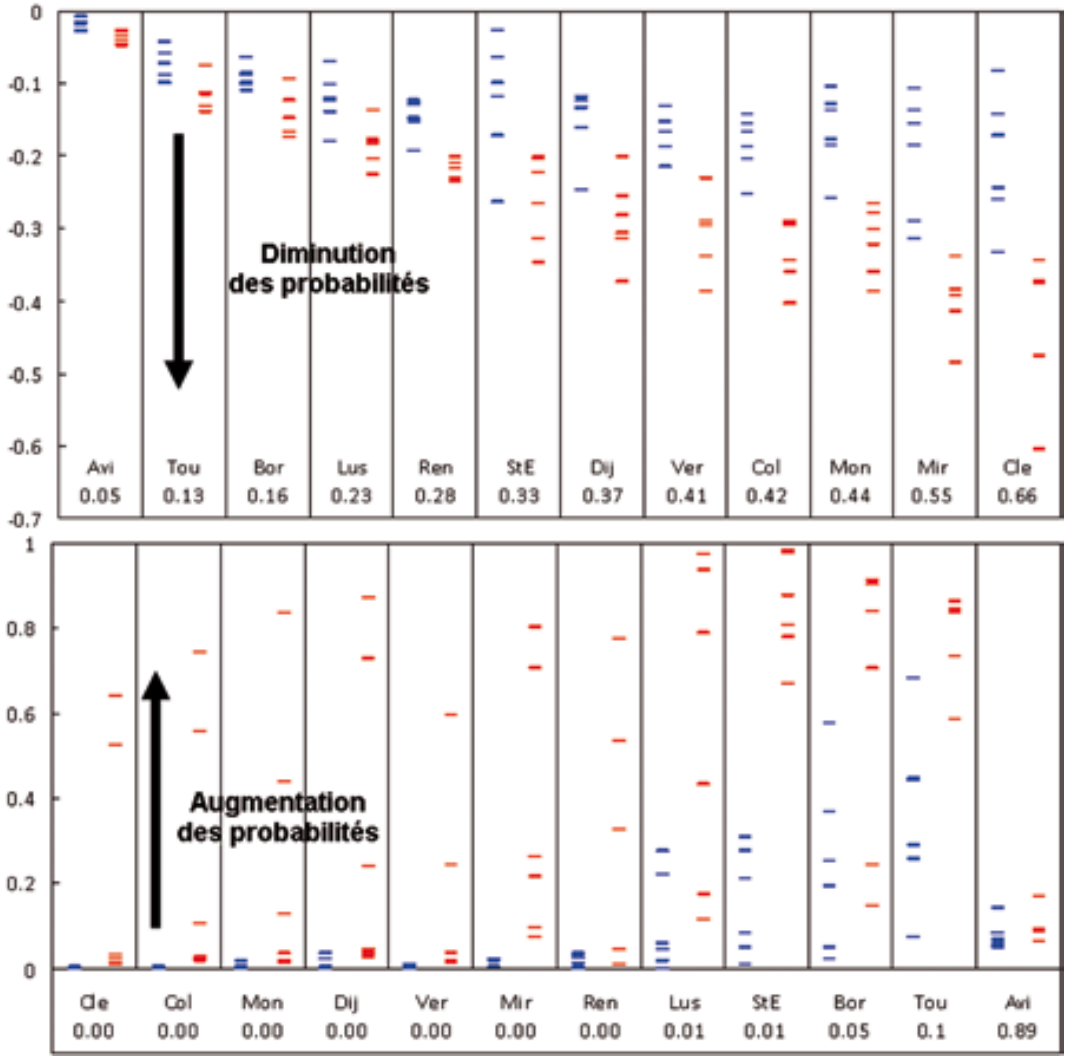


Figure 7 *: différences des probabilités de présence entre les périodes A-B (bleu) et A-C (rouge) calculées pour le modèle EVOLFOR Hêtre (en haut) et EVOLFOR Chêne vert (en bas) à partir de trois scénarios GIEC* et trois méthodes de désagrégation (soit six séries climatiques). Les sites sont classés par ordre croissant des probabilités de la période du PR (valeurs en bas des graphiques).*

La figure 8 présente l'évolution potentielle des grands domaines biogéographiques, c'est-à-dire les grands équilibres flore/climat tels qu'ils sont « vus » par la composition en essences des forêts françaises. S'il n'est pas possible d'attribuer une espèce à un domaine de façon univoque, il est possible de séparer le territoire en cinq grands ensembles : le domaine méditerranéen, le domaine sud-atlantique, le domaine nord-atlantique, le domaine nord-est et le domaine montagnard qui peut être décliné plus finement en trois niveaux (Badeau *et al.*, 2010). Les résultats sur les groupes d'espèces montrent une extension des paysages vers des caractéristiques plus méditerranéennes (extension des couleurs rouge et orange) et une régression des caractéristiques nord-est et montagneuses (couleurs vert et bleu). Comme pour le hêtre ou le chêne vert, l'incertitude climatique est très forte et particulièrement visible dans la moitié nord de la France. Selon les méthodes de régionalisation, les sites de Colmar, Mons, Mirecourt ou Dijon évoluent soit vers des caractéristiques plus méditerranéennes (QQ) soit, à l'opposé extrême, vers des caractéristiques plus montagnardes. Comme pour les espèces, et à scénario constant (A1B), l'impact des méthodes de régionalisation est très fort.

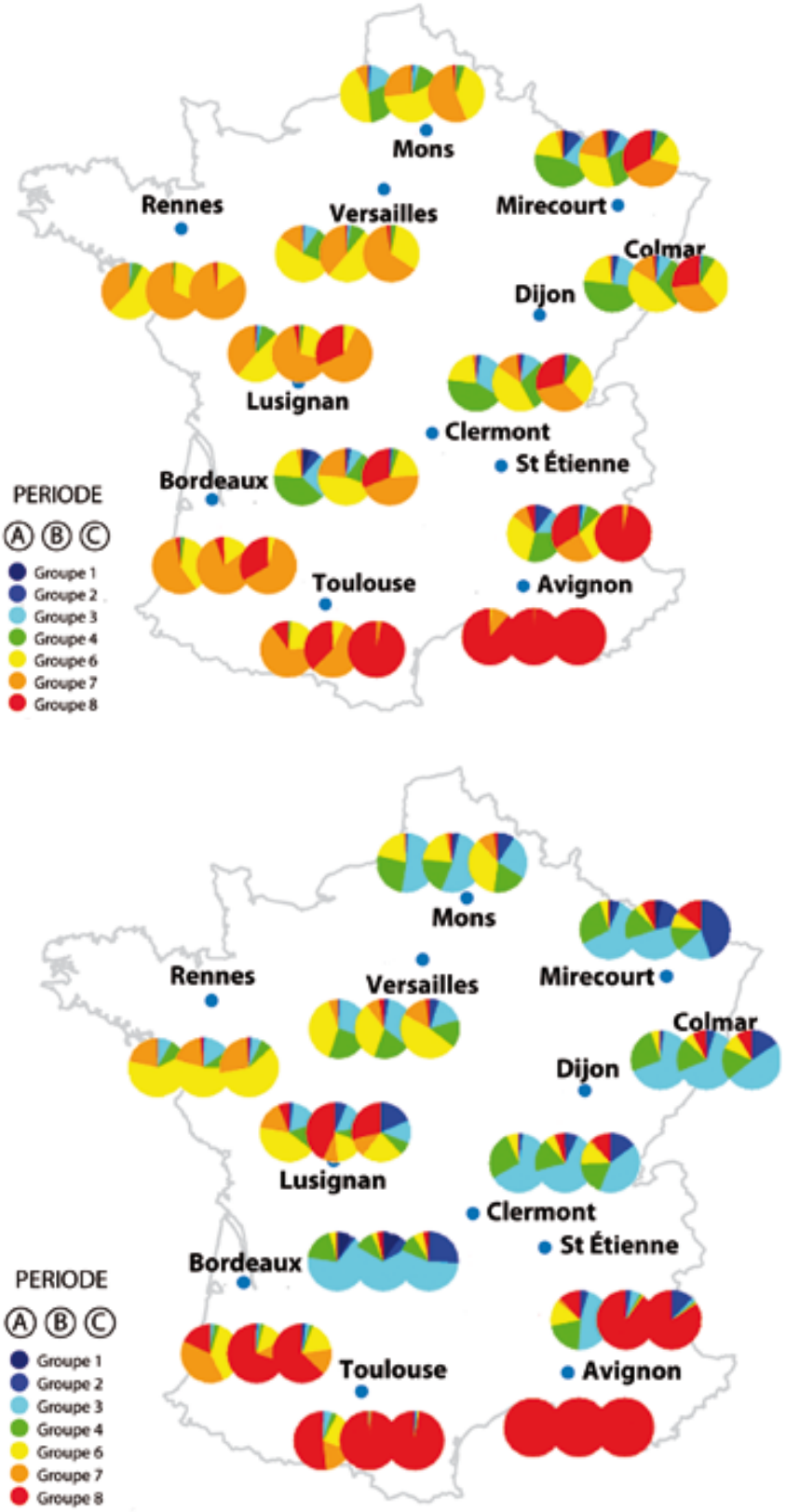


Figure 8 *: probabilité d'occurrence de 7 groupes biogéographiques pour les trois périodes étudiées. Scénario A1B, méthode QQ (en haut), méthode TT (en bas). Groupe des essences méditerranéennes (rouge), groupe aquitain (orange), groupe Nord-Ouest (jaune), groupe Nord-Est (vert), groupes montagnards (3 niveaux de bleu).*

Quelles adaptations des pratiques sont-elles envisageables ?

Compte tenu des résultats de l'étude, quelques pistes peuvent être avancées, se situant essentiellement dans le cadre d'une sylviculture économe en eau : préférence pour les feuillus décidus par rapport aux résineux, itinéraires techniques à indice foliaire réduit. On peut aussi penser à planter des essences exotiques ou choisir des provenances permettant d'optimiser productivité et résistance à la sécheresse, ou encore opter pour des mélanges entre de nouvelles essences et des régénérations naturelles.

Ce qu'il faut retenir

✓ Les forêts, feuillues et conifères, pourraient être impactées par le changement climatique dès le futur proche et de manière très significative, quel que soit le site en France dans le futur lointain. Les sécheresses édaphiques et atmosphériques sont les contraintes principales. Contrairement à tous les autres systèmes culturaux, il n'est pas envisageable d'améliorer le confort hydrique par irrigation. Les effets thermiques sur la phénologie ne conduisent pas à des stratégies d'esquive* suffisantes, contrairement aux cultures annuelles. La température joue négativement *via* une augmentation de la sécheresse atmosphérique. Le seul effet bénéfique est celui de l'augmentation de la teneur en CO_2 atmosphérique qui améliore la photosynthèse, mais sans compenser les effets négatifs de l'augmentation des contraintes hydriques. La plus grande source d'incertitude* est liée aux séries climatiques (scénarios* d'émission et méthodes de régionalisation). Les propriétés des sols (profondeur, RU) n'atténuent pas significativement l'impact de la réduction de pluviométrie. Les forêts, surtout décidues, sont parmi les couverts végétaux qui restituent le plus d'eau au milieu, même en conditions de pluviométrie réduite par le changement climatique. La restitution se produit essentiellement en période hivernale. Les trois approches de modélisation mises en œuvre (bilan hydrique, modèle de croissance mécaniste, modèle de niche) convergent vers les mêmes conclusions.

Ce qu'il faut approfondir…

✓ L'amélioration de nos outils de modélisation peut se faire dans plusieurs directions. Par exemple, il serait nécessaire d'introduire des seuils de mortalité dans les modèles forestiers, en lien avec des vulnérabilités aux évènements climatiques extrêmes* et aux risques de dépérissements associés aux interactions climat-bioagresseurs, par exemple. On peut aussi songer à modéliser les dynamiques saisonnières et interannuelles des IF forestiers en réponse aux sécheresses. Enfin, l'extension de l'approche « modèle de niche », appliquée actuellement aux présences/absences des espèces, à des potentialités de croissances (croissance radiale par exemple) permettrait d'avoir des réponses plus nuancées.

Pour en savoir plus…

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 *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*, Denis Loustau (Ed.), Edition Quae, Versailles, ISBN-13 978-2-7592-0384-0.

Bréda N., Granier A., Huc R., Dreyer E. (2006) - Temperate forest trees and stands under severe drought: a review of ecophysiological responses, adaptation processes and long-term consequences. *Annals of Forest Sciences*, 63, 6, 625-644.

Davil H., Dufrene E., Francois C., Le Maire G., Loustau D., Bosc A., Rambal S., Granier A., Moors E. (2006) - Sensitivity of water and carbon fluxes to climate changes from 1960 to 2100 in European forest ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology* 141(1): 35-56.

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. (éditeur) (2010) - *Forests, Carbon Cycle and Climate Change*. Denis Loustau (Ed.), Edition Quae, Versailles, ISBN-13 978-2-7592-0384-0

Loustau D., Bosc A., Colin A., Ogee J., Hendrick D., Francois C., Dufrene E., Deque M., Cloppet E., Arrouays D., Le Bas C., Saby N., Pignard G., Hamza N., Granier A., Bréda N., Ciais P., Viovy N., Delage J. (2005) - Modelling the climate change effects on the potential production of French plains forests at the sub regional level. *Tree Physiology*, 25, 313-323.

Loustau D., Pluviaud F., Bosc A., Porte A., Berbigier P., Deque M., Perarnaud V. (2001) - Impact of a regional $2xCO_2$ climate scenario on the water balance, carbon balance and primary production of maritime Pine in Southwestern France. Models for the Sustainable Management of Plantation Forests. Bordeaux, European Cultivated Forest Institute (EFI sub division) *EFI Proceedings* numéro 41D.

Porté A. (1999) - *Modélisation des effets du bilan hydrique sur la production primaire et la croissance d'un couvert de pin maritime (Pinus pinaster Ait.) en lande humide*. Ph.D. Thesis, Univ. Paris XI, Orsay, France, 160 p.

Analyse d'un exemple d'agriculture biologique en grandes cultures

Nadine Brisson

C 9
Agriculture biologique

A Quelques chiffres clés sur l'agriculture biologique en France

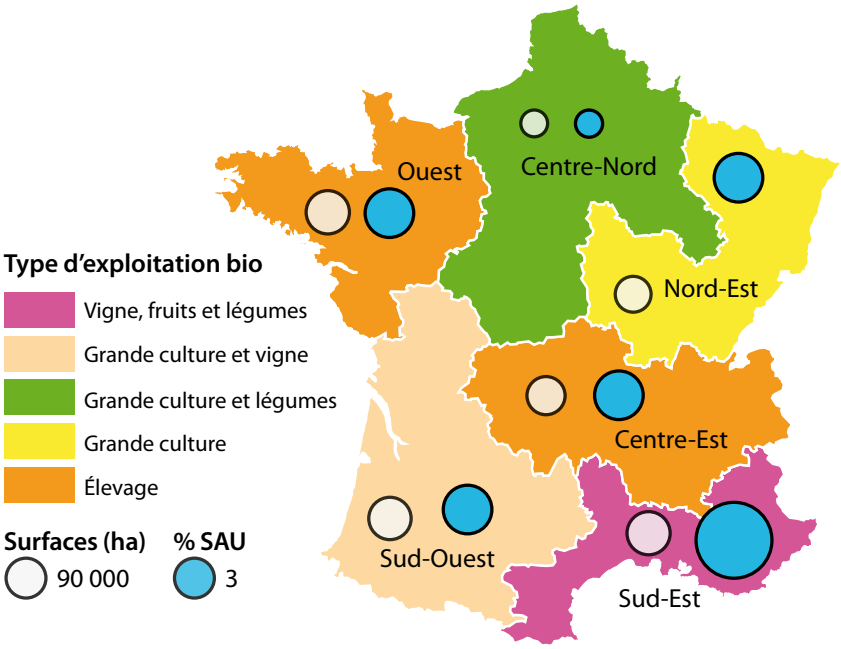


Figure 1 : *l'agriculture biologique dans les zones CLIMATOR avec l'orientation principale des exploitations « bio » et les surfaces concernées (en ha et en % de la SAU).*

Avec 2,12 % de sa SAU consacrés à l'agriculture biologique (chiffres 2008), la France est très en dessous de la moyenne européenne qui se situe dans la fourchette 4-5 % correspondant à la part que nos voisins allemands ou espagnols lui consacrent ; les modèles en la matière sont l'Italie avec 9% et l'Autriche avec 13%. Après une période de stagnation entre 2002 et 2006, les surfaces sont de nouveau en hausse. Comme le montre la figure 1, il existe une forte disparité entre les régions, avec en tête les régions fruitières, viticoles et d'élevage. C'est l'image d'une importante différence entre les productions. Par exemple, 5,9 % des surfaces fruitières et 3,3 % des vignes sont en « bio », alors que, pour les grandes cultures, ce chiffre n'est que de 1 % ; il est de 2,8 % pour les fourrages. On note également que les céréales bio sont souvent produites dans des exploitations de polyculture-élevage.

B Protocole de simulation de CLIMATOR

Nous n'avons étudié qu'un seul système bio, sur la base d'une rotation* quadriennale comportant du pois, du blé et une graminée fourragère sur 2 ans, et fertilisée par des effluents d'élevage. Nous avons fait l'hypothèse que ce système de culture* était couplé avec un élevage, de sorte que les résidus sont en partie exportés. Les problèmes sanitaires (adventices et maladies) n'ont pas été pris en compte.

Sites	12 sites métropolitains dont un site d'altitude
Système	une seule rotation : pois-blé-fétuque-fétuque
Conduite	pluviale, 40 tonnes/ha de fumier en 2 apports au cours de la rotation, pailles de blé exportées, semis de la fétuque à l'automne après récolte du blé
Sols	Sol 1 : sol de limon profond à réserve utile élevée (226 mm) et fertilité moyenne Sol 2 : rendzine à faible réserve utile (104 mm) et faible fertilité Sol 3 : sol lessivé hydromorphe à forte réserve utile (218 mm) et fertilité élevée
Variété	Bacarra (Pois), Soissons (Blé), fétuque élevée
Modèle	STICS
Climat	SRES : A1B*, ARPÈGE, régionalisation* : TT*, QQ *et ANO*

C Le changement climatique va-t-il modifier les relations entre « bio » et « conventionnel » en termes de production ?

Le blé

Si nous analysons la productivité du blé, ce qui différencie le système bio des autres systèmes de grandes cultures* en rotation, c'est à la fois le précédent (pois dans notre cas) et l'absence de fertilisation minérale compensée par une fertilisation organique deux fois en quatre ans.

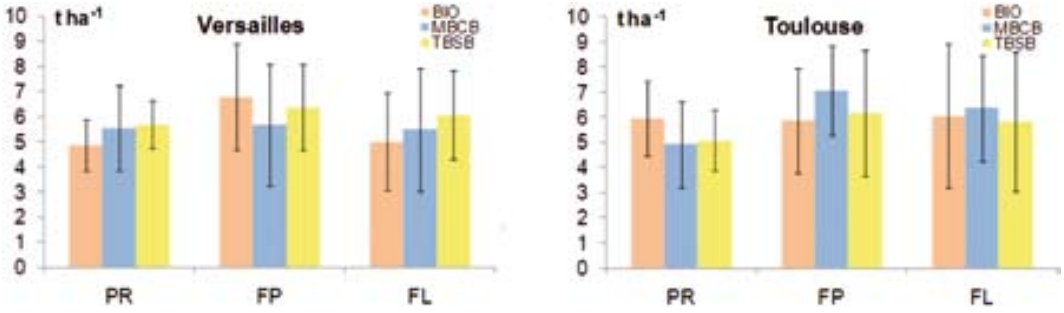


Figure 2 : *évolution de la productivité du blé en rotation, en moyenne et en variabilité pour les périodes du passé récent (PR*), du futur proche (FP*) et du futur lointain (FL*) pour deux sites : Versailles à gauche et Toulouse à droite. Les sigles BIO, MBCB et TBSB renvoient aux 3 rotations céréalières étudiées dans CLIMATOR (cf. fiche AGRICULTURE). Sol 1, méthode de régionalisation TT.*

La figure 2 montre que, pour la productivité du blé, le mode de conduite biologique n'est pas significativement différent d'autres modes de conduite en rotation (MBCB, TBSB) dont les dates de semis sont identiques. Il est intéressant de noter que le blé biologique n'est pas défavorisé par le changement climatique*, mais, comme pour les autres systèmes de culture, il sera confronté à une variabilité* interannuelle plus importante dans le futur, avec des amplitudes entre faibles et forts rendements plus élevées. Ainsi, nos résultats indiquent que l'occurrence de rendements dépassant 6 t ha^{-1} augmentera, ce qui s'explique par une meilleure valorisation de la fertilisation organique en raison du réchauffement.

Sur des sols plus contraignants, plus secs ou plus humides, la culture du blé valorise, en moyenne, moins bien les avantages offerts par le changement climatique, quel que soit le système. On observe cependant que, sur ces sols contraignants, la variabilité des rendements augmente dans le FL pour la culture biologique, alors qu'elle a tendance à diminuer pour la culture conventionnelle (fig. 3).

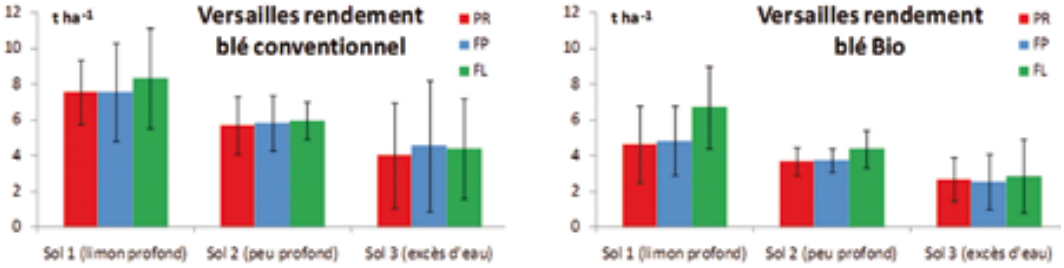


Figure 3 : *évolution comparée du blé « bio » et « conventionnel » pour les 3 types de sols à Versailles et pour la méthode de régionalisation TT. La culture de blé conventionnelle est ici une monoculture de blé semée précocement.*

La fétuque

En matière de production fourragère, la différence entre les deux systèmes (comparés pour la même situation, c'est-à-dire la production de l'année suivant le semis) n'est pas significative. Sur les sites fourragers de Lusignan et Mirecourt (fig. 4), le faible avantage du conventionnel tend à s'estomper vers la fin du siècle (FL).

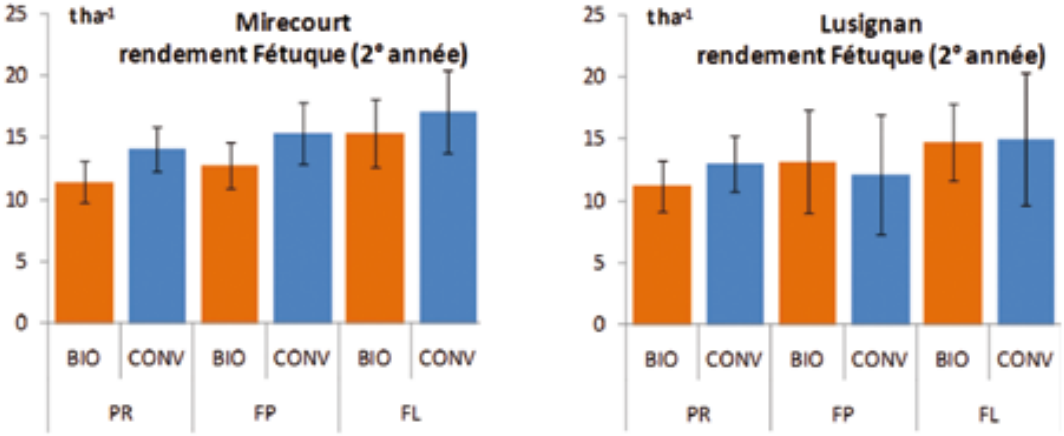


Figure 4 : *évolution comparée de la production fourragère « bio » et « conventionnelle » pour le sol 1 à Lusignan et Mirecourt avec la méthode de régionalisation TT.*

Dans d'autres sites, comme à Rennes ou Toulouse, l'accentuation des sécheresses dans le FL fragilise le système bio dont la production, les années sèches, est très faible (fig. 5).

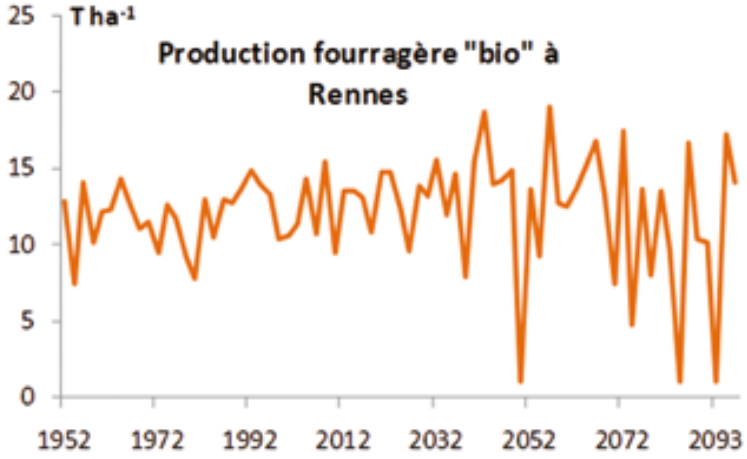


Figure 5 : *évolution de la production fourragère bio à Rennes pour le sol 1 et la méthode de régionalisation TT.*

D Amélioration de la qualité du blé bio

Compte tenu de la légère tendance à l'augmentation de l'absorption d'azote par les plantes, liée à une minéralisation* stimulée par la température (fig. 6), on peut s'attendre à une augmentation de la teneur en protéines du blé bio.

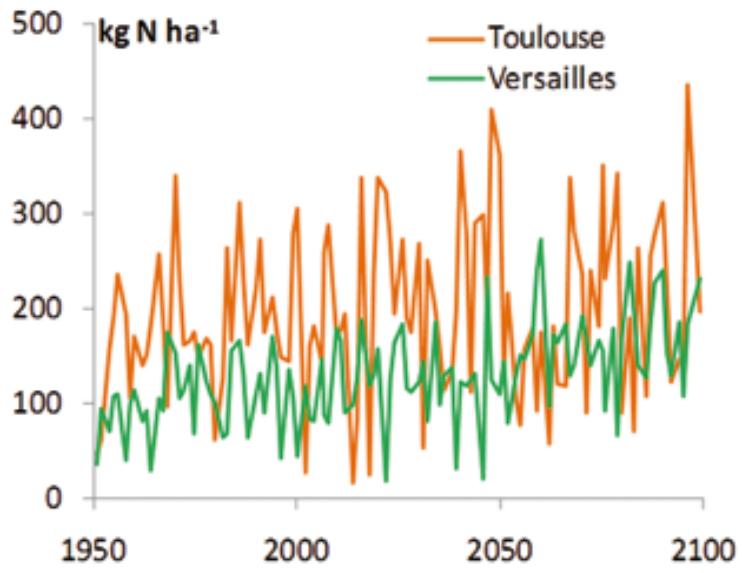


Figure 6 : *évolution de l'absorption d'azote du blé bio à Toulouse et Versailles pour le sol 1 et la méthode de régionalisation TT.*

Cette augmentation se vérifie de façon plus régulière dans les sites du Nord que dans les sites du Sud (fig. 7). En effet, dans le Sud (Toulouse), les risques de teneurs faibles augmentent à cause de la sécheresse qui pénalise l'absorption d'azote.

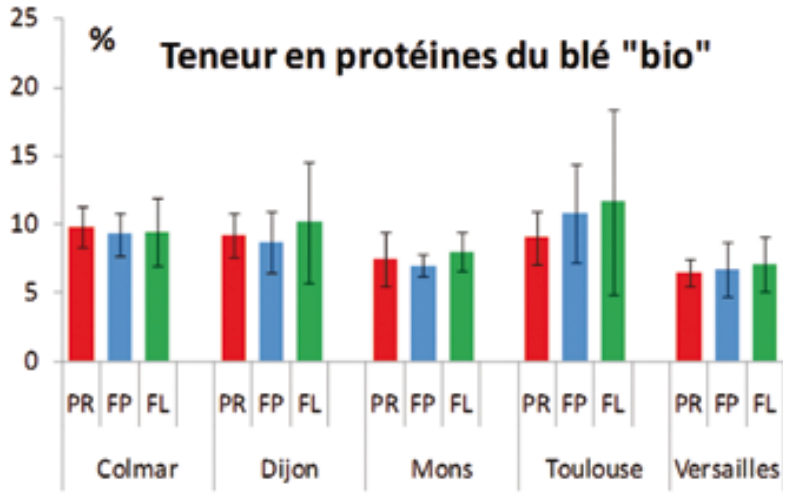


Figure 7 : *évolution de la teneur en protéines du blé bio pour divers sites, sol 1 et méthode de régionalisation TT.*

E Agriculture biologique et environnement

La présence de légumineuses dans la rotation et l'apport massif de lisier favorisent le lessivage des nitrates : c'est là un inconvénient des systèmes biologiques qui, de ce point de vue, sont tout à fait comparables à la rotation d'agriculture conventionnelle intensive (MBCB) comme le montrent les cartes de la figure 8. Toutefois, la baisse de pluviométrie rendra ce problème moins prégnant dans le futur, en particulier dans les sites de l'Ouest (Lusignan, Rennes, Bordeaux).

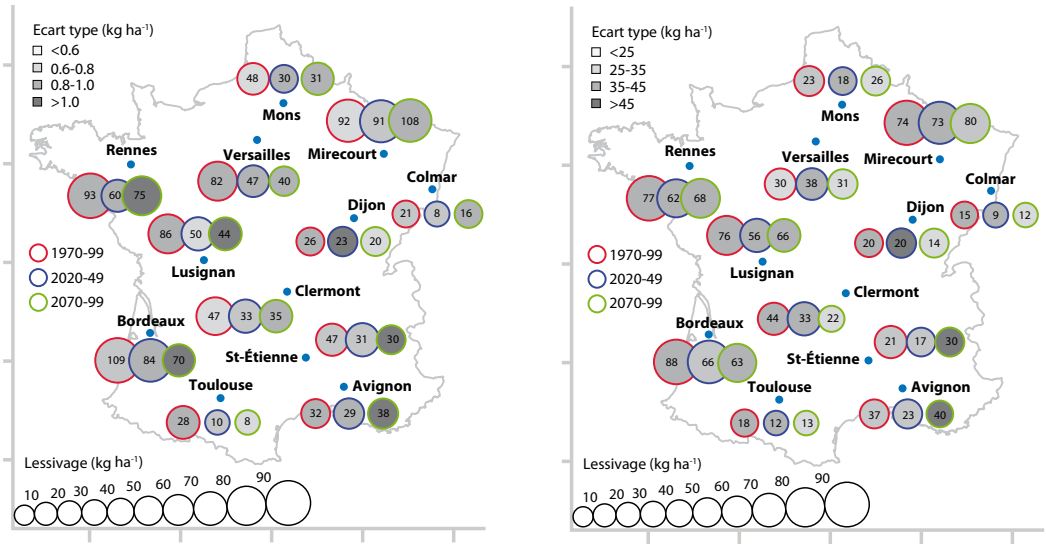


Figure 8 : *comparaison de l'évolution du lessivage des nitrates sous la rotation « bio » à gauche et la rotation conventionnelle MBCB à droite (sol 1 et méthode de régionalisation climatique TT).*

En matière de stockage de carbone, même en exportant une partie des résidus pour l'élevage, souvent associé aux systèmes biologiques, ce système reste très intéressant (cf. fiche MATIÈRE ORGANIQUE).

F Nuances régionales et incertitudes

	FP-PR	FL-PR
Avignon	~~-0.6~~	~~-0.9~~
Bordeaux	~~0.2~~	~~0.2~~
Clermont	**2.3**	**3.5**
Colmar	*0.7*	*1.8*
Dijon	*1.0*	*1.8*
Lusignan	~~0.7~~	~~1.7~~
Mirecourt	~~0.3~~	~~0.7~~
Mons	*0.7*	*1.0*
Rennes	~~0.9~~	~~0.9~~
Saint-Étienne	~~0.4~~	~~0.8~~
Toulouse	~~0.1~~	~~0.2~~
Versailles	~~0.3~~	~~2.1~~
Tous sites	**0.6**	**1.1**

Tableau 1 : *évolution des rendements de blé bio (sol 1, climat : TT). La significativité de l'évolution par rapport à la variabilité interannuelle est notée de la façon suivante :* **Gras** *($p < 0.01$), Italique ($p < 0.05$), ~~Barré~~ (non significatif).*

Même si l'évolution de la productivité du blé bio est en moyenne partout positive, le tableau 1 montre qu'elle n'est que rarement significative au regard de la variabilité interannuelle, même dans les sites, comme Versailles ou Lusignan, où la moyenne de la progression est supérieure à 1 t ha^{-1}. Cela est dû à la forte sensibilité du système à la variabilité climatique d'une année à l'autre. Notons que certains sites à climat froid (Colmar, Dijon, Clermont) font exception et présentent une augmentation significative des rendements de blé en bio. Il est également intéressant de souligner que la tendance du FL prolonge celle du FP sans la modifier.

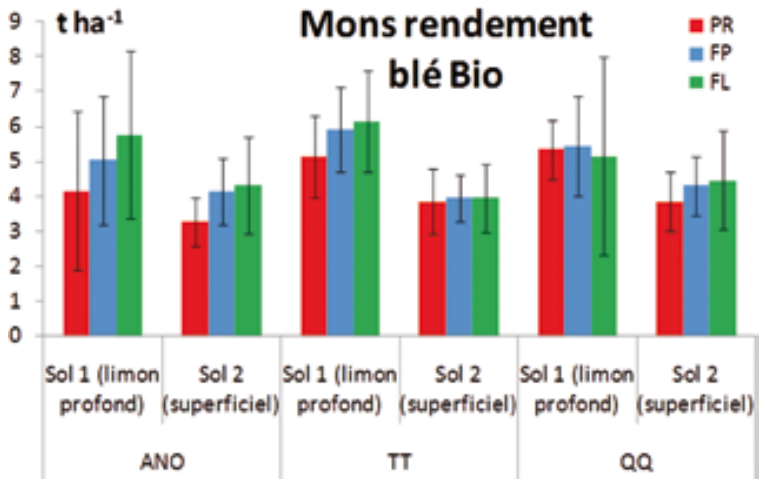


Figure 9 : *influence de la méthode de régionalisation du climat combinée au type de sol sur les résultats de productivité du blé bio à Mons.*

Si l'on se focalise sur le site de Mons (fig. 9), on s'aperçoit que cette augmentation ne se vérifie pas pour toutes les méthodes de régionalisation. Ainsi, la méthode QQ, qui produit par nature des scénarios climatiques plus variables, simule une production de blé bio beaucoup plus risquée que la méthode TT. Lorsque l'on utilise un sol à plus forte contrainte, les réponses sont plus cohérentes pour les deux méthodes TT et QQ et concluent à une évolution non significative, alors que la méthode des anomalies, qui reproduit dans le futur la variabilité du passé, conserve la même logique que pour le sol limoneux profond.

Ce qu'il faut retenir

✓ L'agriculture biologique ne semble pas devoir être défavorisée par le changement climatique dans le cadre de rotations mixtes céréales-fourrages : la probabilité de rendements supérieurs à 4 t ha^{-1} a tendance à augmenter et la différence entre cultures biologique et conventionnelle tend à diminuer. On peut également s'attendre à une augmentation sensible de la teneur en protéines des blés bio dans les zones céréalières du Nord. Les problèmes environnementaux, liés aux lessivages des nitrates, seront largement diminués, en particulier dans les sites de l'Ouest. On constate que, dans le FL, la variabilité interannuelle augmente, ce qui fragilisera l'agriculture biologique dans les conditions contraignantes de sol et de climat.

Ce qu'il reste à approfondir…

✓ Ce cas d'étude limité à une seule rotation doit être étendu à d'autres types de rotation incluant maïs et oléagineux. D'autres produits de fertilisation organique, avec des dynamiques de minéralisation variées, pourraient être testés. Cette thématique mériterait également un approfondissement des simulations en matière de cultures légumineuses. Et, surtout, il conviendrait d'analyser l'évolution des ennemis des cultures (en particulier des adventices) pour être à même d'estimer l'évolution des risques sanitaires auxquels l'agriculture biologique est sensible (cf. fiche SANTÉ).

Pour en savoir plus…

Aubert C., 2009 - Agriculture biologique et changement climatique : principales conclusions du colloque de Clermont-Ferrand (2008) in *Revue Innovations Agronomiques*, 4.

Halberg N., Alrøe H., Fjelsted K., Trydeman M. and Kristensen E.K. (eds.), 2006 - *Global Development of Organic Agriculture: Challenges and Prospects.* CABI Publishing.

IFOAM-EU, 2009 - *The contribution of organic agriculture to climate change mitigatio* : http://www.ifoam.org/growing_organic/1_arguments_for_oa/environmental_benefits/pdfs/IFOAM-CC-Mitigation-Web.pdf

Kirchmann H., Bergström L. (eds.), 2008 - *Organic Crop Production. Ambitions and Limitations.* Springer Science, 244p.

Pretty J., Hine R. (eds), 2002 - *Reducing Food Poverty with Sustainable Agriculture* : *A Summary of New Evidence.* Essex : CES Report. UK: University of Essex, 2002.

Raupp, J. and Oltmanns, M., 2008 - Organically fertilized plants can manage water-limited growth conditions better than minerally fertilized plants. Results from a multi-year experiment. 17th International Symposium of CIEC: Plant nutrient management under stress conditions, Cairo, Egypt, 24-27 Nov., 2008. In: *Proceedings of the 17th International Symposium of CIEC*, NRC, Cairo, Egypt.

D

Les régions

Les régions

D

Cette partie décline, pour sept zones géographiques, les principaux résultats obtenus sur les cultures les plus emblématiques de ces périmètres, proposant ainsi une approche territoriale des impacts agricoles et forestiers du changement climatique.

- **D1 - Géoclimat**

- **D2 - Centre-Nord :**
  Centre / Champagne-Ardenne / Île-de-France / Nord-Pas-de-Calais / Haute-Normandie / Picardie

- **D3 - Ouest :**
  Bretagne / Basse-Normandie / Pays de la Loire

- **D4 - Nord-Est :**
  Alsace / Bourgogne / Franche-Comté / Lorraine

- **D5 - Centre-Est :**
  Auvergne / Limousin / Rhône-Alpes

- **D6 - Sud-Ouest :**
  Aquitaine / Midi-Pyrénées / Poitou-Charentes

- **D7 - Sud-Est :**
  Languedoc-Roussillon / Provence-Alpes-Côte-d'Azur

- **D8 - Antilles :**
  Guadeloupe / Martinique

Les zones géographiques ont été constituées par regroupement de régions administratives, dans un souci de cohérence agricole et climatique.

Les résultats sont issus de un à trois sites par zone géographique, de telle sorte qu'ils se situent davantage dans une logique d'illustration que de représentativité spatiale *stricto sensu*.

Potentiel de déplacement géographique des cultures et des essences forestières

Éric Lebon, Vincent Badeau

D 1
Géoclimat

A 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 selon le niveau de spécialisation et les caractéristiques des filières de production dominantes.

L'objectif de cette fiche est de présenter l'ampleur attendue de ces déplacements, au travers de l'étude de l'impact du changement climatique sur un choix de filières représentatives de la diversité des productions végétales, et de dégager quelques spécificités par grand type de production.

Cette fiche reprend, par certains aspects, la fiche ATOUTS ET VULNÉRABILITÉS (mais sans prendre en compte la notion de rendement* prise au sens économique du terme et sans entrer dans les détails physiologiques), ainsi qu'une partie de l'information des fiches CULTURES.

B Concepts, mécanismes et variables utilisés

L'approche retenue s'appuie sur une analyse des facteurs limitants 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 responsables d'une augmentation de l'intensité et de la durée des stress hydriques* (cf. fiche EAU). Ces mécanismes sont analysés au travers d'indicateurs agroclimatiques classiques, exprimant les besoins thermiques (cf. fiche TIMING), le niveau de satisfaction des besoins en eau (cf. fiche 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 CO_2 (cf. fiche FORÊT).

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

Une première analyse des résultats de nos simulations révèle un tableau contrasté selon 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.

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 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.

Dans le cas de la production de blé, les simulations effectuées suggèrent un maintien voire un accroissement de la faisabilité de la culture et des rendements sur quasiment l'ensemble du territoire national. Les scénarios (scénarios d'émissions et méthodes de régionalisation*) sur lesquels nous avons travaillé ne semblent pas devoir remettre en cause la distribution géographique actuelle des régions productrices. On note, en outre, que la culture de blé pourrait permettre de valoriser les sols sensibles aux excès d'eau de la façade Ouest.

Dans le cas des productions fourragères, le changement climatique pourrait conduire tout au plus à une augmentation des rendements de 5 à 20 %, en raison d'un allongement de la période de production aux intersaisons. Cette augmentation serait plus importante pour la fétuque dans les régions de l'Est que dans l'Ouest et le Sud, où la diminution progressive des précipitations se traduirait par un accroissement du déficit hydrique estival.

La culture du tournesol reste possible sur l'ensemble des sites* étudiés avec des rendements plutôt en hausse et une remontée possible des variétés à cycle long dans les régions Nord et Est. Sa culture n'est cependant pas remise en question dans les régions Sud.

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 lesquelles les conditions climatiques estivales jouent un rôle déterminant dans l'élaboration du rendement, de la qualité voire pour la pérennité de la culture (forêt).

Cas des cultures annuelles : exemple du maïs

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 (-1 $t.ha^{-1}$ pour le FP*) et, d'autre part, des besoins accrus en eau (environ 50 mm en moyenne dans le FP). Face à ce constat, une relocalisation de cette culture dans le nord de la France, où les conditions thermiques deviendront progressivement favorables, et l'adoption de variétés à cycle long devraient 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.

Cas des cultures pérennes

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. 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).

Exemple de la vigne

La structure des modèles utilisés dans le cadre du projet ne permet pas de prendre en compte les pentes. En conséquence, les résultats présentés ici doivent être nuancés pour les régions viticoles en situation de coteaux. Par ailleurs, le niveau de faisabilité calculé dans cette étude pour le passé récent peut sensiblement différer de celui effectivement observé. C'est en particulier le cas des vignobles situés en limite nord de la zone de culture, pour lesquels la station météorologique de référence utilisée, située en dehors de l'aire viticole, peut ne pas rendre compte des effets climatiques locaux liés à la topographie du vignoble.

La vigne est une production qui présente de très fortes spécificités régionales (mode de production, type de produit), en lien avec les caractéristiques pédoclimatiques (au sens de terroir) de chaque zone. Le fait le plus marquant relevé par l'étude est une évolution majeure de la distribution des zones de production potentielles sous l'effet de l'accroissement généralisé du potentiel thermique (fig. 1). Ce phénomène se manifeste, pour le FP, par une augmentation de l'indicateur faisabilité qui devient >80 % dans les régions traditionnellement situées en limite nord de production (Dijon, Colmar) et une extension possible de la viticulture vers les stations plus septentrionales (Rennes, Versailles, Mons et Mirecourt) pour le FL*.

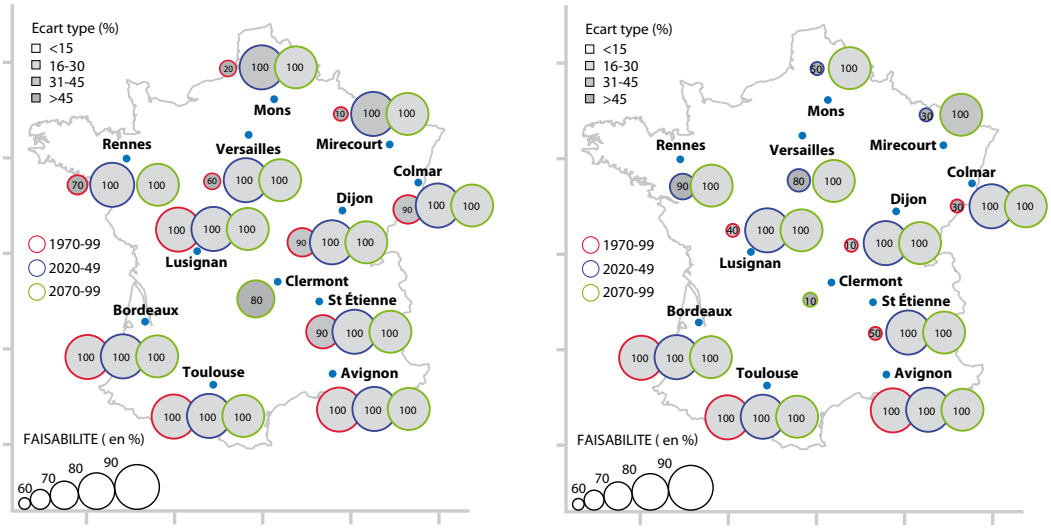


Figure 1 *: faisabilité de la culture d'une variété précoce de vigne (cépage chardonnay, à gauche) et d'une variété méditerranéenne plus tardive (cépage grenache noir, à droite) pour les périodes PR (rouge), FP (bleu) et FL (vert), modèle STICS, méthode de régionalisation TT.*

Cet accroissement des potentialités thermiques va également conduire à une modification de la distribution géographique des cépages traditionnellement attachés à des zones de production bien définies (AOC). Les simulations réalisées montrent que la culture du chardonnay, cépage précoce, va devenir possible sur l'ensemble des stations étudiées dans le futur lointain, alors qu'un cépage méditerranéen comme le grenache noir pourra être cultivé jusqu'à la limite nord actuelle de culture de la vigne (fig. 1). Au-delà de nouveaux «périmètres thermiques», les zones réellement cultivées se détermineront en fonction de paramètres complémentaires, tels que les propriétés physiques des sols qui impactent la qualité et la typicité des vins.

L'augmentation des températures nocturnes pendant la période de maturation dans les régions méridionales pourrait constituer une limite au maintien du potentiel qualitatif de ces régions. Des températures minimales moyennes durant le mois de septembre (indice de fraîcheur des nuits) supérieures à un seuil voisin de 14 °C limiteraient l'accumulation des composés phénoliques et aromatiques de la baie de raisin (Tonietto et Carbonneau, 2004). Les simulations de cet indice réalisées sur les sites viticoles pour les périodes PR, FP et FL montrent que cette valeur seuil est dépassée pour la période FP à Avignon et dépassée pour la période FL à Bordeaux, Toulouse et Avignon (fig. 2). Ce dernier site représentatif de la zone méditerranéenne atteint des valeurs d'indice de fraîcheur des nuits supérieures à 18 °C, ce qui le rapproche des températures observées aujourd'hui dans les zones viticoles les plus chaudes (ex : Malaga en Espagne ; Haïfa en Israël).

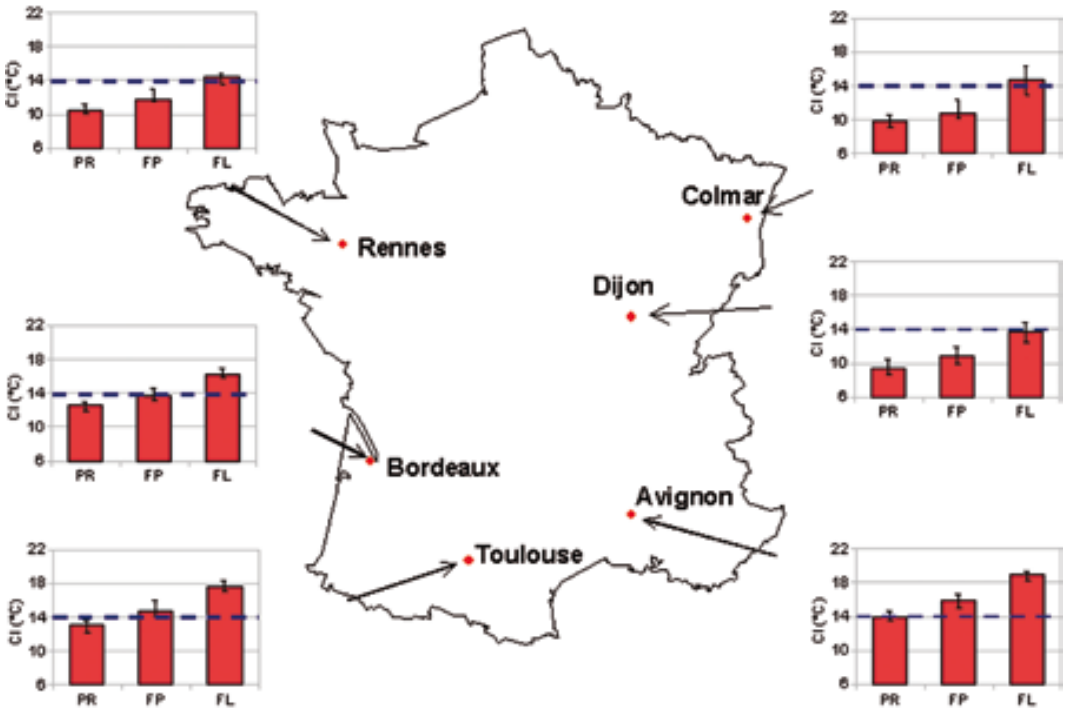


Figure 2 *: évolution de l'indice de fraîcheur des nuits (CI) (Tonietto et Carbonneau, 2004) dans des sites viticoles pour les 3 périodes : passé récent (PR), futur proche (FP) et futur lointain (FL). Le trait horizontal discontinu illustre le seuil de l'indice CI au-delà duquel l'accumulation des composés phénoliques et aromatiques est limitée. Méthode de régionalisation QQ.*

Enfin, l'accentuation des besoins en eau pour maintenir les conditions actuelles implique un accès à la ressource, qui peut passer par une relocalisation du vignoble à une échelle régionale ou plus localement en fonction des types de sol, ou bien par le développement d'infrastructures hydrauliques.

Exemple de la forêt

Les simulations réalisées montrent, tous scénarios et méthodes de régionalisation confondus, (i) une augmentation du stress hydrique dès le futur proche ; (ii) une diminution de la productivité potentielle du pin maritime sur les 12 sites et (iii) une forte évolution de la distribution potentielle des essences. Ces résultats sont convergents en ce qui concerne une progression potentielle vers le nord des climats méditerranéen et aquitain, au détriment des influences océanique, continentale et montagnarde. Ces tendances modifient le contour des aires potentielles de distribution des essences. À titre d'exemple, le hêtre tend à régresser à partir de marges sud et ouest, puis de façon générale (fig. 3a), alors qu'à l'inverse, le chêne vert pourrait se développer dans la moitié nord de la France dans le futur lointain (fig. 3b).

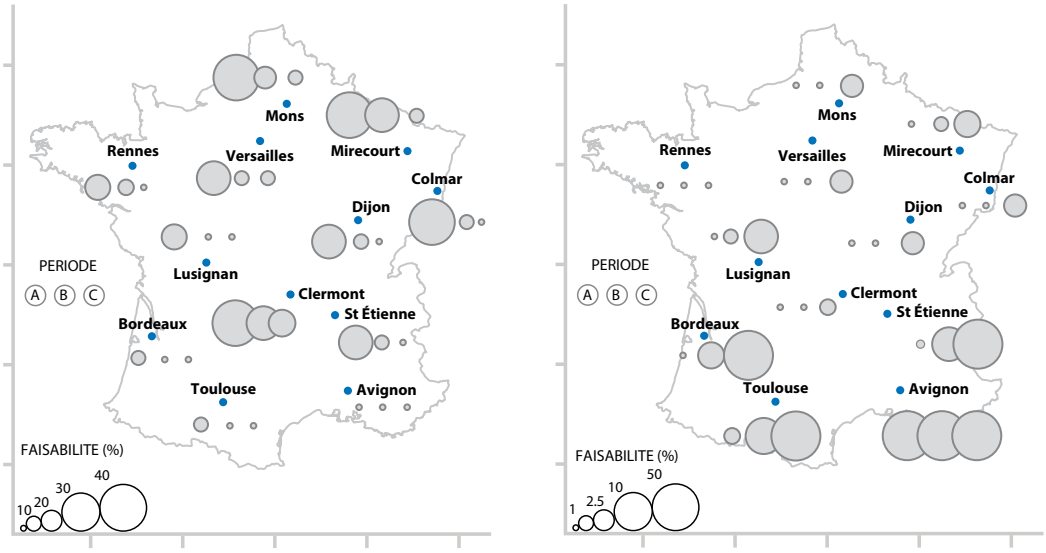


Figure 3 *: présence potentielle du hêtre (à gauche) et du chêne vert (à droite) pour les périodes (A) PR, (B) FP et (C) FL. Méthode de régionalisation TT ; le sol n'est pas pris en compte.*

Quels que soient la réserve utile*, le type de couvert ou la projection climatique, on observe une dégradation du bilan hydrique des forêts : les stress hydriques qui influencent directement la productivité et l'état sanitaire des forêts augmentent en durée et en intensité. Cette évolution est particulièrement sensible pour les forêts de conifères dès la période FP (cf. fiche FORÊT).

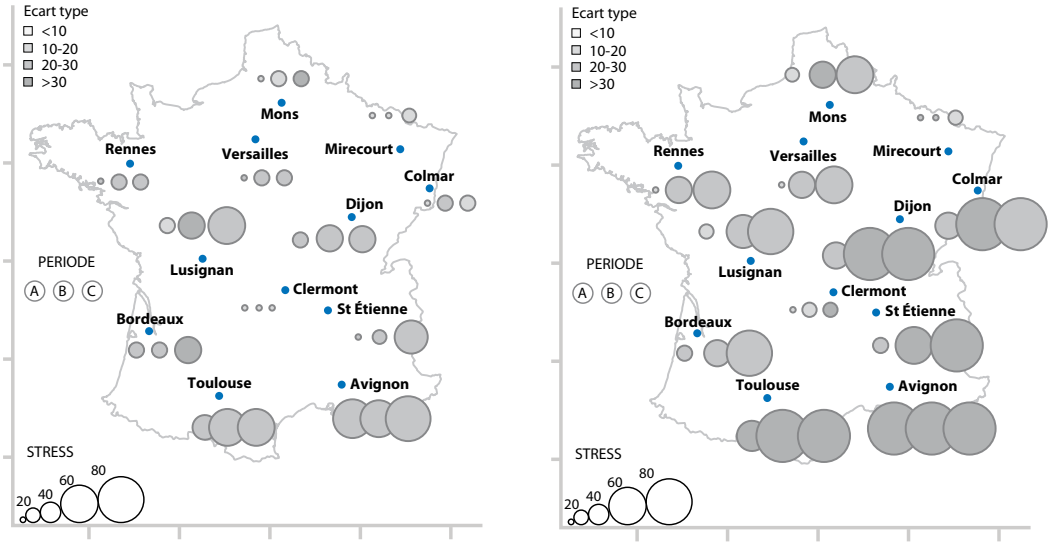


Figure 4 *: évolution du stress hydrique pour une forêt de feuillus (à gauche) et une forêt de conifères (à droite), pour les périodes (A) PR, (B) FP et (C) FL. Méthode de régionalisation TT ; même indice foliaire*. Sol commun (forte RU).*

Ce qu'il faut retenir

- 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 relocalisées 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 devrait 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 resteront probablement des forêts, car elles sont en grande majorité situées sur des terroirs impropres à l'agriculture (sols très acides ou très calcaires, caillouteux, hydromorphes, etc.), mais il n'est pas impossible que l'expansion continue des espaces forestiers depuis 1830, s'arrête, voire reparte à la baisse (les derniers chiffres de l'enquête TERRUTI vont dans ce sens). La composition en essences des forêts risque par contre d'être modifiée, mais dans un sens pour l'instant assez difficile à évaluer. Peut-être verrons-nous des forêts plus mélangées, afin de tamponner les effets potentiels des changements climatiques et des évènements extrêmes ; peut-être verrons-nous, au contraire, des forêts à vocations plus spécifiques (développement des taillis à courte révolution pour le bois énergie) ; peut-être verrons-nous se développer l'usage d'essences pour l'instant marginales en dehors de leurs aires actuelles de distribution (pin maritime et pin d'alep, par exemple, ou encore cèdre). 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.

Ce qu'il faut approfondir…

- On peut imaginer l'introduction de nouveaux systèmes de production comme, par exemple, les agrumes dans les régions les plus méridionales.
- Dans le cas de la forêt, l'utilisation d'essences allochtones ou de provenances peu ou non encore utilisées est envisageable pour se substituer aux peuplements les plus vulnérables aux sécheresses édaphiques. L'acquisition de connaissances sur l'identification des caractères ou traits conférant un avantage adaptatif (phénologie, résistance à la sécheresse, etc.) ou sur les phénomènes épigénétiques ou encore sur les effets de la variabilité intra- et inter-population sur leur vulnérabilité aux changements climatiques et aux évènements extrêmes, peut modifier la répartition des essences forestières.

  Pour la plupart des cultures (y compris la vigne), l'irrigation est envisageable. Ce n'est pas le cas pour la forêt. L'incertitude concernant les couverts forestiers est donc totalement dépendante des incertitudes sur les précipitations.
- L'évolution du paysage agricole sera contrainte par les besoins économiques et les seuils de rentabilité. Dans le cas particulier de la forêt, l'évolution des paysages, des essences et des types de gestion sera par ailleurs contrainte par les demandes sociétales pour la forêt, la vitesse de migration des espèces (qui ne pourront pas suivre en temps réel les évolutions climatiques), les épisodes de dépérissement, voire de mortalité, en liaison avec des évènements extrêmes* et leur récurrence (sécheresses, canicules, tempêtes).

Pour en savoir plus…

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.

Jones G., White M.A., Cooper O.R., Storchmann K., 2005 - Climate change and global wine quality. *Climatic Change*, 73: 319–343.

Poisson S., 2009. - Caractérisation des climats à venir, spatialisation sur le territoire français métropolitain et application à l'agronomie. In *Compte-rendu du colloque ACTA*. 22/10/2009 : 59-69.

Tonietto J., Carbonneau A., 2004 - A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide. *Agricultural and Forest Meteorology*, 124: 81-97.

Changement climatique en zone Centre-Nord : aperçu des impacts agricoles

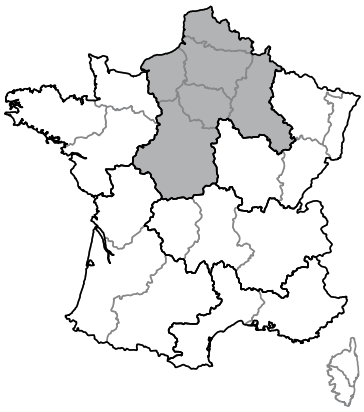
D2
Centre-Nord

Frédéric Levrault, Marie-Odile Bancal,
Nadine Brisson, Philippe Pieri

Régions concernées :

- ***Centre***
- ***Champagne-Ardenne***
- ***Haute-Normandie***
- ***Île-de-France***
- ***Nord-Pas-de-Calais***
- ***Picardie***

Sites d'étude : Mons, Versailles.



Territoire	Surf (ha)	% ST	Surf. Agricole Utile	Surf (ha)	% ST
Surface totale	12 152 281		SAU des E.A.	7 454 287	
Bois et forêts	2 509 639	0,21	Terres arables	6 291 706	0,84
SAU totale	7 607 851	0,63	STH	1 080 634	0,14
Autres	2 034 791	0,17	Cult permanentes	73 197	0,01

Nette diminution des précipitations, augmentation significative du rendement du blé dans le FP et le FL, stagnation des rendements du colza, augmentation significative des rendements du maïs accompagnée d'une augmentation des besoins en eau d'irrigation dès le FP, viticulture devenant faisable dès le milieu du siècle dans le centre et le nord de la zone, telles sont les principales tendances mises à jour pour la zone Centre-Nord.

A Quelques faits marquants du changement climatique* dans la zone* Centre-Nord

Température

La température moyenne annuelle dans les deux sites* de la zone Centre-Nord augmente de façon quasi similaire au comportement d'ensemble des 12 sites étudiés : + 1,4 °C à Mons et + 1,5 °C à Versailles, entre le PR* et le FP* ; + 2,8 °C à Mons et + 2,9 °C à Versailles, entre le PR et le FL*. Ainsi, dans le FP, la température moyenne annuelle à Mons (13,4 °C) dépasse celle de Lusignan dans le PR (13,0 °C). Dans le FL, la température moyenne annuelle de Mons (14,8 °C) dépasse celle de Bordeaux dans le PR (12,9 °C). Pour la zone Centre-Nord, une conséquence importante de ce réchauffement pour les espèces cultivées est l'accroissement de la disponibilité thermique* qui autorisera les cultures à besoins élevés en chaleur (tournesol, par exemple). Les températures très élevées seront moins nombreuses que dans le sud de l'Hexagone. On note, cependant, qu'entre avril et juin, le nombre moyen de jours échaudants* à Versailles augmente sensiblement dans la deuxième moitié du XXIe siècle : 7 jours dans le PR, 10 jours dans le FP, puis 19 jours dans le FL.

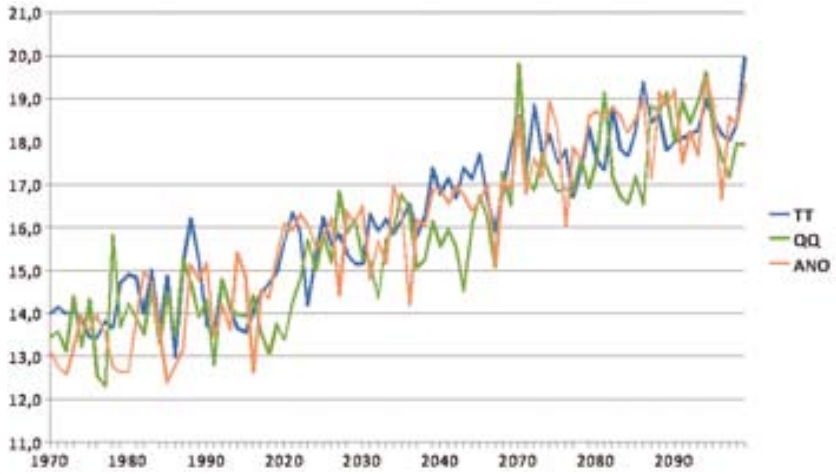


Figure 1 *: évolution de la température moyenne annuelle (°C), de 1970 à 2100, à Versailles. Scénario A1B*. Méthodes de régionalisation* : ANO*, TT* et QQ*.*

Précipitations et évapotranspiration

Dans le PR, un contraste assez net s'observe entre Versailles (620 mm de cumul annuel) et Mons (876 mm). Dans le FP, chacun des deux sites subit la même diminution de cumul annuel de précipitations (–73 mm par rapport au PR), ce qui maintient l'écart observé dans le PR. À cette échéance, Versailles est le moins arrosé des 12 sites étudiés, avec 547 mm de cumul annuel, soit 40 mm de moins que Toulouse à la même période. Dans le FL, l'assèchement se poursuit, plus marqué dans le nord de la zone avec une diminution du cumul annuel de précipitation de –109 mm à Versailles et de –183 mm à Mons. À cette deuxième échéance, Versailles est le deuxième moins arrosé des 12 sites étudiés avec 511 mm de cumul annuel. Par rapport aux conditions actuelles, la moindre pluviosité automnale conduira à davantage de jours disponibles* pour les chantiers d'automne.

Une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ET0*) est mise en évidence à Mons et à Versailles, quelle que soit la méthode de régionalisation. Les augmentations du cumul annuel (moyenne par période de 30 ans) sont ainsi :

- à Mons, de 60 à 75 mm entre le PR et le FP et de 145 à 170 mm entre le PR et le FL ;
- à Versailles, de 60 mm entre le PR et le FP et de 120 à 145 mm entre le PR et le FL.

Ceci représente (moyenne des méthodes TT et QQ) un accroissement moyen de 0,4 mm/jour entre le PR et le FL. Nous n'avons pas étudié la répartition entre saisons de cet accroissement, mais les périodes de forte demande évaporative (printemps et été) prendront largement leur part de ces augmentations.

La concomitance de la baisse des pluies et de la hausse de l'évapotranspiration conduira (fig. 2) à une dégradation marquée du déficit hydrique climatique annuel.

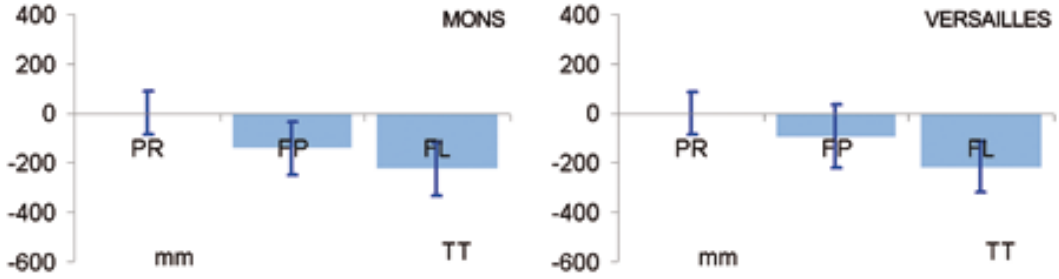


Figure 2 *: déficit hydrique climatique (pluies – ET0) annuel dans le PR, le FP et le FL, à Mons (à gauche) et à Versailles (à droite). ARPÈGE AIB. Méthode de régionalisation TT. L'ET0 est calculé sans la correction liée au CO_2 (cf. fiche MODÈLES).*

Rayonnement global

À Versailles, on observe une augmentation progressive du rayonnement global jusqu'en 2100. Dans le PR, le rayonnement global annuel moyen est de 397 000 (méthode QQ) à 401 000 (méthode TT) J/cm²/an, ce qui représente en moyenne un peu moins de 1100 J/cm²/jour. Dans le FL, le rayonnement global annuel moyen est de 432 000 (méthode QQ) à 457 000 (méthode TT) J/ cm_2/ an, ce qui représente en moyenne un peu moins de 1 220 J/cm²/jour. Ce « supplément » radiatif de 120 J/cm²/jour explique l'augmentation significative de l'évapotranspiration potentielle (ET0). À Mons, dans le PR, le rayonnement global annuel moyen est de 395 000 (méthode TT) à 399 000 (méthode QQ) J/cm²/an. Dans le FL, le rayonnement global annuel moyen est de 433 000 (méthode QQ) à 457 000 (méthode TT) J/cm²/an, ce qui représente un supplément radiatif journalier moyen de plus de 130 J/cm²/jour.

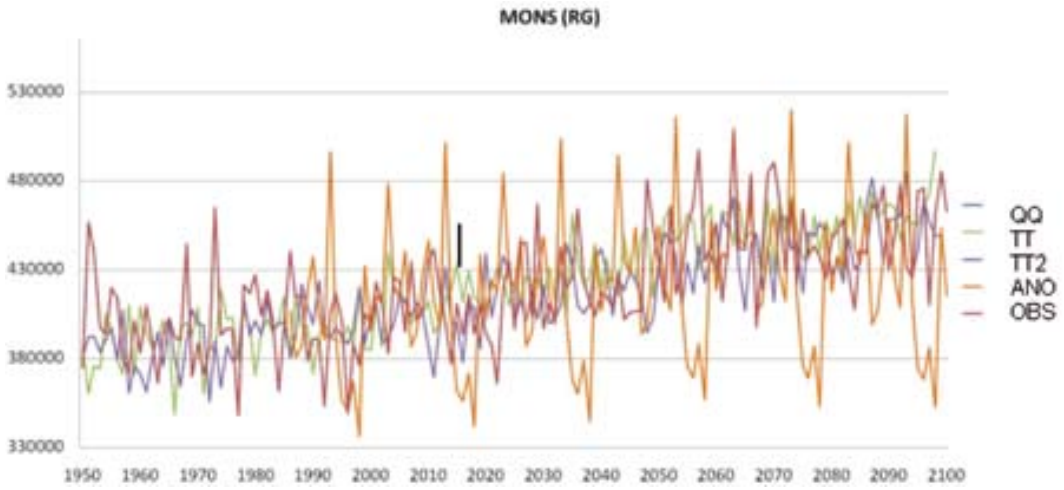


Figure 3 *: évolution du cumul annuel de rayonnement global (J/cm²/an) de 1950 à 2100, à Versailles. ARPÈGE A1B. Méthodes de régionalisation standard : ANO, TT et QQ, auxquelles ont été ajoutées la méthode TT2 (cf. fiche CLIMAT) et les données observées sur le PR.*

Rappel sur la production agricole actuelle en zone Centre-Nord
(Source Agreste)

Cultures	Surf (ha)	% SAU	Rdt
Blé tendre	2 381 316	0,32	75
Colza	626 864	0,08	32
Maïs grain et sem	285 845	0,04	90
Prairies t & a	273 197	0,04	87
Maïs fourr et ens	237 463	0,03	133
Tournesol	99 163	0,01	25
Blé dur	70 093	0,01	62
Vigne	54 423	0,01	104
Sorgho	3 281	0,00	48
…/…			
Total	4 031 646	0,54	

Les cultures étudiées dans le projet CLIMATOR couvrent 54 % de la SAU de la zone Centre-Nord. Celle-ci compte 65 045 exploitations agricoles professionnelles, 86 579 exploitants et co-exploitants. L'ensemble des actifs agricoles représente 141 496 UTA. La valeur des produits agricoles végétaux bruts et transformés s'établit à 13,2 milliards d'euros en 2008.

B Principaux impacts du changement climatique sur le blé en zone Centre-Nord

Le blé tendre est la principale culture du Centre-Nord, occupant 32 % de la SAU et représentant près de 50 % de la production française de blé, avec les rendements moyens les plus élevés (de l'ordre de 7,5 t ha^{-1}).

Pour les deux sites de Mons et Versailles, le changement climatique aboutit à des augmentations significatives de rendement, respectivement de 8 % et 10 % pour le FP et 9 % à 12 % pour le FL pour la variété précoce Soissons (tab. 1). Ce résultat est dû à l'action bénéfique du CO_2 qui permet de compenser la dégradation du confort hydrique* des cultures pendant le remplissage (de 4 % à 14 % dans le FP et de 13 % à 21 % dans le FL, pour les sites de Mons et Versailles respectivement) et l'augmentation des stress thermiques de fin de cycle (cf. fiche TIMING).

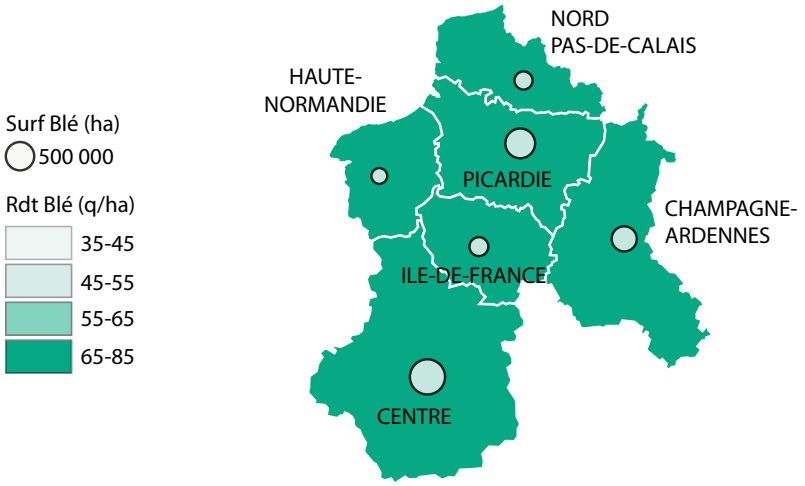


Figure 4 *: surfaces et rendements actuelsdu blé en zone Centre-Nord (moyennes 2000–2007) Source Agreste.*

Les mêmes tendances sont observées pour la variété tardive, Arminda, avec néanmoins un plus faible accroissement des rendements (4 % au maximum), car la longueur du cycle limite les phénomènes d'esquive*, de sorte qu'elle est confrontée à une plus forte baisse du confort hydrique (de 12 à 24 %) et une plus forte augmentation des stress thermiques de fin de cycle.

En effet, les stress de fin de cycle augmentent (cf. fiche BLÉ) : le déficit hydrique pendant le remplissage du grain augmente de 37 et 28 mm dans le FL, pour les sites de Mons et Versailles respectivement. De même, on compte 5 à 8 jours échaudants de plus dans le FL pour la variété précoce. Par contre, le gel d'épis disparaît totalement en FP et FL (cf. fiche BLÉ). En outre, les pertes de rendement occasionnées par les deux principales maladies du blé diminuent de 15 à 20 % dans cette zone (cf. fiche SANTÉ).

Enfin, si le retard de la date de semis permet, sans perte de rendement, de mieux gérer les implantations dans le cas du site de Versailles, la faible réponse du rendement du blé futur à la modification de date de semis sur le site de Mons suggère que ce levier de l'itinéraire technique devra être raisonné site par site.

Site	FP-PR	FL-PR
Mons	*1.0*	*1.0*
Versailles	**0.9**	*0.8*

Tableau 1 : *gains de rendements estimés dans le FP et FL pour les sites du Centre-Nord. Italique : P < 0.05 ;* ***Gras*** *: P < 0.01.*

C Principaux impacts du changement climatique sur le colza en zone Centre-Nord

Sans changement d'itinéraire technique, à Mons, comme à Versailles, les rendements de colza stagnent, car des impacts négatifs du changement climatique empêchent la culture de profiter du CO_2 atmosphérique et de la réduction des risques de gel. Ces impacts négatifs s'exercent pendant la phase végétative.

Il s'agit tout d'abord de la difficulté de levée, liée à la sécheresse du lit de semence en été qui, allongeant la période semis-levée, engendre de faibles peuplements. La figure 6 montre cette tendance quelle que soit la méthode de régionalisation ; on voit considérablement augmenter l'occurrence de levées supérieures à 1 mois.

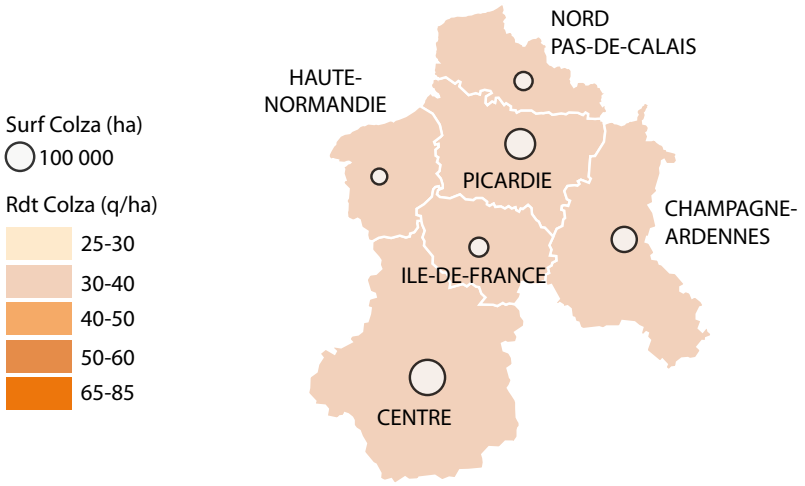


Figure 5 *: surfaces et rendements actuels du colza en zone Centre-Nord (moyennes 2000–2007) Source Agreste.*

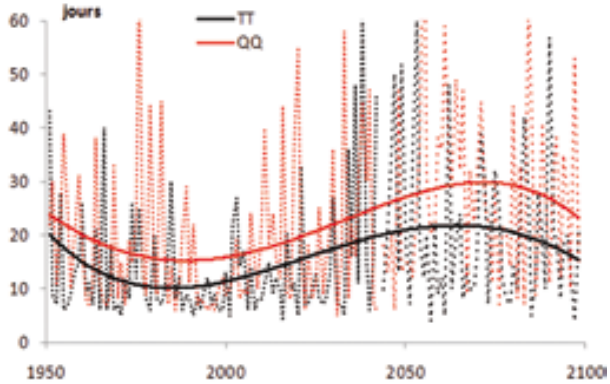


Figure 6 *: évolution de la durée de levée du colza à Versailles pour un semis du 20/08, pour le sol 1 et deux méthodes de régionalisation* climatiques. Un lissage polynomial d'ordre 4 permet de visualiser les tendances.*

Le second impact négatif, toujours lié à la sécheresse édaphique pendant les premières phases du cycle, s'exerce au niveau de l'alimentation azotée des plantes. En effet, malgré une disponibilité accrue de l'azote minéral du sol dans le futur, provenant de la stimulation de la minéralisation de la matière organique par le réchauffement, la plante se trouve en déficit azoté, car le faible flux transpiratoire ne lui permet pas de l'absorber.

Une à deux irrigations « starter » systématiques (parfois déjà pratiquées) permettraient sans doute de résoudre ces problèmes. En termes de précocité variétale, rien de franchement significatif n'est mis en évidence. Cependant, il est préférable de conserver une variété à cycle court comme Olphi, qui par un phénomène d'esquive se trouve dans de meilleures conditions d'absorption d'azote.

D Principaux impacts du changement climatique sur le maïs en zone Centre-Nord

Le Centre-Nord est la seule zone CLIMATOR où la production de maïs grain sera en augmentation significative (fig. 8), quelle que soit l'hypothèse climatique. Cette augmentation se fait essentiellement à la faveur d'une régularisation de la production interannuelle, permise par le réchauffement climatique, et se produira entre le PR et le FP.

Le maintien, voire l'augmentation, des rendements dans le FL sera possible en changeant de variété et en avançant les semis de l'ordre d'un jour tous les 4 ans.

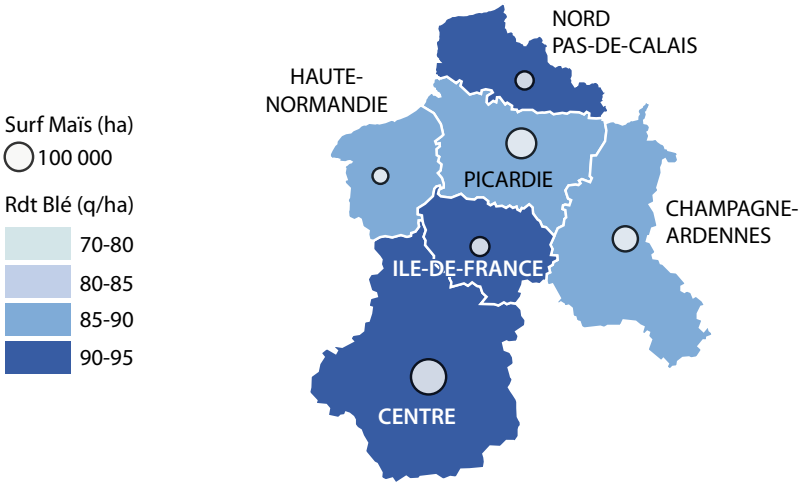


Figure 7 *: surfaces et rendements actuels du maïs en zone Centre-Nord (moyennes 2000–2007) Source Agreste .*

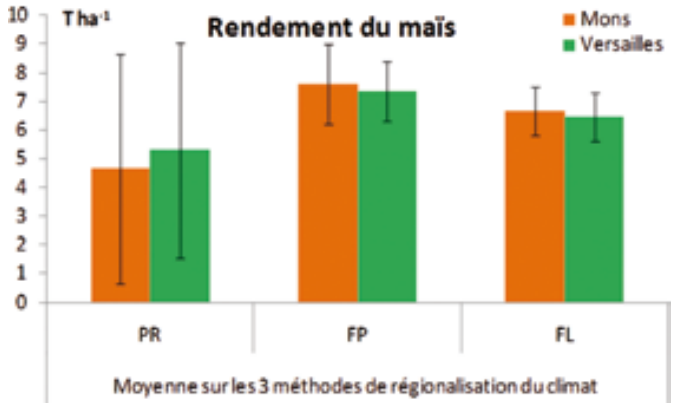


Figure 8 *: évolution des rendements de maïs grain (variété Méribel, sol 1) entre les 3 périodes avec indication d'une variabilité* intégrant l'interannuelle et la variabilité entre méthodes de régionalisation du climat.*

Cette évolution s'accompagne d'une augmentation des apports d'eau d'irrigation de l'ordre de 60 à 70 mm entre le PR et le FP, le changement variétal dans le FL n'engendrant qu'une faible hausse de ces apports (10 mm en moyenne). On passera ainsi de 80-100 mm dans le PR à 150-180 mm dans le futur.

L'intégration du maïs dans une rotation* céréalière se fera, dans le futur, sans avoir recours systématiquement à des techniques de séchage du grain. Elles resteront nécessaires 7 années sur 10 à Mons et 4 années sur 10 à Versailles dans le FP, pour disparaître dans le FL.

E Principaux impacts du changement climatique sur la vigne en zone Centre-Nord

La région Centre-Nord est représentée dans CLIMATOR par deux sites sans production viticole actuelle significative : Versailles et Mons. C'est typiquement une région peu éloignée de la limite nord de l'aire actuelle de culture de la vigne, et donc éventuellement concernée par un déplacement de cette limite.

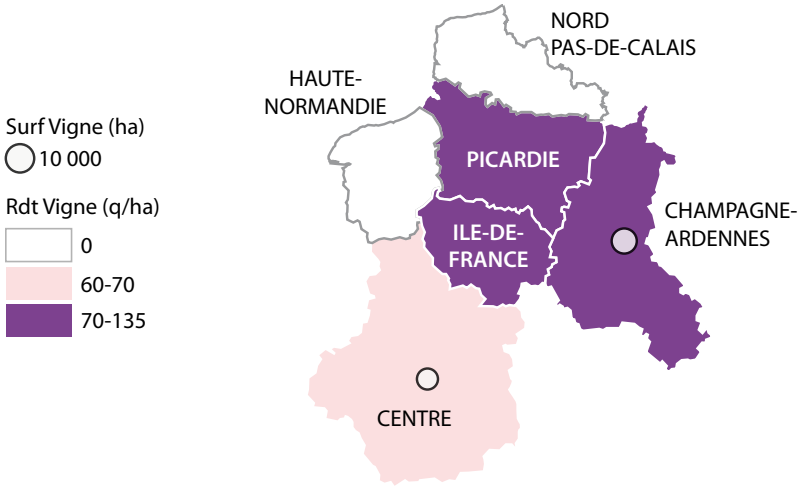


Figure 9 *: surfaces et rendements actuels de la vigne en zone Centre-Nord (moyennes 2000 – 2007) Source Agreste.*

Les simulations (scénario A1B) confirment que la culture de la vigne n'est pas réalisable actuellement, ni pour le chardonnay, ni pour le merlot, mais qu'elle le devient sporadiquement vers les années 2030 et régulièrement à partir de ~2050 (fig. 10 a et 10b).

À la fin du siècle, les dates de maturité avanceraient jusqu'à début septembre pour le chardonnay et mi-septembre pour le merlot. La faisabilité du grenache deviendrait non nulle à la fin du siècle, mais encore très irrégulière (toujours pour le scénario A1B). Ces tendances sont nettes, quelle que soit la série climatique simulée (ici représentée uniquement TT).

La maturation du chardonnay et du merlot sur ces deux sites se ferait dans de bonnes conditions moyennes de confort hydrique et dans des conditions thermiques favorables à la qualité (fig. 10 bas). L'augmentation des températures pendant la phase de maturation serait modérée et conduirait à des niveaux similaires ou peu supérieurs à ceux du passé récent dans la région de référence du cépage (chardonnay à Dijon et merlot à Bordeaux).

Les quantités d'eau transférées en profondeur diminueraient, mais moins nettement que dans les autres régions. Enfin, contrairement à d'autres sites comparables, la faisabilité nouvelle de la culture s'accompagnerait d'un risque faible à modéré vis-à-vis de Botrytis (cf. fiche SANTÉ). Le climat de cette région devrait donc, à moyen terme, devenir adapté au chardonnay et au merlot dans des conditions favorables à la qualité.

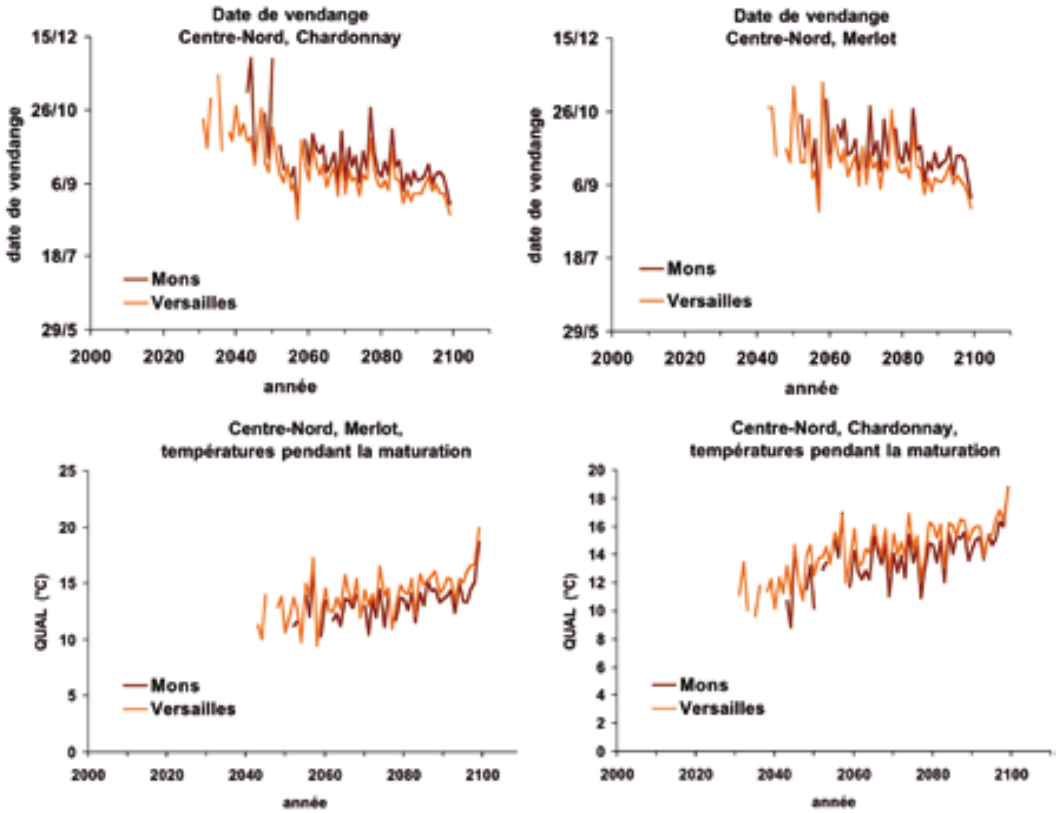
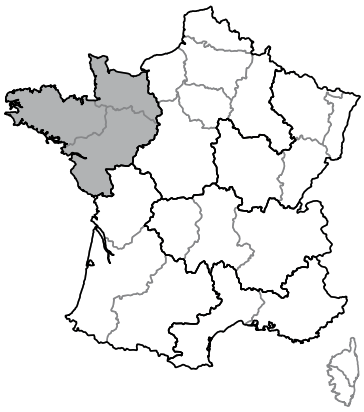


Figure 10 *: évolution de la date de vendange pour le chardonnay et le merlot (en haut gauche et droit) et de l'indicateur de qualité (température minimale pendant la maturation du raisin) pour le chardonnay et le merlot (en bas gauche et droit).*

Changement climatique en zone Ouest : aperçu des impacts agricoles et forestiers

D3
Ouest

Frédéric Levrault, Jean-Louis Durand,
Marie-Odile Bancal, Nadine Brisson



Régions concernées :

- ***Basse-Normandie***
- ***Bretagne***
- ***Pays-de-la-Loire***

Site d'étude : Rennes

Territoire	Surf (ha)	% ST	Surf. Agricole Utile	Surf (ha)	% ST
Surface totale	7 765 014		SAU des E.A	5 088 649	
Bois et forêts	854 949	0,11	Terres arables	3 816 317	0,75
SAU totale	5 487 730	0,71	STH	1 208 088	0,24
Autres	1 422 335	0,18	Cult permanentes	63 120	0,01

Hausse des températures légèrement tamponnée par l'influence océanique, dégradation du déficit hydrique climatique annuel, maintien de la productivité de la prairie dans le FP et accroissement dans le FL, maintien des rendements du blé en conventionnel et accroissement des rendements pour le blé non traité, augmentation du rendement du colza mais non significative car soumise à une forte variabilité entre années, accroissement des rendements du sorgho en sols profonds et possibilités d'emploi de variétés tardives dans le FL, telles sont les principales tendances mises à jour pour la zone Ouest.

A Quelques faits marquants du changement climatique* dans la zone* Ouest

Températures

C'est la zone qui se caractérise par la plus faible augmentation de température (à Rennes : + 1,3 °C entre le PR* et le FP* ; + 2,6 °C entre le PR et le FL*), en raison de la forte influence océanique qui y prévaut. Pour ce site*, l'augmentation de température envisagée pour le FP conduira à une température moyenne annuelle équivalente à celle de Lusignan (13 °C) dans le PR, soit environ 200 km plus au sud.

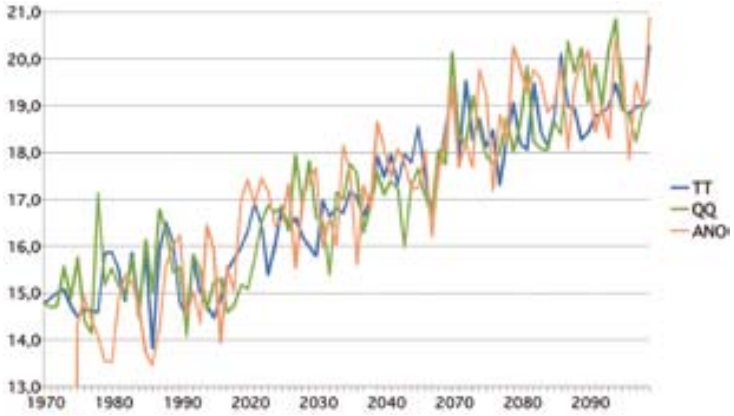


Figure 1 : *évolution de la température moyenne annuelle (°C) de 1970 à 2100, à Rennes. Scénario A1B*. Méthodes de régionalisation* : ANO*, TT* et QQ*.*

Précipitations et évapotranspiration

Dans la zone Ouest, une baisse sensible des précipitations est identifiée, mais plutôt dans la deuxième moitié du XXIe siècle. Dans le FP, Rennes se distingue (avec Colmar) de l'ensemble des autres sites par une baisse modérée du cumul annuel de précipitations : –37 mm entre le PR et le FP. Dans le FL, la baisse de précipitations est beaucoup plus conséquente : –110 mm par rapport au PR. À la fin du XXIe siècle, avec 547 mm de cumul annuel de pluie, Rennes est le troisième site le moins arrosé des 12 étudiés, derrière Toulouse (474 mm) et Versailles (511 mm).

Une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ET0*) à Rennes est mise en évidence, quelle que soit la méthode de régionalisation. Le cumul annuel (moyenne par période de 30 ans) passe ainsi :

- de 617 mm/an dans le PR à 674 mm/an dans le FP et à 734 mm/an dans le FL avec la méthode de régionalisation TT ;
- de 637 mm/an dans le PR à 696 mm/an dans le FP et à 790 mm/an dans le FL avec la méthode de régionalisation QQ.

Ceci représente (moyenne des méthodes TT et QQ) un accroissement moyen de 0,4 mm/jour entre le PR et le FL. Nous n'avons pas étudié la répartition entre saisons de cet accroissement, mais les périodes de forte demande évaporative (printemps et été) prendront largement leur part de ces augmentations.

La concomitance de la baisse des pluies et de la hausse de l'évapotranspiration conduira (fig. 2) à une dégradation du déficit hydrique climatique annuel.

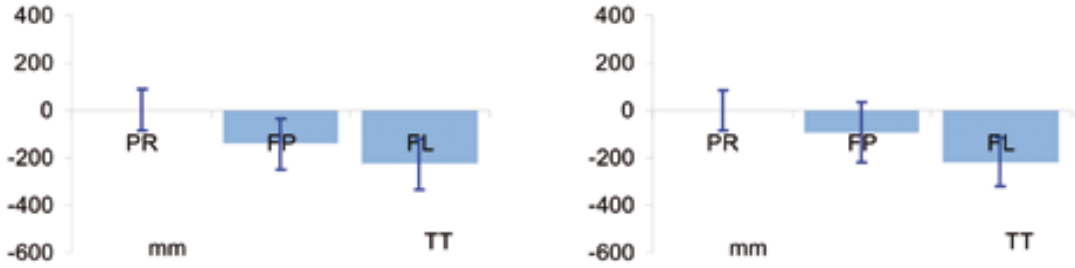


Figure 2 : *déficit hydrique climatique (pluies-ET0) annuel dans le PR, le FP et le FL, à Rennes. ARPÈGE A1B. Méthodes de régionalisation : TT (à gauche) et QQ (à droite). L'ET0 est calculé sans la correction liée au CO_2 (cf. fiche MODÈLES).*

Rayonnement global

À Rennes, on observe une augmentation continue du rayonnement global à partir du PR et jusqu'à la fin du XXIe siècle. Dans le PR, le rayonnement global moyen annuel est de 405 000 (méthode TT) à 408 000 (méthode QQ) J/cm²/an, ce qui représente en moyenne 1 110 J/cm²/jour. Dans le FL, le rayonnement global moyen annuel est de 450 000 (méthode QQ) à 459 000 (méthode TT) J/cm²/an, ce qui représente en moyenne 1 245 J/cm²/jour. Ce « supplément » radiatif de plus de 130 J/cm²/jour explique, ajouté à la hausse de température, l'augmentation attendue de l'évapotranspiration potentielle (ET0).

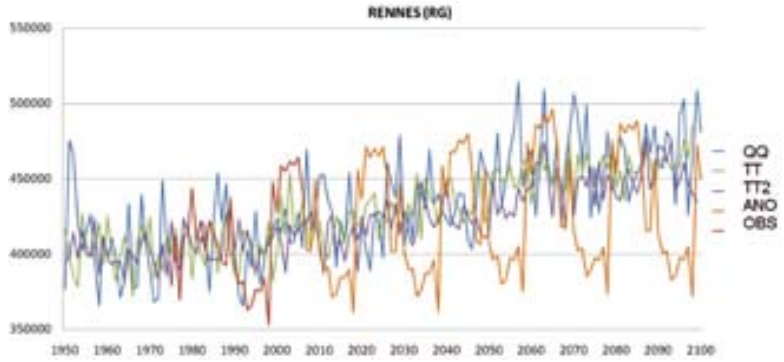


Figure 3 : *évolution du cumul annuel de rayonnement global (J/cm²/an) de 1950 à 2100, à Rennes. Scénario A1B. Méthodes de régionalisation standard : ANO, TT et QQ, auxquelles ont été ajoutées la méthode TT2 (cf. fiche CLIMAT) et les données observées sur le PR.*

Rappel sur la production agricole actuelle en zone Ouest
(Source Agreste)

Cultures	Surf (ha)	% SAU	Rdt
Prairies t & a	1 075 806	0,21	79
Blé tendre	820 094	0,16	68
Maïs fourr et ens	755 594	0,15	124
Maïs grain et sem	280 804	0,06	81
Colza	101 954	0,02	30
Tournesol	46 860	0,01	24
Vigne	38 932	0,01	74
Blé dur	22 003	0,00	61
Sorgho	1 831	0,00	54
…/…			
Total	3 143 876	0,62	

Les cultures étudiées dans le projet CLIMATOR couvrent 62 % de la SAU de la zone Ouest. Celle-ci compte 68 950 exploitations agricoles professionnelles, 99 060 exploitants et co-exploitants. L'ensemble des actifs agricoles représente 150 901 UTA. La valeur des produits agricoles végétaux bruts et transformés s'établit à 5,03 milliards d'euros en 2008.

B Principaux impacts du changement climatique sur la prairie en zone Ouest

Le climat de l'Ouest se réchauffe en hiver et le nombre de jours de gel diminue. Cela devrait presque certainement entraîner une hausse de la production hivernale et du début de printemps. Chez la fétuque élevée, cette tendance, systématique et bien marquée dans le cas des simulations réalisées avec le modèle de culture* STICS, est de plus faible ampleur dans les simulations réalisées avec PASIM.

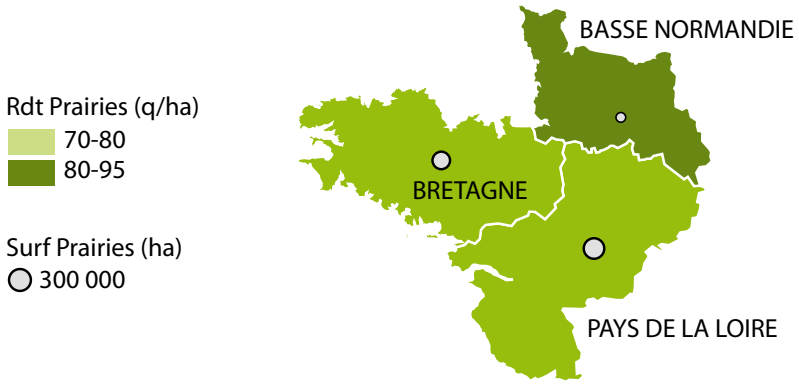


Figure 4 : *surfaces et rendements actuels de la prairie en zone Ouest (moyennes 2000-2007) Source Agreste.*

Bien que les simulations n'aient pas exploré une optimisation des dates de coupes, on peut aussi en déduire une possibilité d'avancer les mises à l'herbe, si les sols peuvent porter. La qualité de cette herbe se dégraderait plutôt en tendance pour le ray grass anglais, mais pas pour la fétuque qui présente des teneurs en azote stable.

Le déficit estival se creuserait nettement dans les deux méthodes de régionalisation étudiées sur le modèle ARPÈGE appliqué au scénario A1B (fig. 5). Le bilan annuel fait ressortir une constance de la production de fourrage pour le futur proche.

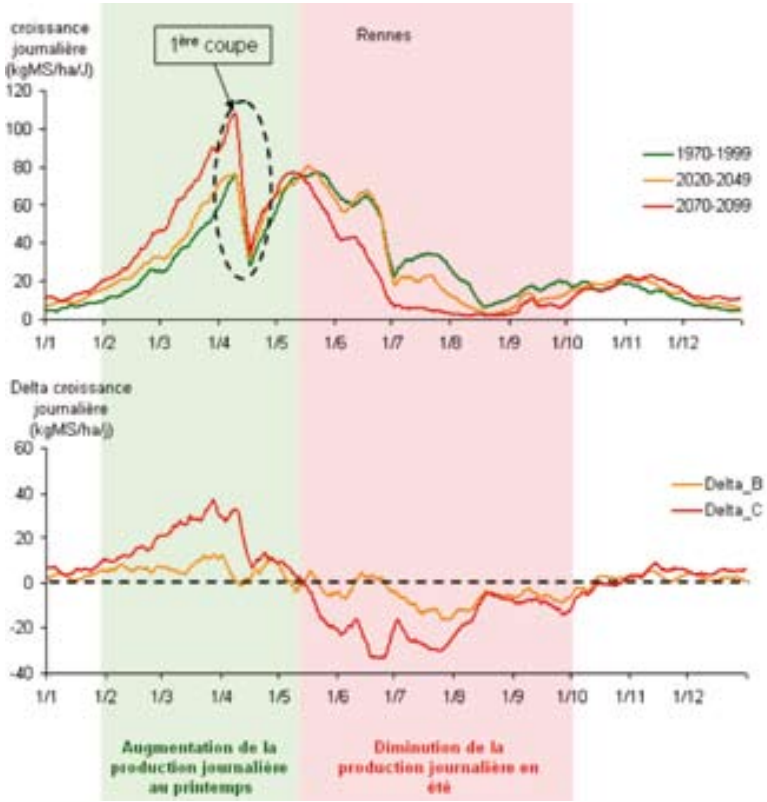


Figure 5 : *production journalière (moyenne sur 30 ans) de fourrage à Rennes pour la fétuque élevée, pour les trois périodes étudiées. Scénario A1B. Méthode de régionalisation QQ.*

Si le scénario A1B se confirmait, alors la fin du siècle verrait plutôt une amélioration du bilan de l'ordre de + 10 à + 20. Ces tendances seraient d'autant plus accentuées avec un sol profond. Là encore, à partir des mêmes données pédoclimatiques, PASIM simulerait des variations bien plus faibles.

Enfin, la variabilité* interannuelle du rendement* fourrager s'accroîtrait en tendance, du fait de la variabilité accrue des précipitations estivales.

C Principaux impacts du changement climatique sur le blé en zone Ouest

Occupant 17 % de la SAU avec des rendements moyens de 6,8 t ha^{-1}, le blé tendre est une culture importante de la zone Ouest.

Les rendements des variétés précoces et tardives ne sont pas affectés par le changement climatique, malgré une forte diminution du confort hydrique* (fig. 7) et une augmentation du nombre de jours échaudants (fig. 8). Ce résultat s'explique par l'effet compensateur de l'augmentation de l'efficience de l'eau avec la teneur en CO_2 atmosphérique.

Par contre, quand les blés ne sont pas traités, on identifie une nette augmentation des rendements dans le FP et le FL, les pertes de rendement diminuant considérablement, jusqu'à 25 % pour la rouille (fig 8) et pour la septoriose (cf. fiche SANTÉ).

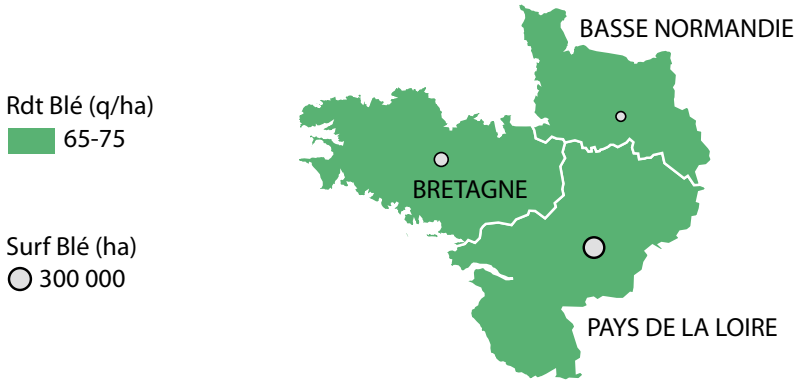


Figure 6 : *surfaces et rendements actuels du blé en zone Ouest (moyennes 2000–2007) Source Agreste.*

Enfin, la variation de la date de semis du 20 septembre au 1er décembre se traduit par des baisses de rendement qui s'expliquent par l'augmentation des stress thermiques et hydriques* de fin de cycle. Les pertes de rendement occasionnées par les maladies foliaires diminuent également quand on retarde la date de semis, au maximum de 15 % et de manière similaire dans le PR, le FP et le FL. Dans cette région, la date de semis semble être un levier peu efficace pour minimiser les effets du changement climatique (cf. fiche BLÉ).

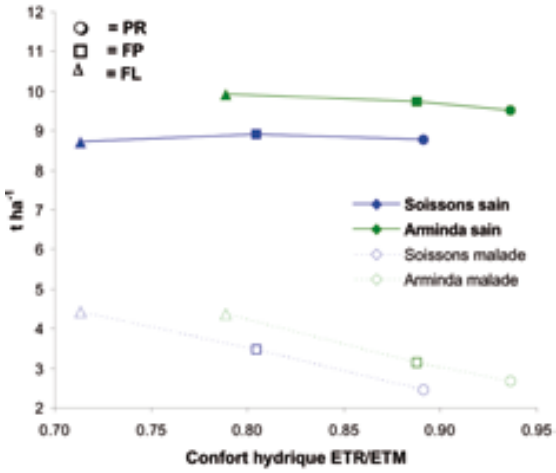


Figure 7 : *évolution du rendement de peuplements sains et malades (rouille brune) simulée par le modèle CERES (sol 1, méthode de régionalisation TT, semis le 10/10).*

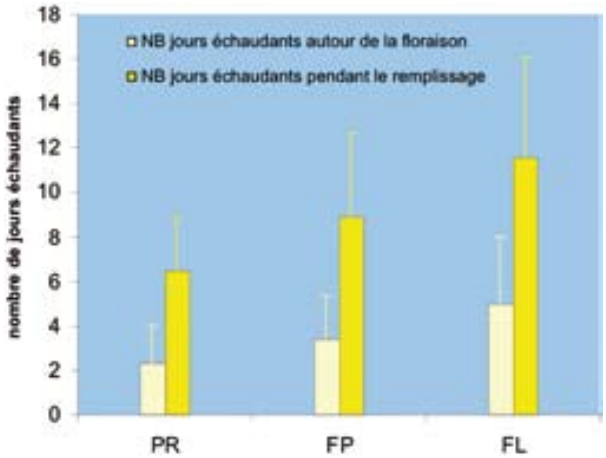


Figure 8 : *évolution des stress thermiques simulée par le modèle PANORAMIX (sol 1, méthode de régionalisation TT*, semis le 10/10).*

D Principaux impacts du changement climatique sur le colza en zone Ouest

Les sites de l'Ouest sont à priori favorables à la culture du colza, car moins soumis aux gels et disposant d'une pluviométrie de fin d'été propice à une bonne installation de la culture. Cependant, si nous constatons, à Rennes, une augmentation de la productivité, celle-ci n'est pas significative car exposée à une forte variabilité interannuelle.

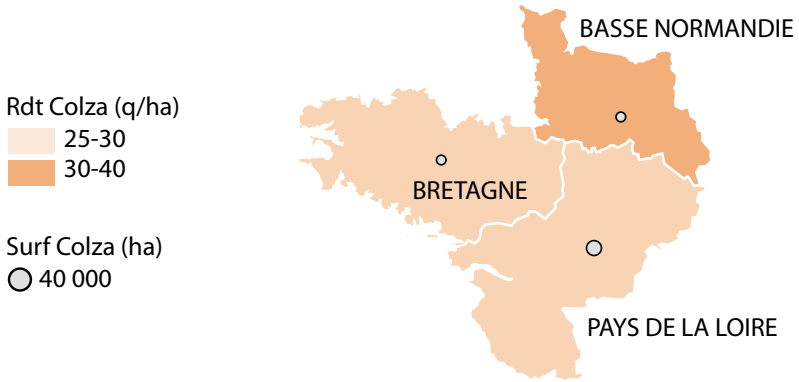


Figure 9 : *surfaces et rendements actuels du colza en zone Ouest (moyennes 2000–2007) Source Agreste.*

Curieusement, on constate que l'augmentation des rendements est plus importante dans le sol 2 à faible RU* (2,8 t ha^{-1} en PR, 3,2 t ha^{-1} en FP et 3,5 t ha^{-1} en FL) que dans le sol 3 à forte RU (5,2 t ha^{-1} en PR, 5,3 t ha^{-1} en FP et 5,4 t ha^{-1} en FL).

Ces résultats s'expliquent par une détérioration de l'alimentation azotée liée à la sécheresse édaphique pendant les premières phases du cycle, problème auquel étaient déjà confrontés les sols à faible RU*, mais qui vont devenir prégnants aussi pour les autres sols (fig. 10). En effet, malgré une disponibilité accrue de l'azote minéral du sol dans le futur, provenant de la stimulation de la minéralisation* de la matière organique* par le réchauffement, la plante se trouve en déficit azoté, car la diminution du flux transpiratoire pendant les automnes secs, qui sont prévus, ne lui permet pas de l'absorber.

Sans changement de pratiques durant ces années sèches, la culture sera confrontée à une diminution importante de son indice de nutrition azotée (fig. 10) qui l'empêche de profiter de l'augmentation en CO_2 de l'atmosphère. En revanche, les années plus humides (fin du siècle), l'absorption azotée, moins limitante, assurera des rendements plus élevés que dans le PR.

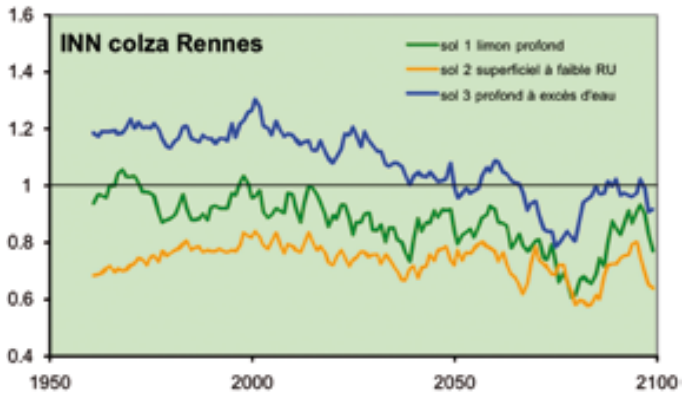


Figure 10 : *évolution de l'indice de nutrition azotée pendant la floraison du colza à Rennes, pour les 3 types de sol et la méthode de régionalisation climatique TT. Les courbes représentent des moyennes glissantes sur 10 ans.*

Afin de régulariser la productivité du colza et d'en augmenter la moyenne, une irrigation « starter » les années sèches devra être envisagée.

E Principaux impacts du changement climatique sur le sorgho en zone Ouest

Malgré une détérioration de son confort hydrique (ETR/ETM moyens de 0,84, 0,78 et 0,76 pour respectivement le PR, le FP et le FL avec le sol 1 de limon profond), la productivité du sorgho à Rennes augmente dès le FP pour la méthode TT et de façon significative pour l'ensemble des méthodes de régionalisation dans le FL (fig. 12).

Si la productivité est évidemment réduite en sol superficiel à faible RU (3 t ha^{-1} en moyenne pour la rendzine contre 4,7 t ha^{-1} pour le sol 1 de limon profond), le sorgho peut valoriser des sols à excès d'eau qui, sans problèmes d'implantation ou phytosanitaires, permettront d'atteindre des rendements moyens de l'ordre de 6 t ha^{-1} en culture pluviale.

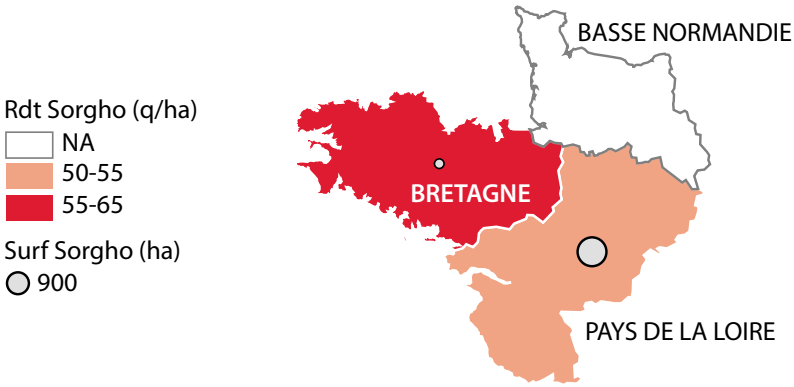


Figure 11 : *surfaces et rendements actuels du sorgho en zone Ouest (moyennes 2000-2007) Source Agreste.*

Dans le FL, il sera possible d'implanter des variétés à cycle long qui permettront un gain substantiel de rendement (fig. 12). Ce comportement rustique du sorgho est un élément très intéressant pour affronter le changement climatique, élément qui l'avantage par rapport à la culture du maïs, plus fragile.

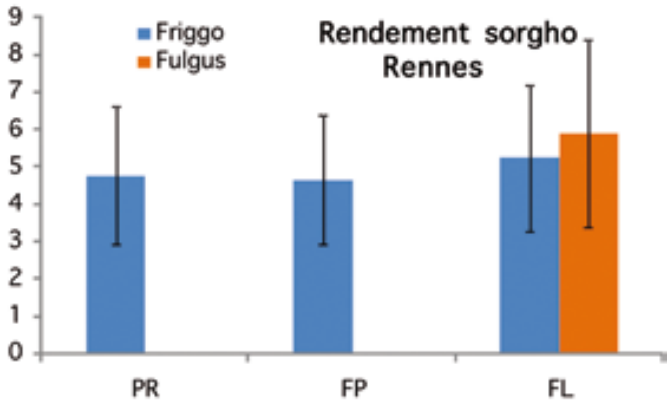


Figure 12 : *évolution du rendement du sorgho grain à Rennes, pour le sol 1 de limon profond avec les variétés Friggo et Fulgus (quand elle est réalisable). La variabilité indiquée intègre l'interannuelle et la variabilité entre méthodes de régionalisation du climat.*

Changement climatique en zone Nord-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers

D4
Nord-Est

Frédéric Levrault, Nadine Brisson, Alexandre Bosc

Régions concernées :

- ***Alsace***
- ***Bourgogne***
- ***Franche-Comté***
- ***Lorraine***

Sites d'étude : Colmar, Dijon, Mirecourt.

Territoire	Surf (ha)	% ST	Surf. Agricole Utile	Surf (ha)	% ST
Surface totale	8 006 131		SAU des E.A.	3 903 936	
Bois et forêts	2 873 912	0,36	Terres arables	2 229 635	0,57
SAU totale	2 236 699	0,28	STH	1 618 557	0,41
Autres	1 032 278	0,13	Cult permanentes	56 282	0,01

Raréfaction des gelées automnales et hivernales, dégradation du déficit hydrique climatique annuel, régularisation interannuelle de la production du maïs dans certains sites, opportunités accrues pour le colza liées à la diminution du risque de gel en automne et en hiver, culture du tournesol devenant possible dans le nord de la zone, légère diminution du confort hydrique des arbres, telles sont les principales tendances mises à jour pour la zone Nord-Est.

A Quelques faits marquants du changement climatique* dans la zone* Nord-Est

Températures

Actuellement la plus fraîche des six zones étudiées, la zone Nord-Est se caractérise par un réchauffement légèrement supérieur à la moyenne des 12 sites* : de + 1,4 à + 1,6 °C entre le PR* et le FP* ; de + 2,8 à + 3,0 °C entre le PR et le FL*. Dans le FL, la température moyenne annuelle à Dijon (13,7 °C) et à Colmar (14,0 °C) devient supérieure à celle d'Avignon (13,1 °C) ou de Toulouse (13,3 °C) dans le PR, les deux plus chauds des 12 sites étudiés. Pour autant, dans le FP comme dans le FL, la zone Nord-Est demeure la plus fraîche de l'Hexagone. Dans cette zone, deux enjeux thermiques se dégagent pour les espèces cultivées. D'une part, l'accroissement de la disponibilité thermique* autorisera progressivement la culture d'espèces à besoins thermiques élevés (tournesol, maïs…). D'autre part, la diminution du nombre de jours de gel, à l'automne en particulier, diminuera les accidents physiologiques sur les cultures d'hiver (colza en particulier).

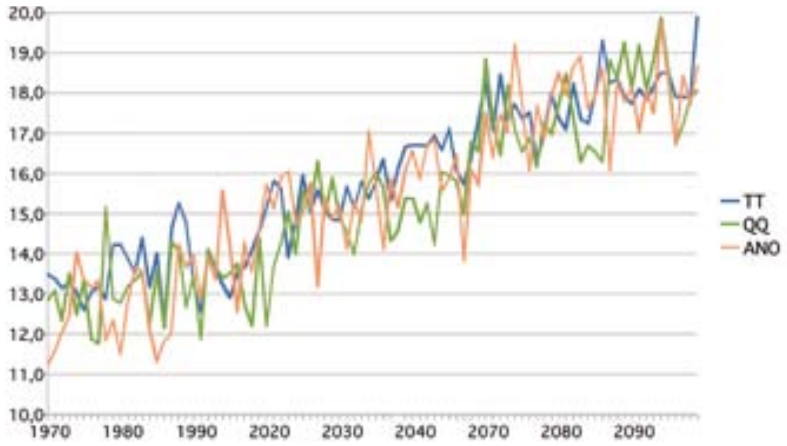


Figure 1 : *évolution de la température moyenne annuelle (°C) de 1970 à 2100, à Dijon. Scénario A1B*. Méthodes de régionalisation* : ANO*, TT* et QQ*.*

Précipitations et évapotranspiration

Dans le PR, on observe un fort contraste entre, d'une part, Colmar (730 mm de cumul annuel) et, d'autre part, Dijon (912 mm) ou Mirecourt (985 mm), qui figurent parmi les sites les plus arrosés de notre étude. Dans le FP, ce minimum relatif de Colmar dû à la dépression de la plaine d'Alsace semble s'estomper quelque peu, les baisses de précipitations étant très différentes à Colmar (–37 mm), à Dijon (–73 mm) et à Mirecourt (–109 mm). Dans le FL, la diminution des précipitations par rapport au PR est plus marquée à Mirecourt (–182 mm) qu'à Colmar et Dijon (–109 mm). À cette échéance, le minimum relatif de Colmar se rétablit (620 mm), tandis que Dijon et Mirecourt figurent toujours parmi les sites les plus arrosés de notre étude, avec 803 mm de cumul annuel. Dans cette zone, on attend de la moindre pluviométrie automnale un effet sensible sur les jours disponibles* pour les chantiers d'automne.

Une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ET0*) est mise en évidence à Colmar, Dijon et Mirecourt, quelle que soit la méthode de régionalisation. Les augmentations du cumul annuel (moyenne par période de 30 ans) sont ainsi :

- de 75 à 80 mm entre le PR et le FP et de 150 à 160 mm entre le PR et le FL, avec la méthode de régionalisation TT ;
- de 55 à 70 mm entre le PR et le FP et de 170 à 200 mm entre le PR et le FL, avec la méthode de régionalisation QQ.

Ceci représente (moyenne des méthodes TT et QQ) un accroissement moyen de 0,5 mm/jour entre le PR et le FL. Nous n'avons pas étudié la répartition entre saisons de cet accroissement, mais les périodes de forte demande évaporative (printemps et été) prendront largement leur part de ces augmentations.

La concomitance de la baisse des pluies et de la hausse de l'évapotranspiration conduira (fig. 2) à une dégradation marquée du déficit hydrique climatique annuel dans chacun de ces trois sites. Seul le site de Mirecourt restera sur un bilan quasi nul à échéance du FL.

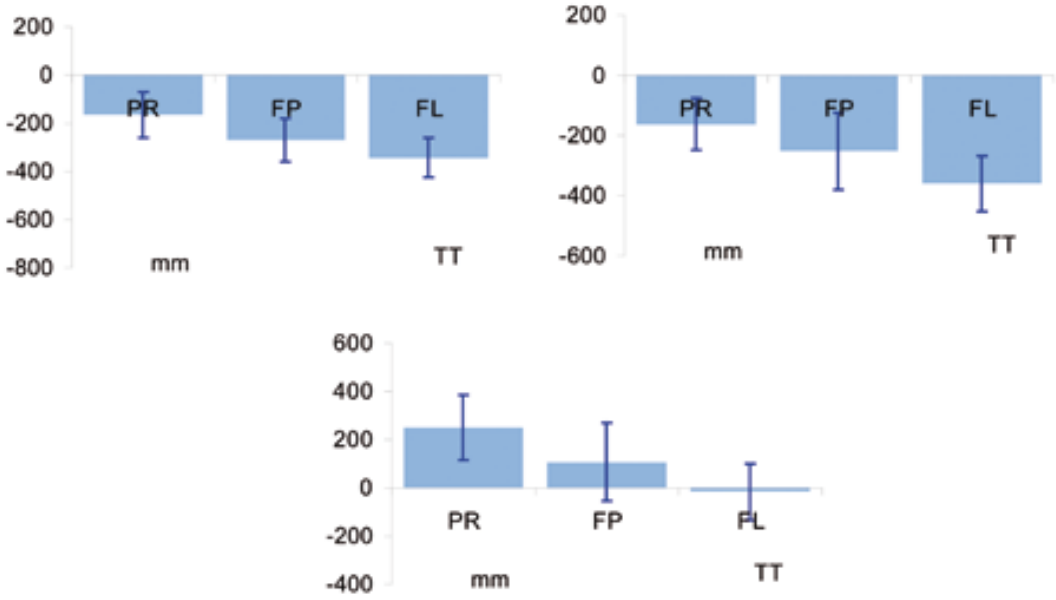


Figure 2 : *déficit hydrique climatique (pluies-ET0) annuel dans le PR, le FP et le FL, à Colmar (haut gauche), Dijon (haut droite) et Mirecourt (bas). ARPÈGE A1B. Méthode de régionalisation TT. L'ET0 est calculé sans la correction liée au CO_2 (cf. fiche MODÈLES)*

Rayonnement global

À Colmar, on observe une augmentation continue du rayonnement global au cours du XXIe siècle. Dans le PR, le rayonnement global moyen annuel est de 408 000 (méthode TT) à 411 000 (méthode QQ) J/cm²/an, ce qui représente en moyenne 1 120 J/cm²/jour. Dans le FL, le rayonnement global moyen annuel est de 447 000 (méthode QQ) à 466 000 J/cm²/an, ce qui représente en moyenne 1 250 J/cm²/jour. Ce « supplément » radiatif de 130 J/cm²/jour explique, ajouté à la hausse des températures, l'augmentation significative de l'évapotranspiration potentielle (ET0). À Dijon, les niveaux de rayonnement sont légèrement inférieurs (1 100 J/cm²/jour dans le PR et 1 260 J/cm²/jour dans le FL), mais la tendance est identique.

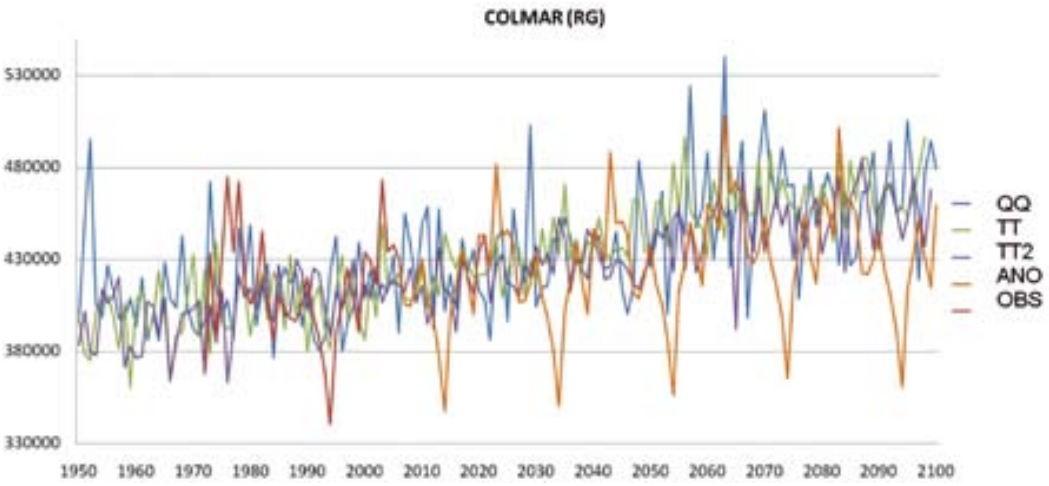


Figure 3 : *évolution du cumul annuel de rayonnement global (J/cm²/an) de 1950 à 2100, à Colmar. Scénario A1B. Méthodes de régionalisation standard : ANO, TT et QQ auxquelles ont été ajoutées la méthode TT2 (cf. fiche CLIMAT) et les données observées sur le PR.*

Rappel sur la production agricole actuelle en zone Nord-Est
(Source Agreste)

Cultures	Surf (ha)	% SAU	Rdt
Blé tendre	644 716	0,17	66
Colza	307 214	0,08	30
Prairies t & a	227 879	0,06	71
Maïs grain et sem	224 618	0,06	93
Maïs fourr et ens	137 060	0,04	116
Vigne	47 989	0,01	85
Tournesol	42 698	0,01	27
Sorgho	284	0,00	49
Blé dur	215	0,00	54
…/…			
Total	1 632 457	0,42	

Les cultures étudiées dans le projet CLIMATOR couvrent 42 % de la SAU de la zone Nord-Est. Celle-ci compte 35 488 exploitations agricoles professionnelles, 48 517 exploitants et co-exploitants. L'ensemble des actifs agricoles représente 77 141 UTA. La valeur des produits agricoles végétaux bruts et transformés s'établit à 4,55 milliards d'euros en 2008.

B Principaux impacts du changement climatique sur le maïs en zone Nord-Est

Nous distinguerons les sites de Colmar et Dijon, où la production de maïs a tendance à diminuer (dès le FP avec la méthode de régionalisation TT et dans le FL pour les méthodes ANO et QQ), du site de Mirecourt où la production de maïs grain, qui était aléatoire dans le PR, devient une culture d'intérêt dans le futur (fig. 5). La régularisation de la production concerne également le site de Dijon.

Ces résultats sont cependant accompagnés d'une augmentation des apports d'eau d'irrigation de l'ordre de 50 mm entre le PR et le FP, cette quantité n'évoluant pas entre le FP et le FL. On atteint ainsi des niveaux moyens de l'ordre de 200 mm à Colmar et Dijon et 100 mm à Mirecourt.

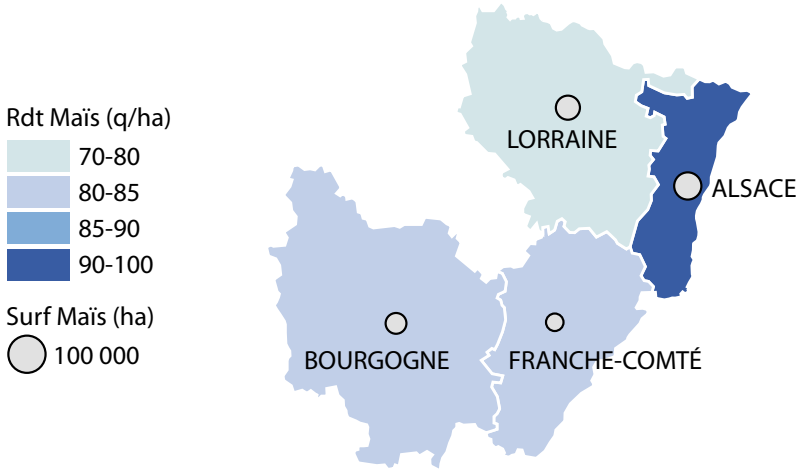


Figure 4 : *surfaces et rendements actuels du maïs en zone Nord-Est (moyennes 2000-2007) Source Agreste.*

Le maïs pourra être plus facilement cultivé en rotation*, qui nécessite des récoltes plus précoces qu'en monoculture. En effet, le séchage des grains, qui était nécessaire 8 années sur 10 à Colmar et 9 années sur 10 à Dijon dans le PR, ne sera plus nécessaire dans le futur. Ces rotations seront également possibles dans le FL, à Mirecourt.

Afin de maintenir, voire d'augmenter, la production à Colmar et Dijon, l'utilisation de variétés à cycle plus long et l'anticipation des semis (à raison d'un jour tous les 4 ans en moyenne) sont recommandées. L'augmentation estimée des apports d'eau consécutifs à ce changement variétal est faible, de l'ordre de 10 à 20 mm.

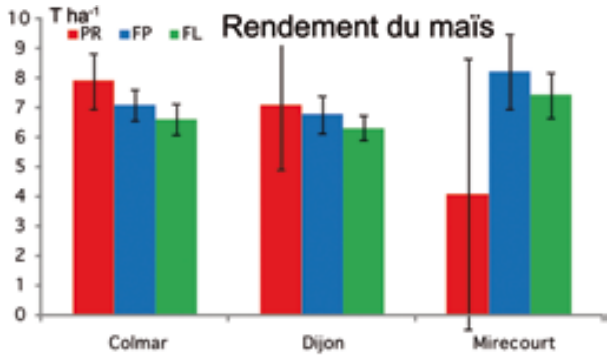


Figure 5 : *évolution des rendements de maïs grain (variété Méribel, sol 1, méthode de régionalisation TT) entre les 3 périodes avec la variabilité* interannuelle.*

C Principaux impacts du changement climatique sur le colza en zone Nord-Est

La diminution des risques de gel, dans le futur, pendant l'automne et l'hiver (fig. 5) est une aubaine pour la culture de colza dans la zone Nord-Est, où partout les rendements augmentent de façon très significative : de l'ordre de +0,7 et +0,9 t.ha^{-1} pour respectivement le FP et le FL à Colmar et Dijon, et plus du double à Mirecourt (+1,4 et +2,5 t.ha^{-1} pour les mêmes périodes) pour la méthode de régionalisation TT.

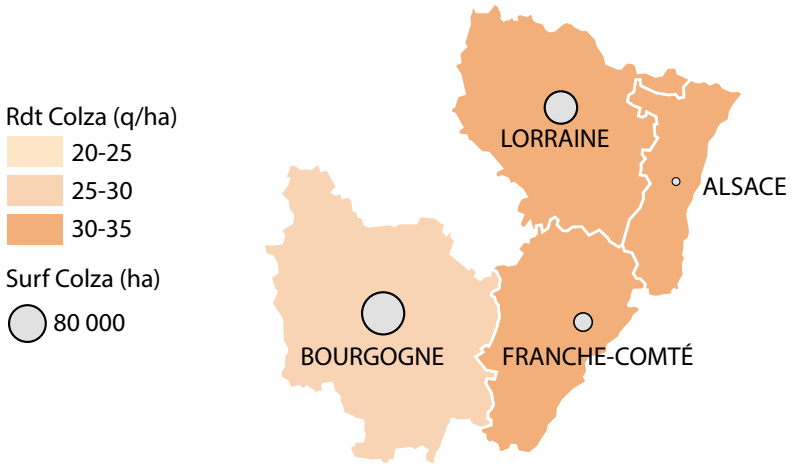


Figure 6 : *surfaces et rendements actuels du colza en zone Nord-Est (moyennes 2000–2007) Source Agreste*

Cependant, les méthodes de régionalisation peuvent donner des résultats d'ampleur différente (fig. 7), car elles diffèrent essentiellement par le traitement de la variabilité (cf. fiche CLIMAT) qui détermine, en particulier, l'occurrence des températures minimales. Dans ce cas, il est sans doute prudent de se fier à la méthode la plus pessimiste.

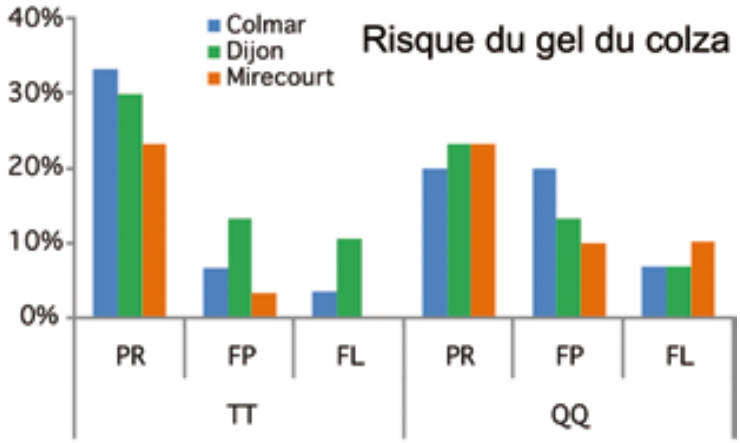


Figure 7 : *évolution des risques de gel létal du colza pour deux méthodes de régionalisation du climat.*

Afin de limiter les effets néfastes de la sécheresse édaphique qui pourra devenir prégnante pendant la phase végétative, il pourra être nécessaire de retarder les semis, voire d'utiliser des irrigations « starter », en particulier à Colmar. Pour les mêmes raisons, il sera également préférable, à l'avenir, d'utiliser des variétés à montaison rapide comme Olphi.

D Principaux impacts du changement climatique sur le tournesol en zone Nord-Est

La région Nord-Est semble favorable à la culture du tournesol à deux titres. Tout d'abord, au niveau de sa marge Nord (Mirecourt), la culture devient possible, dans le cadre de rotations céréalières, grâce à l'augmentation de la disponibilité thermique.

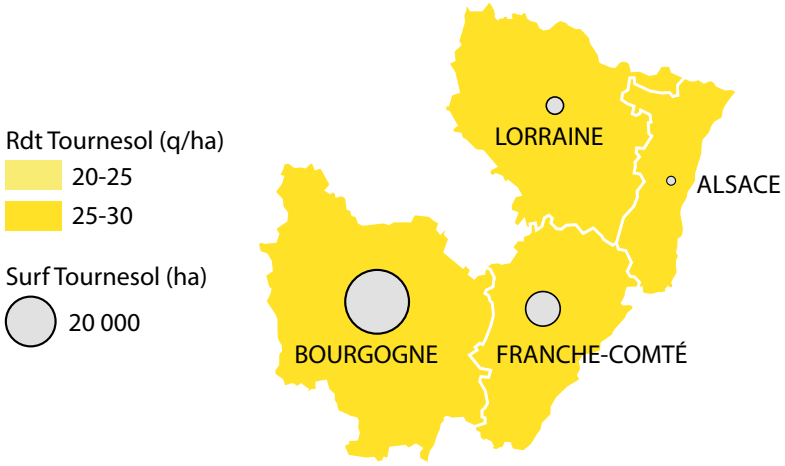


Figure 8 : *surfaces et rendements actuels du tournesol en zone Nord-Est (moyennes 2000–2007) Source Agreste.*

De plus, dans les zones où la culture est actuellement possible (Dijon, Colmar), on peut espérer des gains de rendements les années favorables (fig. 9).

Toutefois, en conditions pluviales et sur sol à faible RU*, ces gains resteront limités. Dans le FL, il sera possible d'utiliser des variétés à cycle plus long qui permettront une augmentation des rendements.

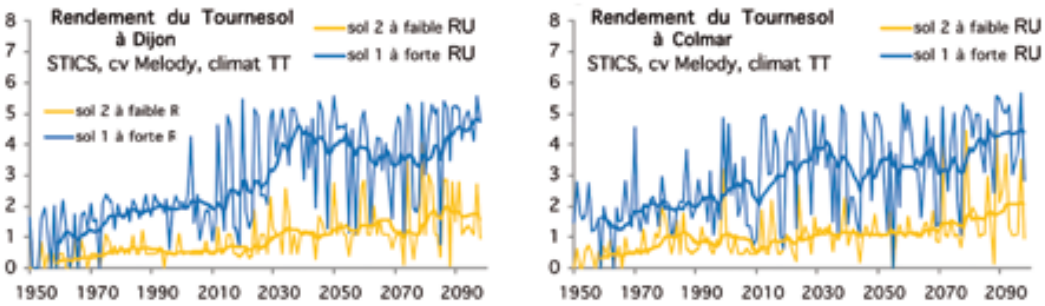


Figure 9 : *évolution de la productivité du tournesol à Dijon et Colmar, pour un sol à forte RU (226 mm) et un sol à faible RU (104 mm). Simulations dans le cadre d'une rotation céréalière en pluvial (TBSB) avec la méthode de régionalisation climatique TT. Pour chaque série sont figurés les données annuelles et un lissage par moyenne glissante sur 10 ans.*

E Principaux impacts du changement climatique sur la forêt en zone Nord-Est

Le fonctionnement des couverts forestiers est fortement contrôlé par le stress hydrique, en particulier pendant la saison de croissance (printemps, été).

Les changements climatiques modélisés dans le cas du scénario climatique A1B génèrent (modèles de culture* BILJOU et GRAECO) une diminution du confort hydrique des arbres (fig. 11a) sur le siècle à venir.

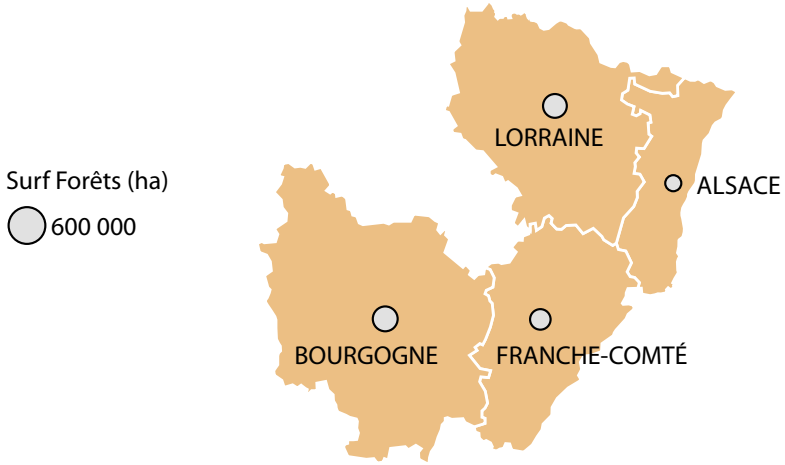


Figure 10 : *surfaces et rendements actuels de la forêt en zone Nord-Est (moyennes 2000–2007) Source Agreste.*

La restitution d'eau au milieu est affectée avec une perte tendancielle de 50 mm en 2100 (fig. 11b).

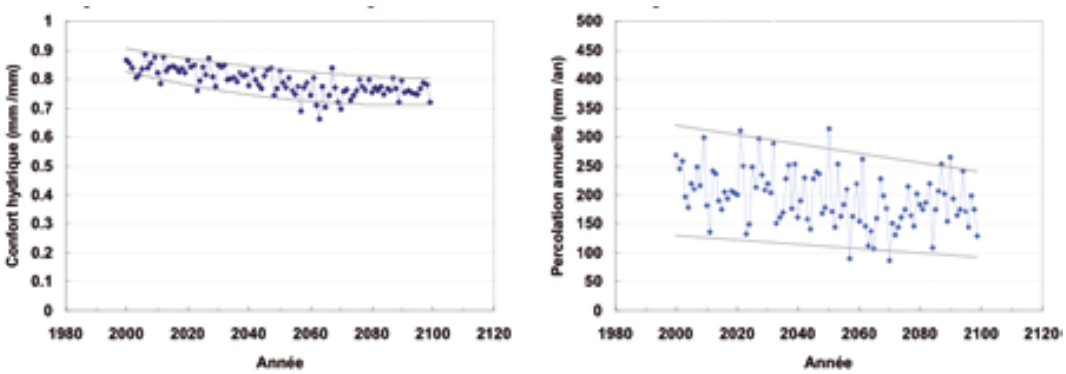


Figure 11 : *moyenne régionale (Colmar, Dijon, Mirecourt) de l'évolution du confort hydrique ETR/ET0 (a : gauche) et de la restitution d'eau au milieu des pins (b : droite) (Rotation 45 ans, sol 3) avec l'intervalle de confiance (95 %) lié à la méthode de régionalisation.*

Changement climatique en zone Centre-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers

D 5
Centre-Est

Frédéric Levrault, Jean-Louis Durand,
Nadine Brisson, Alexandre Bosc

Régions concernées :

- ***Auvergne***
- ***Limousin***
- ***Rhône-Alpes***

Sites d'étude : Clermont-Theix, Saint-Étienne.

Territoire	Surf (ha)	% ST	Surf. Agricole Utile	Surf (ha)	% ST
Surface totale	8 819 404		SAU des E.A.	3 860 550	
Bois et forêts	2 953 648	0,33	Terres arables	1 457 922	0,38
SAU totale	4 124 512	0,47	STH	2 287 244	0,59
Autres	1 741 245	0,20	Cult permanentes	115 398	0,03

Accroissement des températures et dégradation du déficit hydrique climatique annuel, forte hausse de production de la prairie dans le FL, opportunités accrues pour les cultures de sorgho et de tournesol, diminution modérée du confort hydrique de la forêt qui permet dans le FP le maintien de sa productivité, telles sont les principales tendances mises à jour pour la zone Centre-Est.

A Quelques faits marquants du changement climatique* dans la zone* Centre-Est

Températures

Dans les deux sites* concernés (Clermont-Theix et Saint-Étienne), la température moyenne annuelle devrait augmenter de façon légèrement plus marquée que la tendance moyenne des 12 sites étudiés : + 1,5 °C entre le PR* et le FP* ; + 3,0 °C entre le PR et le FL*. Dans le FL, la température moyenne annuelle de ces deux sites (14,0 °C) sera supérieure à celle observée dans le PR à Toulouse (13,3 °C) ou à Avignon (13,1 °C), les deux plus chauds des 12 sites étudiés. Dans cette zone, un enjeu thermique important pour les espèces cultivées est celui de l'accroissement de la disponibilité thermique*, notamment en zone de moyenne montagne.

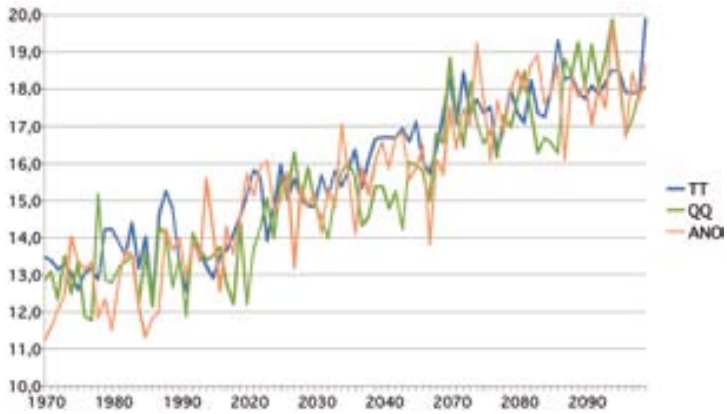


Figure 1 : *évolution de la température moyenne annuelle (°C) de 1970 à 2100, à Clermont-Theix. Scénario A1B*. Méthodes de régionalisation : ANO, TT et QQ*.*

Précipitations et évapotranspiration

Clermont-Theix et Saint-Étienne sont, dans le PR, les deux sites les plus arrosés de notre étude, avec 1022 mm de cumul annuel. À l'avenir, ces deux sites enregistrent une des plus fortes baisses de précipitations : –110 mm entre le PR et le FP ; –183 mm entre le PR et le FL. Malgré cette forte baisse, Clermont-Theix et Saint-Étienne demeurent les deux sites les plus arrosés de notre étude, avec 912 mm de cumul annuel dans le FP et 839 mm dans le FL.

Une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ET0*) est mise en évidence à Clermont-Theix et Saint-Étienne, quelle que soit la méthode de régionalisation*. Les augmentations du cumul annuel (moyenne par période de 30 ans) sont ainsi :

- à Saint-Étienne de 70 à 95 mm entre le PR et le FP et de 180 à 240 mm entre le PR et le FL ;
- à Clermont-Theix de 50 à 70 mm entre le PR et le FP et de 140 à 175 mm entre le PR et le FL.

Ceci représente (moyenne des méthodes TT et QQ) un accroissement moyen de 0,5 à 0,6 mm par jour entre le PR et le FL. Nous n'avons pas étudié la répartition entre saisons de cet accroissement, mais les périodes de forte demande évaporative (printemps et été) prendront largement leur part de ces augmentations.

La concomitance de la baisse des pluies et de la hausse de l'évapotranspiration conduira (fig. 2) à une dégradation du déficit hydrique climatique annuel.

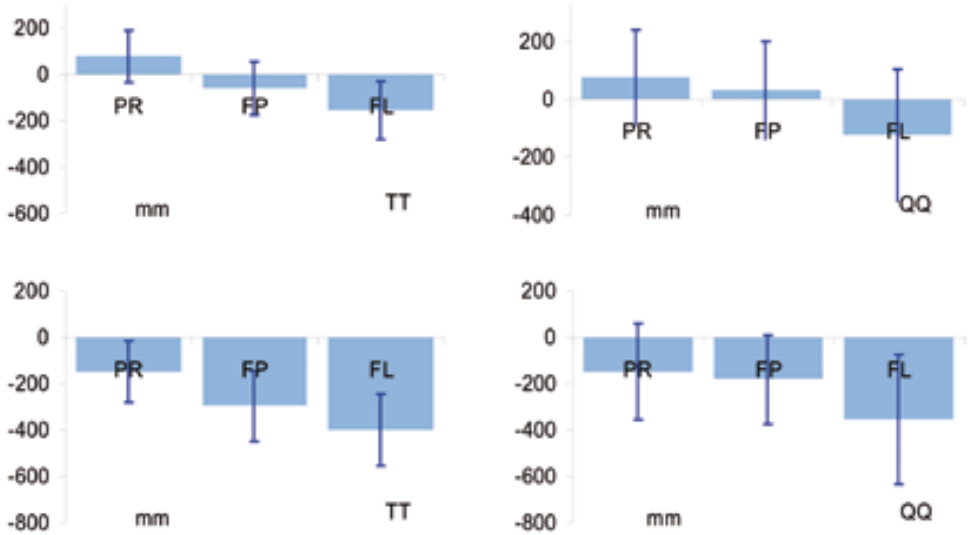


Figure 2 : *déficit hydrique climatique (pluies-ET0) annuel dans le PR, le FP et le FL à Clermont-Theix (en haut) et à Saint-Étienne (en bas). ARPÈGE A1B. Méthodes de régionalisation : TT et QQ.*

Rayonnement global

À Clermont-Theix, on observe une augmentation continue du rayonnement global sur l'ensemble de la période d'étude (1970-2100). Dans le PR, le rayonnement global moyen annuel est de 451 000 (méthode TT) à 455 000 (méthode QQ) J/cm²/an ce qui représente en moyenne 1 240 J /cm²/jour. Dans le FL, le rayonnement global moyen annuel est de 490 000 (méthode QQ) à 506 000 (méthode TT) J/cm²/an, ce qui représente en moyenne 1 365 J/cm²/jour. Ce « supplément » radiatif de plus de 100 J/cm²/jour, explique l'augmentation significative de l'évapotranspiration potentielle (ET0). À Saint-Étienne, les niveaux de rayonnement global sont de 466 000 (méthode QQ) et 467 000 (méthode TT) J/cm²/an dans le PR et de 514 000 (méthode QQ) à 545 000 (méthode TT) J/cm²/an. Le supplément radiatif journalier moyen est de 100 J/cm²/jour.

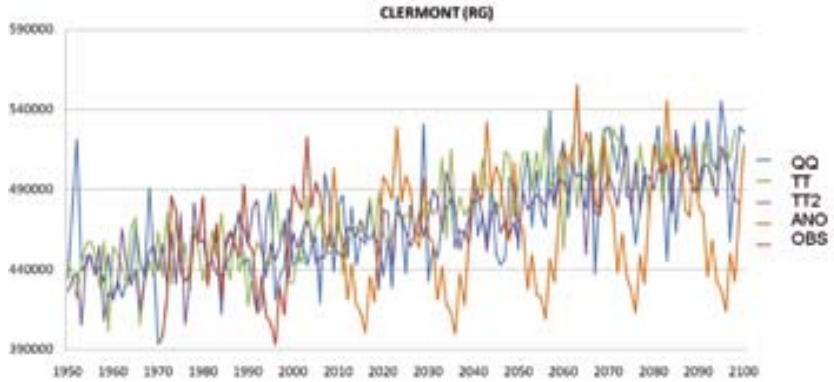


Figure 3 : *évolution du cumul annuel de rayonnement global (J/cm²/an) de 1950 à 2100, à Avignon. Scénario A1B. Méthodes de régionalisation standard : ANO, TT et QQ, auxquelles ont été ajoutées la méthode TT2 (cf. fiche CLIMAT) et les données observées sur le PR.*

Rappel sur la production agricole actuelle en zone Centre-Est
(Source Agreste)

Cultures	Surf (ha)	% SAU	Rdt
Prairies t & a	529 550	0,14	67
Blé tendre	258 619	0,07	57
Maïs grain et sem	168 912	0,04	88
Maïs fourr et ens	110 483	0,03	107
Vigne	59 497	0,02	66
Tournesol	51 991	0,01	25
Colza	36 889	0,01	28
Sorgho	10 733	0,00	60
Blé dur	8 083	0,00	42
…/…			
Total	1 234 755	0,32	

Les cultures étudiées dans le projet CLIMATOR couvrent 32 % de la SAU de la zone Centre-Est. Celle-ci compte 50 901 exploitations agricoles professionnelles, 67 440 exploitants et co-exploitants. L'ensemble des actifs agricoles représente 99 304 UTA. La valeur des produits agricoles végétaux bruts et transformés s'établit à 2,87 milliards d'euros en 2008.

B Principaux impacts du changement climatique sur la prairie en zone Centre-Est

La région est contrastée en termes climatiques, notamment du fait de reliefs marqués. Pour les zones froides de moyenne montagne, c'est la hausse des températures au cours du changement climatique qui modifie profondément les conditions de production et rend possible des récoltes parfois irréalisables de nos jours.

Figure 4 : *surfaces et rendements actuels de la prairie en zone Centre-Est (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

Les deux modèles de culture* PASIM et STICS utilisés ici s'accordent à prévoir ces évolutions, quoique avec une ampleur toujours plus faible pour PASIM. La récolte d'une coupe supplémentaire et l'augmentation des productions de fin d'hiver et de début de printemps permettent de s'attendre à de fortes hausses de production vers la fin du siècle.

Cette hausse, déjà forte dans le futur proche, serait de l'ordre de 100 % ou presque vers la fin du XXIe siècle avec la méthode de régionalisation QQ et un peu plus faible avec les simulations de données climatiques selon la méthode TT.

Une des conséquences de ces forts accroissements de productivité, alors que les précipitations diminuent (fig. 5), serait une tendance à la limitation par la disponibilité en azote par approfondissement différentiel du prélèvement de l'eau et de l'azote, qu'il pourrait être facile de corriger en augmentant les apports d'engrais si besoin était.

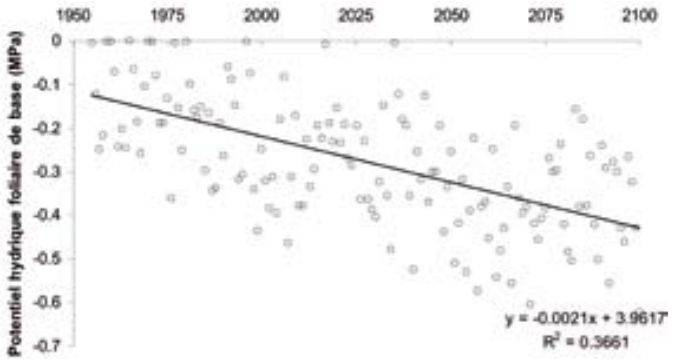


Figure 5 : *aggravation tendancielle du déficit hydrique annuel sur Clermont-Theix, chez la fétuque élevée dans le scénario A1B avec la méthode de régionalisation TT. Le potentiel hydrique de base des feuilles mesure la contrainte hydrique* « ressentie » par la végétation.*

Les données obtenues pour la station de Saint-Étienne contrastent fortement avec les précédentes. Sur cette station, les déficits hydriques estivaux sévères prévus par la méthode de régionalisation TT réduiraient la productivité annuelle de l'espèce la plus sensible à la sécheresse : le ray grass anglais.

C Principaux impacts du changement climatique sur le sorgho en zone Centre-Est

Même si nos résultats montrent que, dans le FL, les hauteurs de Clermont-Theix pourront accueillir la culture du sorgho avec des rendements moyens tout à fait honorables, de 4,5 à 6 t ha^{-1} selon le type de sol, intéressons-nous plutôt à la Limagne représentée sur le plan de l'altitude par le site de Saint-Étienne.

Figure 6 : *surfaces et rendements actuels du sorgho en zone Centre-Est (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

Malgré une détérioration du confort hydrique* de la culture avec des ETR/ETM* moyens de 0,89, 0,85 et 0,83 pour respectivement le PR, le FP et le FL (avec le sol 1 de limon profond), il n'y a pas d'évolution significative des rendements de sorgho (variété à cycle court Friggo), comme le montre la figure 7.

À partir du FP, il devrait être rentable de passer à des variétés à cycle plus long, comme Fulgus, qui permettront un gain substantiel de rendement (fig. 7).

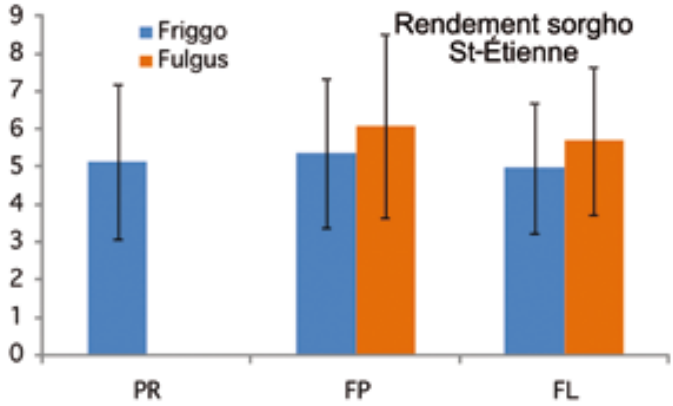


Figure 7 : *évolution du rendement du sorgho grain à Saint-Étienne pour le sol 1 de limon profond avec les variétés Friggo et Fulgus (quand elle est réalisable). La variabilité* indiquée intègre l'interannuelle et la variabilité entre méthodes de régionalisation du climat.*

D Principaux impacts du changement climatique sur le tournesol en zone Centre-Est

La Limagne apparaît comme une terre d'accueil pour la culture du tournesol, où des sols profonds (exemple du sol 1 sur la figure 8) peuvent compenser la sécheresse climatique printanière et estivale qui pénalise les rendements dans les sols superficiels.

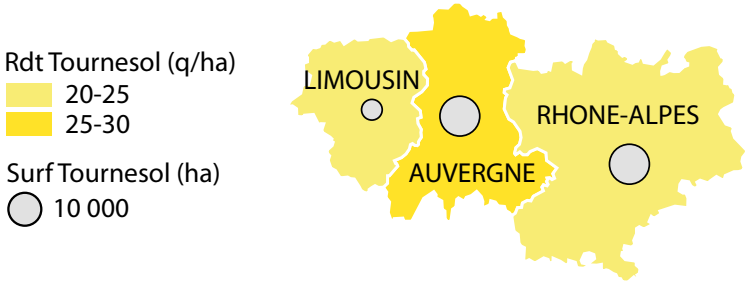


Figure 8 : *surfaces et rendements actuels du tournesol en zone Centre-Est (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

De plus, l'avancée des semis et le recours à des variétés à cycle long dès le FP permettront des augmentations de rendement de l'ordre de 0,5 t ha^{-1} en moyenne.

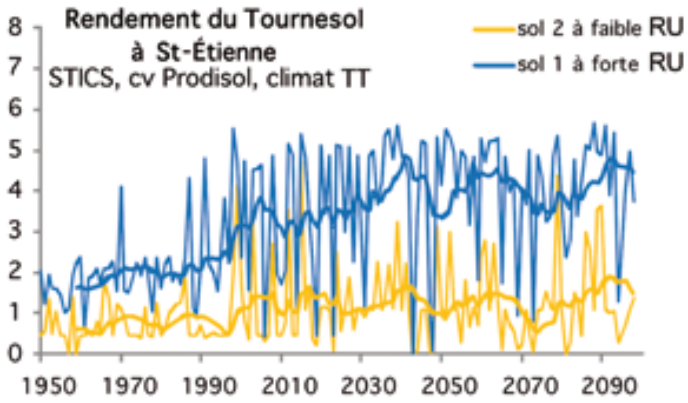


Figure 9 : *évolution de la productivité du tournesol à St-Étienne pour un sol à forte RU (226 mm) et un sol à faible RU (104 mm). Simulations dans le cadre d'une rotation* céréalière en pluvial (TBSB) avec la méthode de régionalisation climatique TT. Pour chaque série sont figurés les données annuelles et un lissage par moyenne glissante sur 10 ans.*

E Principaux impacts du changement climatique sur la forêt en zone Centre-Est

Le fonctionnement des couverts forestiers est fortement contrôlé par le statut hydrique, en particulier pendant la saison de croissance (printemps, été).

Figure 10 : *surfaces actuelles de la forêt en zone Centre-Est (moyennes 2000-2007) Source Agreste.*

Les changements climatiques modélisés dans le cas du scénario climatique A1B génèrent (modèles de culture* BILJOU et GRAECO) une légère diminution du confort hydrique des arbres (fig. 11 gauche). La restitution d'eau au milieu est globalement maintenue sur la période 2000-2100 (fig. 11 droite).

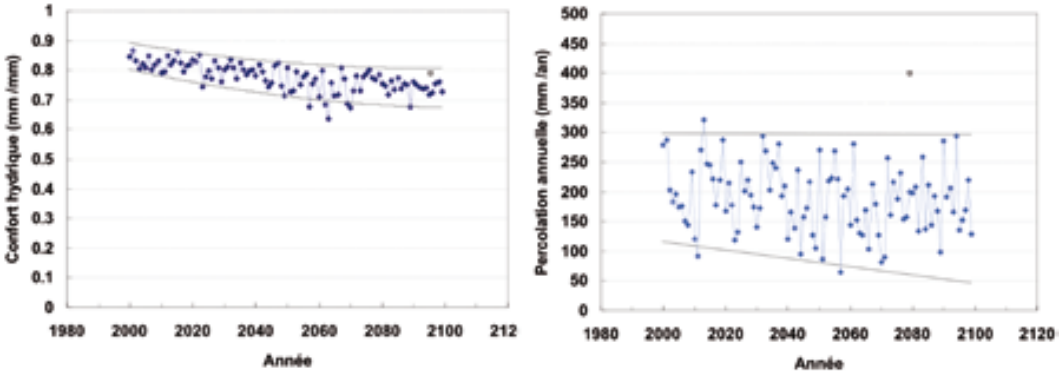


Figure 11 : *moyenne régionale (Clermont-Ferrand, Saint-Étienne) de l'évolution du confort hydrique ETR/ET0 (gauche) et de la restitution d'eau au milieu des pins (droite) (Rotation 45 ans, sol 3) avec l'intervalle de confiance (95 %) lié à la méthode de régionalisation.*

Pour cette région, une baisse des rendements moyens n'est prévue qu'au futur lointain (fig. 12), et ceci de façon plus modérée que dans les régions de plaine, avec une perte de rendement respective de 4 et 16 % pour Clermont et Saint-Étienne.

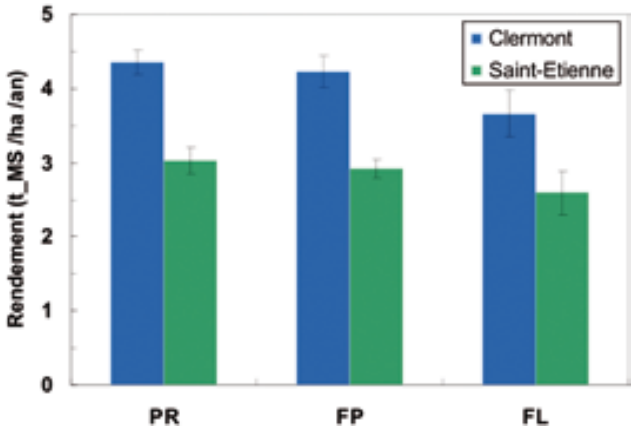


Figure 12 : *évolution des rendements de pins (Rotation 45 ans, sol 3, méthode de régionalisation TT) entre les 3 périodes avec la variabilité interannuelle.*

Changement climatique en zone Sud-Ouest : aperçu des impacts agricoles et forestiers

D6
Sud-Ouest

Frédéric Levrault, Nadine Brisson,
Philippe Pieri, Alexandre Bosc

Régions concernées :

- ***Aquitaine***
- ***Midi-Pyrénées***
- ***Poitou-Charentes***

Sites d'étude : Bordeaux, Lusignan et Toulouse.

Territoire	Surf (ha)	% ST	Surf. Agricole Utile	Surf (ha)	% ST
Surface totale	11 337 680		SAU des E.A.	5 559 746	
Bois et forêts	3 555 218	0,31	Terres arables	4 011 087	0,72
SAU totale	5 932 928	0,52	STH	1 215 019	0,22
Autres	1 849 534	0,16	Cult permanentes	333 565	0,06

Baisse sévère des précipitations, recul du rendement du maïs irrigué avec les pratiques culturales actuelles (plus marqué dans le sud de la zone), maintien des rendements du sorgho dans le FL, peu d'évolution dans le cas du tournesol, remontée vers le nord de la zone des conditions thermiques favorables à la qualité du merlot, baisse des rendements forestiers, telles sont les principales tendances mises à jour pour la zone Sud-Ouest.

A Quelques faits marquants du changement climatique* dans la zone* Sud-Ouest

Températures

L'évolution prévue des températures moyennes annuelles est identique pour les trois sites* : + 1,4 °C entre PR* et FP* ; + 2,7 °C entre PR et FL*. Ce réchauffement est légèrement inférieur à celui de la moyenne des 12 sites métropolitains (+ 1,44 °C entre le PR et le FP ; + 2,83 °C entre le PR et le FL*. Des douze sites étudiés, c'est Toulouse qui conserve le maximum de température moyenne annuelle, tant dans le PR (13,3 °C), dans le FP (14,7 °C) que dans le FL (16,0 °C). L'évolution des températures hautes est assez remarquable, notamment dans le sud de la zone : ainsi, à Toulouse, le nombre moyen de jours échaudants (température maximale journalière > à 25 °C) au cours des mois d'avril à juin passe de 15 jours dans le PR à 21 jours dans le FP, et à 35 jours dans le FL soit plus du double.

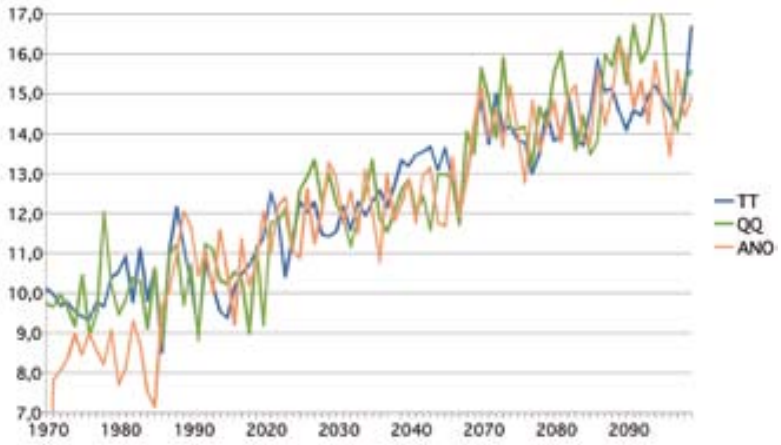


Figure 1 : *évolution de la température moyenne annuelle (°C) de 1970 à 2100, à Toulouse. ARPÈGE* A1B*. Méthodes de régionalisation : ANO, TT et QQ*.*

Précipitations et évapotranspiration

La zone Sud-Ouest se caractérise par l'une des plus fortes diminutions de cumul annuel de précipitations, en particulier dans le FL : –73 à –146 mm entre le PR* et le FP* et –182 à –219 mm entre le PR* et le FL*. La baisse des précipitations est plus marquée dans le nord de la zone, rapprochant ainsi la situation de Lusignan de celle de Bordeaux et Toulouse. Parmi les douze sites de métropole étudiés, c'est à Lusignan qu'on observe la plus forte baisse de cumul annuel de précipitations : –146 mm entre le PR et le FP et –220 mm entre le PR* et le FL. Dans le FL, parmi les douze sites étudiés, c'est Toulouse qui se voit affecté du plus faible cumul annuel de précipitations : 474 mm (au lieu de 657 mm dans le PR).

Une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ET0*) est mise en évidence à Bordeaux, Lusignan et Toulouse, quelle que soit la méthode de régionalisation*. Les augmentations du cumul annuel (moyenne par période de 30 ans) sont ainsi :

- de 70 à 80 mm entre le PR et le FP et de 140 à 175 mm entre le PR et le FL, avec la méthode de régionalisation TT ;
- de 75 à 90 mm entre le PR et le FP et de 220 à 230 mm entre le PR et le FL, avec la méthode de régionalisation QQ.

Ceci représente (moyenne des méthodes TT et QQ) un accroissement moyen de 0,5 à 0,6 mm par jour entre le PR et le FL. Nous n'avons pas étudié la répartition entre saisons de cet accroissement, mais les périodes de forte demande évaporative (printemps et été) prendront largement leur part de ces augmentations.

La concomitance de la baisse des pluies et de la hausse de l'évapotranspiration conduira (fig. 2) à une dégradation marquée du déficit hydrique climatique annuel.

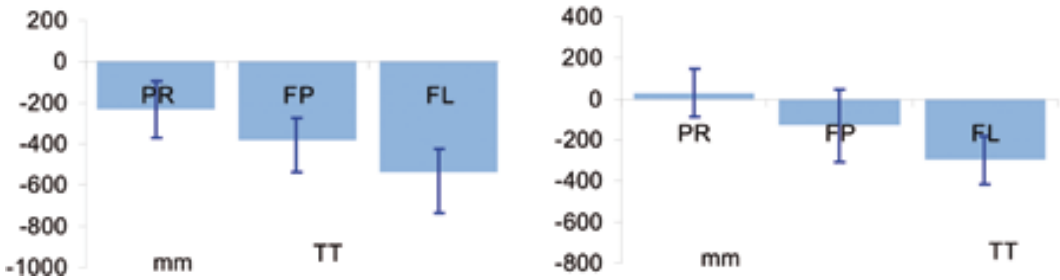


Figure 2 : *déficit hydrique climatique (pluies-ET0) annuel dans le PR, le FP et le FL, à Toulouse (à gauche) et à Lusignan (à droite). ARPÈGE* A1B*. Méthode de régionalisationTT.*

Rayonnement global

Dans le PR, le rayonnement global moyen annuel à Toulouse est de 485 000 (méthode QQ) à 487 000 (méthode TT) J/cm²/an, soit environ 1330 J/cm²/jour en moyenne. Une augmentation progressive est observée tout au long du XXIe siècle. Dans le FL, le rayonnement global moyen annuel atteint 544 000 (méthode QQ) à 553 000 (méthode TT) J/cm²/an, soit environ 1 500 J/cm²/jour en moyenne. À Lusignan, la même dynamique est observée, avec des valeurs journalières moyennes d'environ 1 230 J/cm²/jour dans le PR et d'environ 1 375 J/cm²/jour dans le FL. Cet accroissement du rayonnement de plus de 150 J/cm²/jour explique l'augmentation nette de l'évapotranspiration potentielle (ET0).

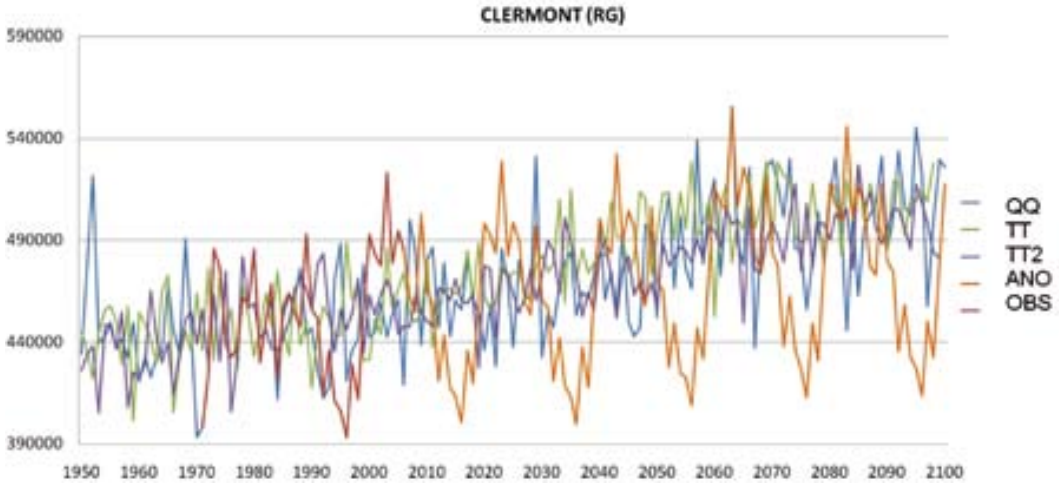


Figure 3 : *évolution du cumul annuel de rayonnement global (J/cm²/an) de 1950 à 2100, à Bordeaux. ARPÈGE* A1B*. Méthodes de régionalisation standard : ANO, TT et QQ auxquelles ont été ajoutées la méthode TT2 (cf. fiche CLIMAT) et les données observées sur le PR.*

Rappel sur la production agricole actuelle en zone Sud-Ouest
(Source Agreste)

Cultures	Surf (ha)	% SAU	Rdt
Prairies t & a	843 369	0,15	70
Maïs grain et sem	741 350	0,13	85
Blé tendre	664 826	0,12	60
Tournesol	389 867	0,07	23
Vigne	270 967	0,05	90
Maïs fourr et ens	175 370	0,03	116
Colza	140 806	0,03	31
Blé dur	136 424	0,02	50
Sorgho	38 896	0,01	55
…/…			
Total	3 401 875	0,61	

Les cultures étudiées dans le projet CLIMATOR couvrent 61 % de la SAU de la zone Sud-Ouest. Celle-ci compte 74 716 exploitations agricoles professionnelles, 96 180 exploitants et co-exploitants. L'ensemble des actifs agricoles représente 159 736 UTA. La valeur des produits agricoles végétaux bruts et transformés s'établit à 7,52 milliards d'euros en 2008.

B Principaux impacts du changement climatique sur le maïs en zone Sud-Ouest

Partout dans le Sud-Ouest, la production de maïs irrigué est appelée à décroître s'il n'y a pas de changements variétaux. Cette diminution est de l'ordre d'1 t ha^{-1} dans le FP et 1,6 t ha^{-1} dans le FL, pour les sites de Toulouse et Bordeaux, légèrement moins pour Lusignan.

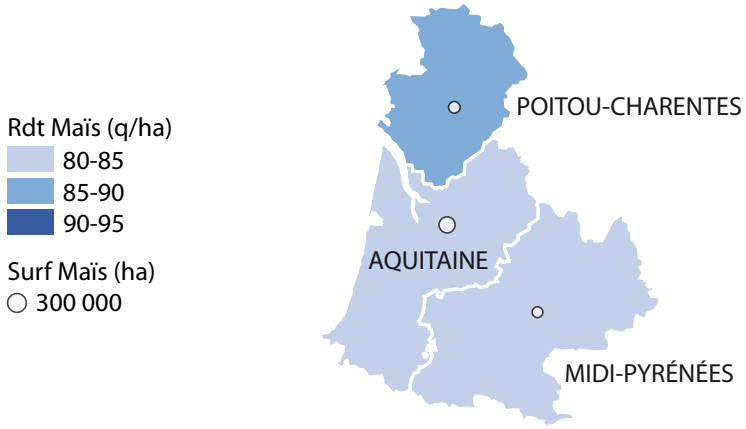


Figure 4 : *surfaces et rendements* actuels du maïs en zone Sud-Ouest (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

La cause est à chercher du côté de la phénologie* et de la réduction de la phase de remplissage des grains qui, en raison du réchauffement, est notablement raccourcie : de l'ordre de 10 jours dans le FP et de 15 jours dans le FL. Dans le même temps, les besoins en eau d'irrigation augmentent jusqu'en 2070 et, à partir de là, diminuent (fig. 5) à cause de la réduction de la durée du cycle.

Bien que cette tendance soit identique pour les deux méthodes de régionalisation extrêmes, on note, à Bordeaux, une divergence dans l'amplitude de l'augmentation. Reste que les niveaux actuels d'alimentation en eau d'irrigation du maïs seront dépassés dans le FP.

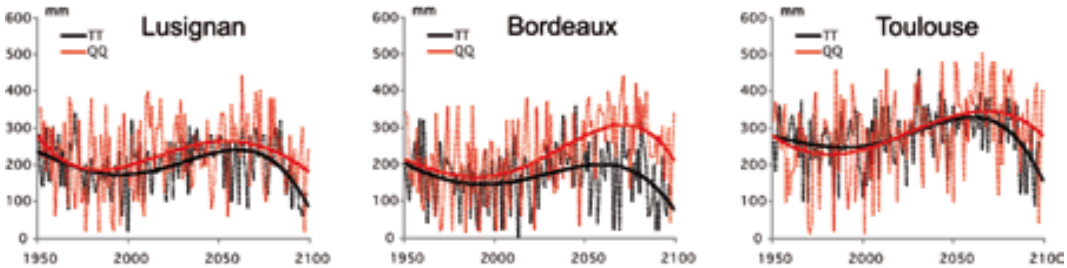


Figure 5 : *évolution des besoins en eau d'irrigation d'une monoculture de maïs (variétés Méribel à Lusignan et DKC5783 à Bordeaux et Toulouse) sur un sol limoneux profond (sol 1) pour les deux méthodes de régionalisation climatique TT et QQ, avec un lissage polynomial d'ordre 4.*

L'avancée des semis, déjà effective actuellement, pourra continuer à un rythme de l'ordre d'un jour tous les quatre ans. Malheureusement, elle ne diminuera pas les besoins en eau d'irrigation, à cause d'une combinaison de facteurs climatiques favorables à l'augmentation de la demande. Dans ce contexte, le choix des sols est primordial : il existe entre 70 et 100 mm d'écart d'irrigation entre un sol à RU de 100 mm et un sol à RU de 200 mm. Seul le recours à des variétés à cycle plus long permettra de maintenir la production de maïs à son niveau actuel dans le Sud-Ouest, ce qui augmentera encore davantage la consommation en eau d'irrigation. Ce constat doit nous inciter à rechercher des solutions alternatives.

C Principaux impacts du changement climatique sur le sorgho en zone Sud-Ouest

Le sorgho pluvial est confronté au stress hydrique*, en particulier pendant la phase de remplissage des grains. Or les déficits pluviométriques prédits par les modèles climatiques* vont accentuer ce stress (fig. 7) et engendrer une baisse des rendements moyens dans le FP, entre 0,6 et 1 t ha^{-1}.

Cependant, la situation s'améliore dans le FL, sauf à Toulouse où esquive* (anticipation* des phases) et évitement* (faible indice foliaire* et fort enracinement) semblent se combiner pour améliorer le confort hydrique* du sorgho.

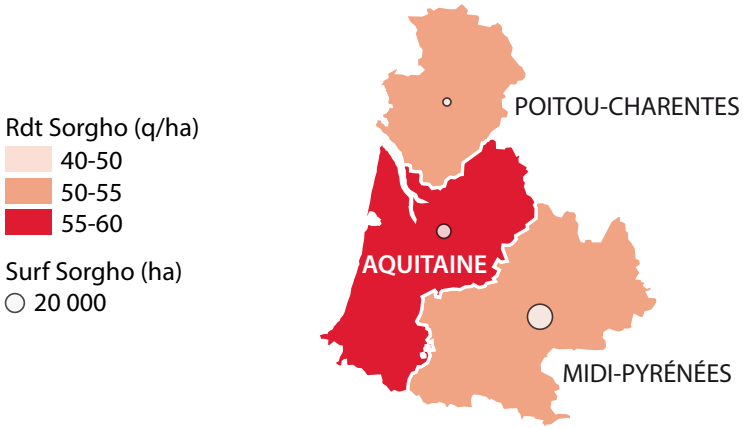


Figure 6 : *surfaces et rendements actuels du sorgho en zone Sud-Ouest (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

Ainsi, les rendements, dans le FL retrouvent des niveaux comparables à ceux du PR : 5,4 t ha^{-1} (± 1,6) à Bordeaux et 4,5 (± 1,8) à Lusignan. À Toulouse, c'est la variabilité* interannuelle du confort hydrique*, plus importante, qui fait baisser le rendement moyen : 4,2 (± 2,2).

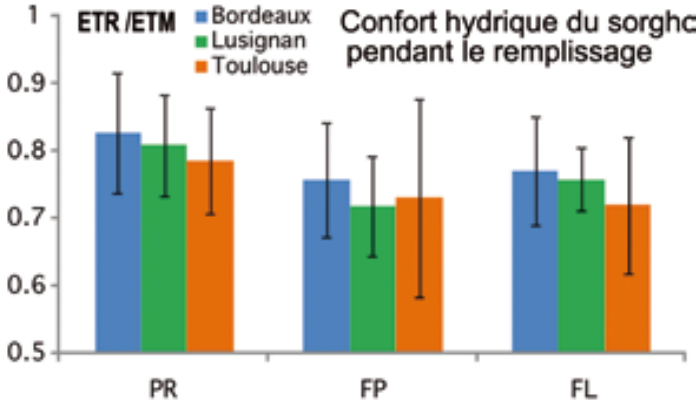


Figure 7 : *évolution du confort hydrique* du sorgho grain (variété Friggo à Lusignan et Fulgus à Bordeaux et Toulouse, sol 1) entre les 3 périodes, avec indication d'une variabilité intégrant l'interannuelle et la variabilité entre méthodes de régionalisation du climat.*

Cultiver le sorgho dans des conditions moins spartiates serait source d'une importante amélioration de sa productivité. Par exemple, une irrigation couvrant 50 % de ses besoins en eau permettrait de doubler les rendements à Toulouse, l'ordre de grandeur des apports étant de 180 mm. Par ailleurs, sans irrigation starter, l'anticipation des semis, intéressante pour accentuer les phénomènes d'esquive, sera limitée dans le FL par la sécheresse du lit de semence au printemps.

D Principaux impacts du changement climatique sur le tournesol en zone Sud-Ouest

Sans changement de pratique de variété et de localisation de la culture sur des sols plutôt pauvres, la culture de tournesol évoluera peu, soumise à une forte variabilité interannuelle (fig. 9).

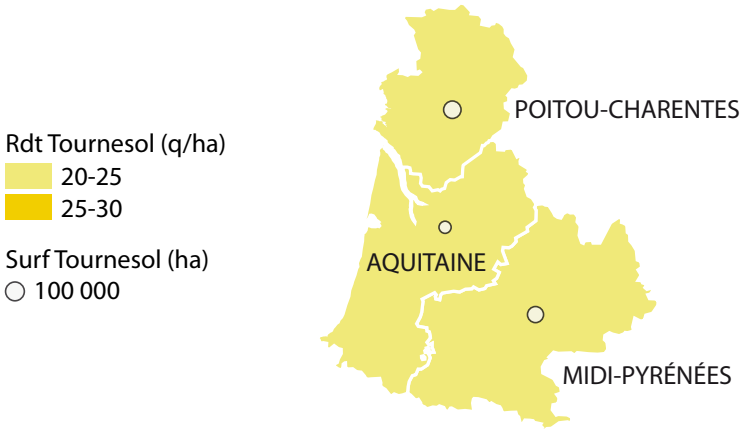


Figure 8 : *surfaces et rendements actuels du tournesol en zone Sud-Ouest (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

Ce résultat est lié à une compensation entre les effets bénéfiques de l'augmentation du CO_2 atmosphérique et les effets négatifs du stress hydrique, particulièrement prégnant sur sol à faible RU* (fig. 9).

Un déplacement géographique vers le nord de la zone (Lusignan) ou sur des sols plus riches offre des perspectives d'amélioration substantielle des rendements.

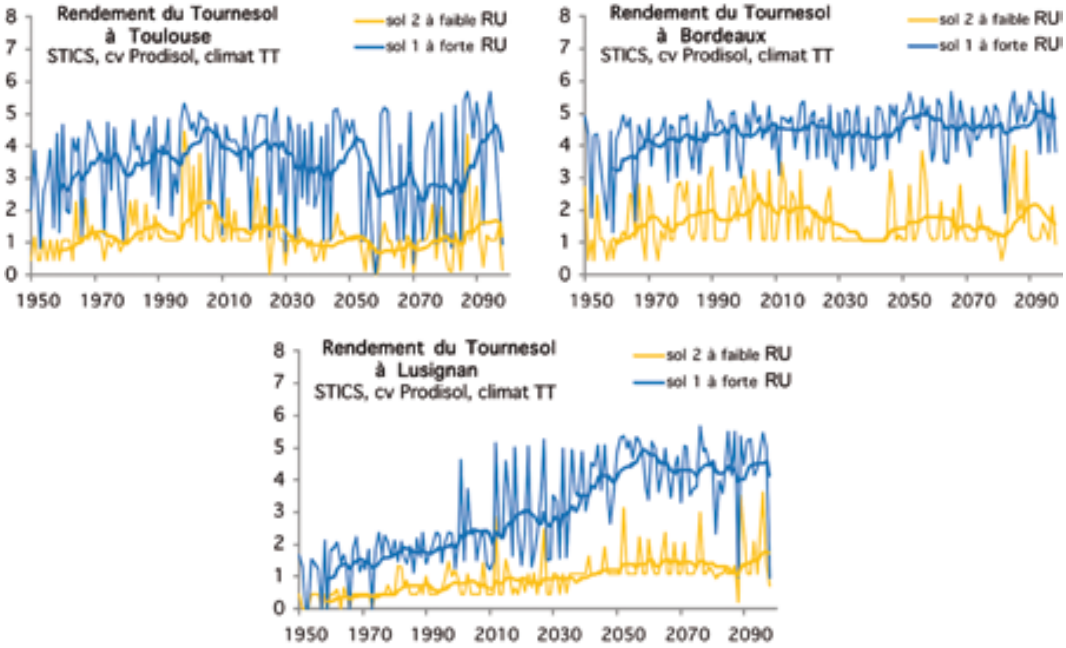


Figure 9 : *évolution de la productivité du tournesol à Toulouse, Bordeaux et Lusignan pour un sol à forte RU (226 mm) et un sol à faible RU (104 mm). Simulations dans le cadre d'une rotation céréalière en pluvial (TBSB) avec la méthode de régionalisation climatique TT. Pour chaque série, sont figurés les données annuelles et un lissage par moyenne glissante sur 10 ans.*

Sans changement de sol, l'avancée des semis, qui pourront s'effectuer à partir de fin mars dans le FP, permettra d'échapper quelque peu à la sécheresse, mais le plus efficace sera, sans nul doute, le recours à des irrigations starter ou de complément pendant la phase végétative du cycle.

E Principaux impacts du changement climatique sur la vigne en zone Sud-Ouest

La région Sud-Ouest est représentée dans CLIMATOR par trois sites dont deux sont de tradition viticole, et un troisième, Lusignan (à mi-chemin entre Cognac et le Val-de-Loire), qui pourrait sans doute l'être actuellement avec des cépages, sols et systèmes de conduite adaptés.

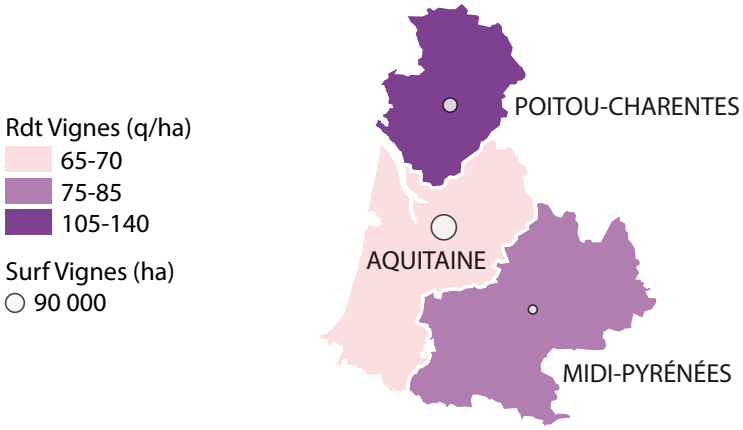


Figure 10 : *surfaces et rendements atuels de la vigne en zone Sud-Ouest (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

La vigne devrait suivre dans cette région des évolutions très comparables à celles prévues globalement, avec une avancée très nette du calendrier phénologique (fig. 11), une très forte augmentation des températures pendant la phase de maturation (fig. 11), une stabilité des conditions de confort hydrique jusqu'aux vendanges et une baisse très sensible des quantités d'eau transférées en profondeur (fig. 11).

Ces tendances sont nettes quelle que soit la série climatique simulée, mais la méthode de régionalisation QQ induit une variabilité bien plus élevée par comparaison avec TT.

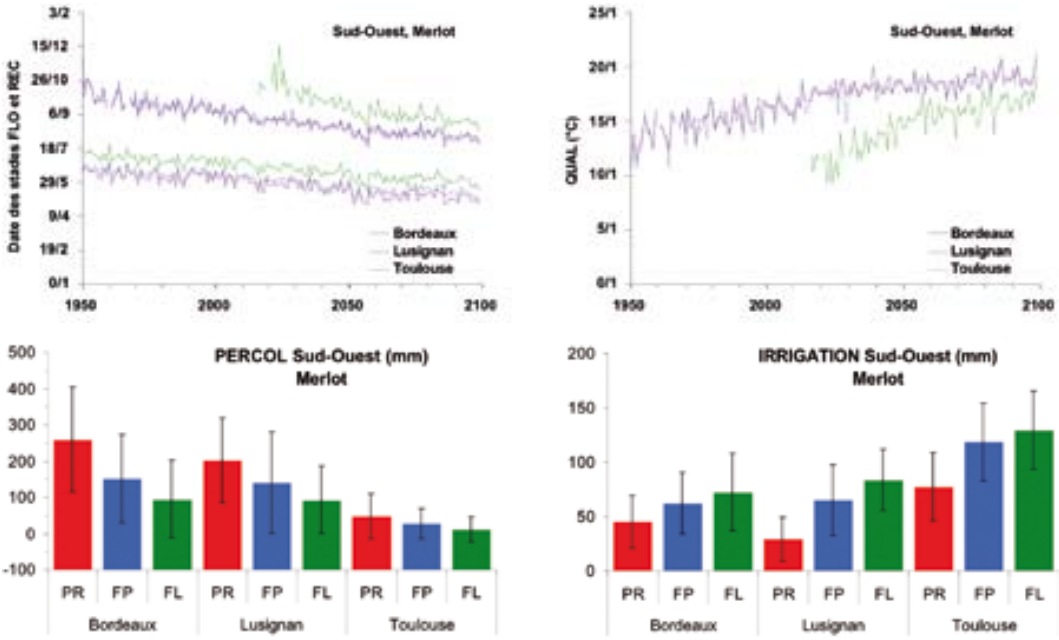


Figure 11 : *évolution dans les trois sites de la zone, en haut à gauche des dates de floraison et de vendanges, en haut à droite de l'indice de qualité (température minimale pendant la maturation), en bas à gauche de la restitution d'eau au milieu et en bas à droite des besoins en irrigation (30 % de l'ETM) – Scénario A1B – Méthode de régionalisation TT – Sol 1.*

Les besoins en irrigation devraient augmenter, même avec une stratégie économe (maintien de ETR/ETM* à 0,3 au moins, goutte-à-goutte enterré), à cause du déficit hydrique post-vendanges (fig. 11). Les simulations montrent également que le climat de Lusignan devrait prochainement devenir adapté au merlot, avec des conditions thermiques relativement favorables à la qualité (fig. 11).

F Principaux impacts du changement climatique sur la forêt en zone Sud-Ouest

Le fonctionnement des couverts forestiers est fortement contrôlé par le statut hydrique, en particulier pendant la saison de croissance (printemps, été).

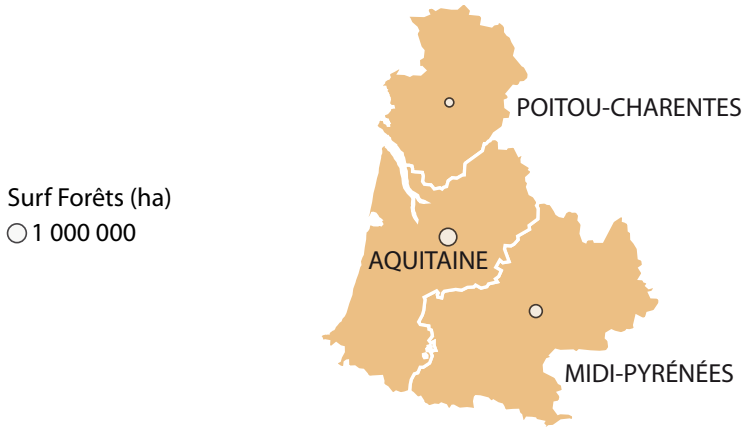


Figure 12 : *surfaces actuelles de la forêt en zone Sud-Ouest (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

L'augmentation de la température (donc de l'ET0) et du déficit pluviométrique prédite par les modèles climatiques (scénario A1B) induit (modèles BILJOU et GRAECO) une diminution du confort hydrique des arbres (fig. 13a). Les conséquences attendues de ce stress hydrique accru sont une diminution forte de la restitution d'eau au milieu (–125 mm/an au FL) (fig. 13b) et une baisse des rendements moyens (fig. 14).

Cette baisse de rendement, faible pour Bordeaux au futur lointain (–7 %), atteindrait –23 % pour les deux autres sites régionaux. Ces tendances seraient d'autant plus accentuées sur les sols profonds.

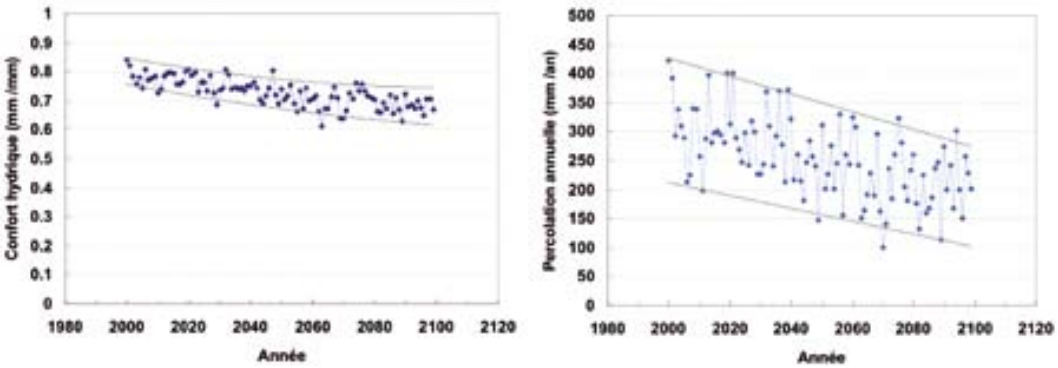


Figure 13 : *moyenne régionale (Bordeaux, Lusignan, Toulouse) de l'évolution du confort hydrique ETR/ET0 (a : gauche) et de la restitution d'eau au milieu des pins (b : droite) (Rotation 45 ans, sol 3) avec l'intervalle de confiance (95 %) lié à la méthode de régionalisation.*

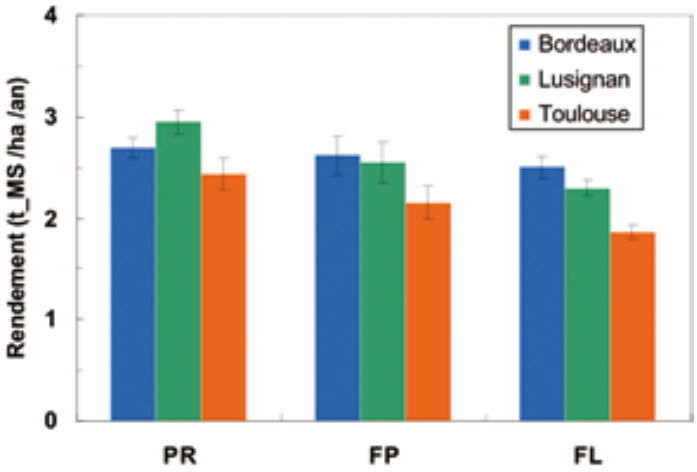


Figure 14 : *évolution des rendements de pins (Rotation 45 ans, sol 3, méthode de régionalisation TT) entre les 3 périodes, avec la variabilité interannuelle.*

Changement climatique en zone Sud-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers

D7
Sud-Est

Frédéric Levrault, Marie-Odile Bancal,
Philippe Pieri, Alexandre Bosc

Régions concernées :

- ***Languedoc-Roussillon***
- ***Provence-Alpes-Côte d'Azur***

Site d'étude : Avignon.

Territoire	Surf (ha)	% ST	Surf. Agricole Utile	Surf (ha)	% ST
Surface totale	5 956 502		SAU des E.A	1 665 124	
Bois et forêts	2 212 196	0,37	Terres arables	502 417	0,30
SAU totale	2 080 968	0,35	STH	696 149	0,42
Autres	1 663 338	0,28	Cult permanentes	466 558	0,28

Forte dégradation du déficit hydrique climatique annuel (pluies-ET0), légère baisse du confort hydrique de la vigne, légère diminution du rendement du blé en pluvial mais augmentation en irrigué, variabilité accrue des restitutions d'eau au milieu sous forêt et baisse des rendements, telles sont les principales tendances mises à jour pour la zone Sud-Est.

A Quelques faits marquants du changement climatique* en zone Sud-Est

Température

Dans le FP*, l'augmentation de température moyenne annuelle à Avignon (+ 1,4 °C par rapport au PR*) est proche du comportement moyen des 12 sites* étudiés (+1,44 °C). Dans le FL*, le réchauffement (+2,7 °C par rapport au PR*) est moins marqué que la moyenne des 12 sites (+2,83 °C). À ces deux échéances, la zone Sud-Est demeure néanmoins, avec la zone Sud-Ouest, l'une des deux plus chaudes de France métropolitaine. C'est aussi dans cette zone que l'évolution en termes de températures hautes est significativement très pénalisante pour les espèces cultivées. Ainsi, le nombre moyen de jours échaudants (température maximale journalière > 25 °C) durant les mois d'avril à juin passe de 27 dans le PR à 36 dans le FP et à 48 dans le FL, soit un quasi-doublement.

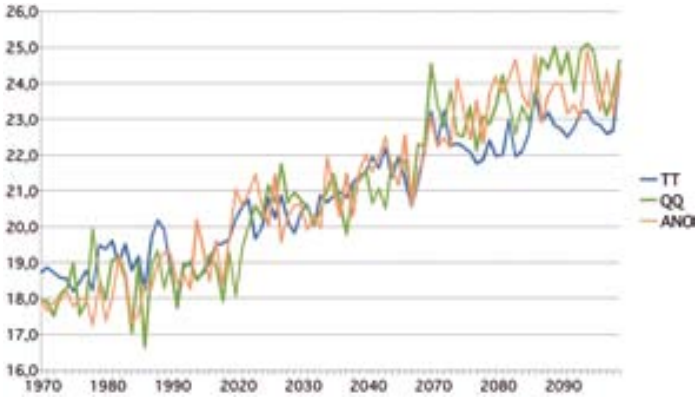


Figure 1 : *évolution de la température moyenne annuelle (°C) de 1970 à 2100, à Avignon. Scénario A1B*. Méthodes de régionalisation* : ANO*, TT* et QQ*.*

Précipitations et évapotranspiration

La zone Sud-Est devrait être affectée par l'une des plus fortes baisses du cumul annuel de précipitations : –109 mm à Avignon entre le PR et le FP et –182 mm entre le PR et le FL. Les cumuls annuels de précipitations (FP : 730 mm ; FL : 657 mm) restent néanmoins supérieurs à ceux des sites de Toulouse, Bordeaux, Lusignan, Colmar, Rennes et Versailles, tant dans le FP que dans le FL, indiquant le maintien d'un régime hydrique méditerranéen.

Une augmentation sensible de l'évapotranspiration potentielle (ET0*) à Avignon est mise en évidence quelle que soit la méthode de régionalisation*. Le cumul annuel (moyenne par période de 30 ans) passe ainsi :

- de 1 038 mm/an dans le PR à 1 097 mm/an dans le FP et à 1 147 mm/an dans le FL, avec la méthode de régionalisation TT ;
- de 1 032 mm/an dans le PR à 1 127 mm/an dans le FP et à 1 270 mm/an dans le FL, avec la méthode de régionalisation QQ.

Cela représente (moyenne des méthodes TT et QQ) un accroissement moyen de 0,5 mm/jour entre le PR et le FL. Nous n'avons pas étudié la répartition entre saisons de cet accroissement, mais les périodes de forte demande évaporative (printemps et été) prendront largement leur part de ces augmentations.

La concomitance de la baisse des pluies et de la hausse de l'évapotranspiration conduira (fig. 2) à une dégradation marquée du déficit hydrique climatique annuel.

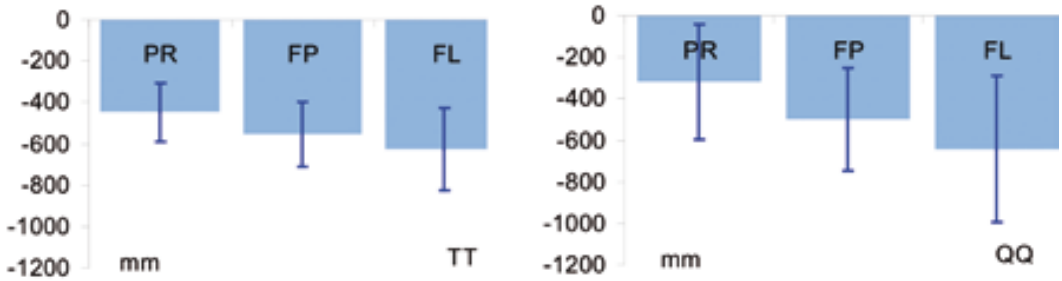


Figure 2 : *déficit hydrique climatique (pluies-ET0) annuel dans le PR, le FP et le FL, à Avignon. ARPÈGE A1B*. Méthodes de régionalisation : TT (à gauche) et QQ (à droite).*

Rayonnement global

À Avignon, on observe une augmentation continue du rayonnement global sur l'ensemble de la période d'étude (1970-2100). Dans le PR, le rayonnement global moyen annuel est de 545 000 (méthode QQ) à 552 000 (méthode TT) J/cm²/an, ce qui représente en moyenne 1 500 J/cm²/jour. Dans le FL, le rayonnement global moyen annuel est de 585 000 (méthode QQ) à 595 000 (méthode TT) J/cm²/an, ce qui représente en moyenne 1 620 J/cm²/jour. Ce « supplément » radiatif de plus de 100 J/cm²/jour explique, avec la hausse des températures, l'augmentation significative de l'évapotranspiration potentielle (ET0).

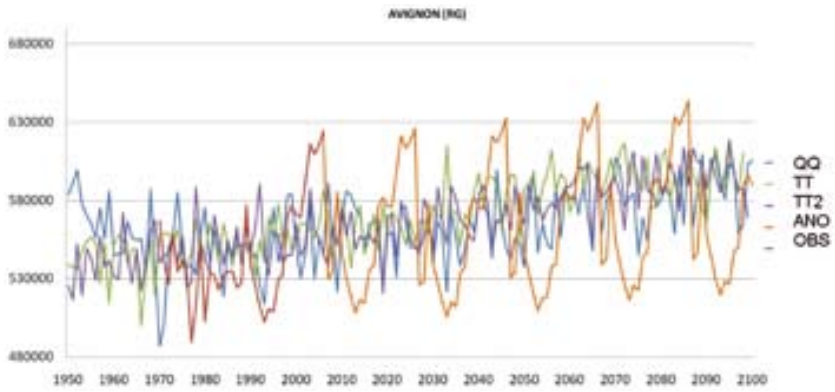


Figure 3 : *évolution du cumul annuel de rayonnement global (J/cm²/an) de 1950 à 2100, à Avignon. ARPÈGE A1B. Méthodes de régionalisation standard : ANO, TT et QQ auxquelles ont été ajoutées la méthode TT2 (cf. fiche CLIMAT) et les données observées sur le PR.*

Rappel sur la production agricole actuelle en zone Sud-Est
(Source Agreste)

Cultures	Surf (ha)	% SAU	Rdt
Vigne	373 095	0,22	73
Blé dur	146 374	0,09	35
Prairies t & a	100 477	0,06	52
Tournesol	28 774	0,02	21
Maïs grain et sem	10 133	0,01	71
Blé tendre	9 787	0,01	37
Colza	6 962	0,00	24
Sorgho	3 033	0,00	53
Maïs fourr et ens	2 477	0,00	93
…/…			
Total	681 111	0,41	

Les cultures étudiées dans le projet CLIMATOR couvrent 41 % de la SAU de la zone Sud-Est. Celle-ci compte 30 156 exploitations agricoles professionnelles, 36 317 exploitants et co-exploitants. L'ensemble des actifs agricoles représente 76 216 UTA. La valeur des produits agricoles végétaux bruts et transformés s'établit à 4,5 milliards d'euros en 2008.

B Principaux impacts du changement climatique sur la vigne en zone Sud-Est

La région Sud-Est, représentée dans CLIMATOR par le site d'Avignon, est déjà actuellement de tradition viticole avec un cépage grenache qui est bien représentatif du vignoble régional.

La vigne devrait suivre, dans cette région, des évolutions assez comparables à celles prévues globalement, avec une avancée très nette du calendrier phénologique (fig. 5a), une très forte augmentation des températures pendant la phase de maturation (fig. 5b) et une stabilité ou une légère dégradation des conditions de confort hydrique* jusqu'aux vendanges. À Avignon, une très grande irrégularité des quantités d'eau transférées en profondeur devrait se poursuivre, plutôt qu'une baisse sensible et régulière en tendance comme dans d'autres régions (fig. 5c).

Ces tendances sont nettes quelle que soit la série climatique simulée, mais la méthode de régionalisation QQ induit une variabilité plus élevée par comparaison avec TT et surtout une forte divergence pour les températures minimales pendant la maturation (fig. 5b).

Les besoins en irrigation devraient augmenter, même avec une stratégie économe (maintien de ETR/ETM* à 0,3 au moins, goutte-à-goutte enterré), en grande partie à cause du déficit hydrique post-vendanges (fig. 5d).

Figure 4 : *surfaces et rendements actuels de la vigne en zone Sud-Est (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

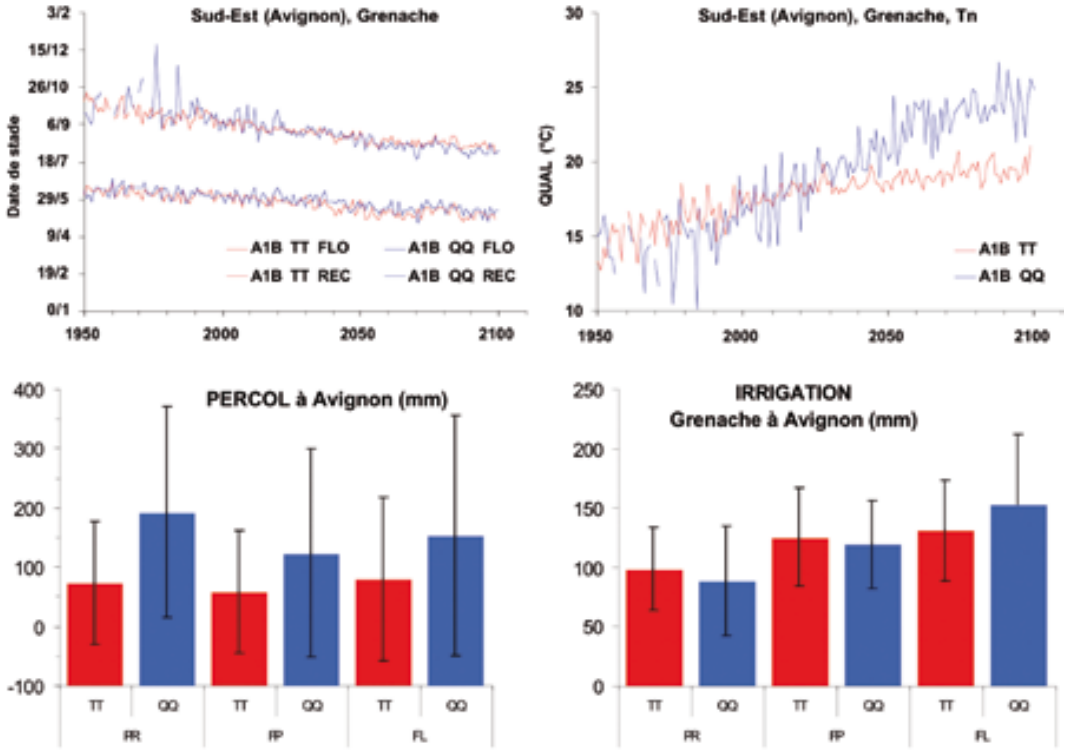


Figure 5 : *évolution de 1950 à 2100, à Avignon, de quatre variables climatiques et agronomiques liées à la croissance* et au développement* de la vigne ; a : haut gauche : dates de floraison et dates de récolte ; b : haut droit : températures minimales pendant la maturation ; c : bas gauche : PERCOL* ; d : bas droite : besoins en irrigation. Scénario A1B. Méthodes de régionalisation TT et QQ. Cépage : grenache.*

C Principaux impacts du changement climatique sur le blé en zone Sud-Est

Le Sud, première région productrice de blé dur, représente près de 39 % de la production française. Malgré cela, les rendements* y sont les plus bas, avec une moyenne de 3,5 t ha^{-1}, loin derrière les zones Sud-Ouest (5 t ha^{-1}) et Centre-Nord (6,2 t ha^{-1}).

Figure 6 : *surfaces et rendements actuels du blé en zone Sud-Est (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

La figure 7 montre que, dans le cas d'une culture pluviale (rotation* TBSB), il apparaît une évolution favorable du confort hydrique pendant le remplissage du grain. Cette augmentation est surtout liée à l'ajustement au stress qui s'opère pendant la phase végétative du cycle par une diminution de l'indice foliaire*, phénomène classique d'évitement* qui améliore les conditions hydriques de fin de cycle, mais pénalise le nombre de grains et le rendement.

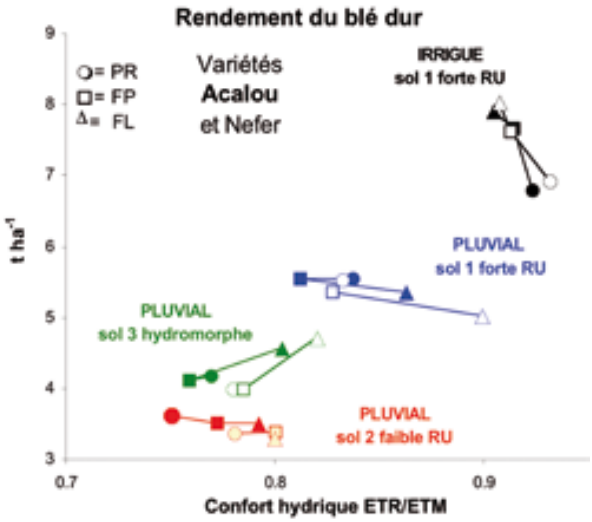


Figure 7 : *évolution du rendement du blé dur avec le confort hydrique en fonction de la variété (Acalou en foncé et Nefer en clair), du type de sol et du mode de conduite (méthode de régionalisation climatique TT, modèle STICS).*

À cela il faut ajouter l'augmentation des stress thermiques de fin de cycle : le nombre de jours échaudants au printemps est en moyenne de 37 jours pour le PR, 58 jours pour le FP et 83 jours pour le FL (cf. fiche CLIMAT). Ainsi, pour les sols 1 et 2, de RU* très différentes, les rendements diminuent ou stagnent dans le FL, indiquant que l'augmentation du CO_2 et du confort hydrique* pendant le remplissage ne suffisent pas à augmenter le niveau moyen des rendements entre PR et FL. Le sol 3 fait exception, grâce à la diminution des problèmes d'hydromorphie consécutifs à la baisse de pluviométrie dans le FL (de l'ordre de 80 mm annuels).

Dans le cas d'une culture irriguée (MBCB), on constate une tendance à l'augmentation des rendements dans le FP et le FL, malgré une légère baisse de confort hydrique. Cela est dû à la fois à de meilleures conditions pendant la phase végétative, permises par l'irrigation et un semis plus précoce, grâce au précédent colza qui engendre une floraison en moyenne 5 jours plus tôt que dans la rotation pluviale et limite les stress thermiques de fin de cycle.

D Principaux impacts du changement climatique sur la forêt en zone Sud-Est

Le fonctionnement des couverts forestiers est fortement contrôlé par le statut hydrique, en particulier pendant la saison de croissance (printemps, été).

Figure 8 : *surfaces actuelles de forêt en zone Sud-Est (moyennes 2000-2007). Source Agreste.*

Les changements climatiques modélisés dans le cas du scénario climatique A1B pour Avignon ne génèrent (modèles BILJOU et GRAECO) qu'une légère diminution du confort hydrique des arbres (fig. 9a), déjà faible à la période de référence. La restitution d'eau au milieu est globalement maintenue sur la période 2000-2100 (fig. 9b), avec une très forte variabilité interannuelle.

Pour cette région, une baisse des rendements moyens de 8 % au FP et de 17 % au FL est prévue avec le modèle GRAECO (fig. 10).

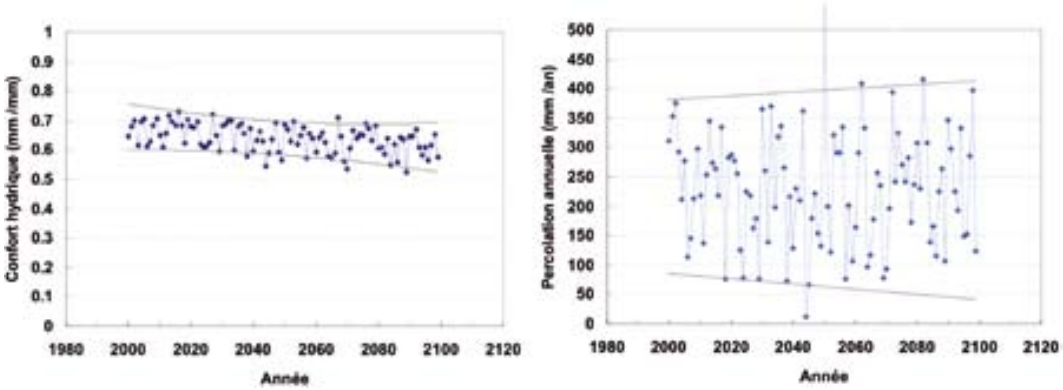


Figure 9 : *évolution du confort hydrique (ETR/ET0) (a : gauche) et de la restitution d'eau au milieu des pins (b : droite), à Avignon (Rotation 45 ans, sol 3) avec l'intervalle de confiance (95 %) lié à la méthode de régionalisation TT.*

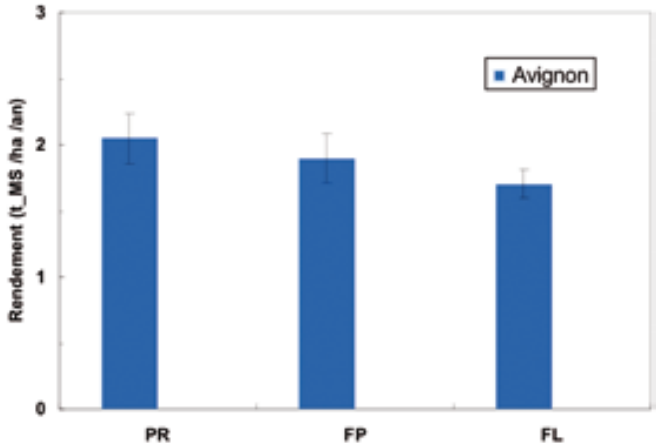


Figure 10 : *évolution des rendements de pins (Rotation 45 ans, sol 3, méthode de régionalisation TT) entre les 3 périodes avec la variabilité interannuelle.*

Changement climatique en zone Antilles : aperçu des impacts agricoles

Jorge Sierra

D8
Antilles

Régions concernées :

- ***Guadeloupe***
- ***Martinique***

Zones analysées : Guadeloupe
Est et Nord de la Basse-Terre (plaine de la Basse-Terre).

Augmentation des températures mais aussi des précipitations, baisse des rendements des espèces en C4 (canne à sucre, maïs) et maintien dans le futur proche des rendements des espèces en C3 (banane), augmentation des concentrations en nitrates des eaux lessivées si les fertilisations sont accrues, baisse de la teneur en matière organique des sols par accroissement de la minéralisation, telles sont les principales tendances mises à jour pour la zone Antilles.

A Quelques faits marquants du changement climatique* dans la zone* des Antilles

A : annuel ; C : carême (janvier-juin) ; H : hivernage (juillet-décembre)

Période	Température moyenne journalière °C			Pluies mm/an			Rayonnement solaire MJ/m		
	A	C	H	A	C	H	A	C	H
1970-99	24.8	24.3	25.4	2050	900	1150	18.1	18.4	17.7
2020-49	25.8	25.2	26.4	2500	1200	1300	16.7	17.0	16.3
2070-99	27.1	26.6	27.5	3500	1600	1900	15.1	15.8	14.5

Tableau 1 : *Scénario CNRM A1B* (cf. fiche CLIMAT)*

Il faut d'abord remarquer que les incertitudes* sur le changement climatique, notamment en Guadeloupe, sont plus importantes pour les pluies que pour les températures (cf. fiche CLIMAT). D'après le scénario analysé, le climat de la plaine de la Basse-Terre deviendrait plus chaud et humide. Par rapport à la situation actuelle, la température augmenterait de 1 °C dans le FP* et de 2,3 °C dans le FL*. Cette augmentation concerne aussi bien le carême que l'hivernage. Les pluies annuelles subiraient aussi une augmentation qui serait de plus en plus prononcée : + 22 % dans le FP et + 70 % dans le FL. L'augmentation serait relativement plus importante en carême : + 33 % dans le FP et + 75 % dans le FL. À cause d'un plus grand ennuagement, le rayonnement solaire arrivé aux cultures diminuerait de 8 % dans le FP et de 18 % dans le FL.

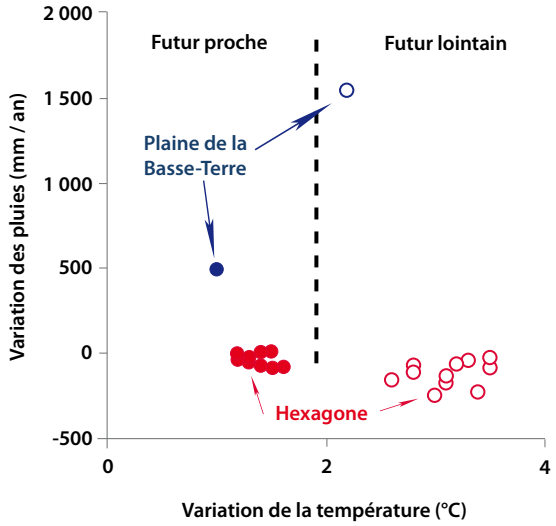


***Figure** 1 : changement climatique dans l'Hexagone et dans la plaine de la Basse-Terre (scénario CNRM A1B).*

Pour les deux périodes analysées, l'augmentation de la température dans la plaine de la Basse-Terre serait la plus faible parmi les sites étudiés. La tendance s'inverse pour les pluies.

B Rappel sur la production agricole actuelle

(Source Agreste 2007)

Culture	Surface (ha)	Rendement agricole (tonnes/ha)	Part de la SAU en Guadeloupe (%)
Canne	6 000	65	17
Banane	2 000	25	6

Les systèmes de culture étudiés dans CLIMATOR, représentent 23 % de la SAU 2006 de la Guadeloupe, et 75 % de la SAU de la zone analysée (fig. 2).

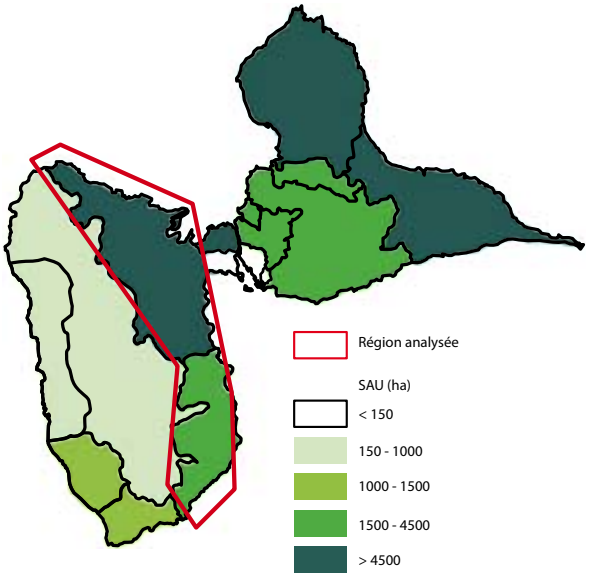


***Figure 2** : SAU par zone en Guadeloupe.*

C Effets du changement climatique sur quelques systèmes cultivés dans la plaine de la Basse-Terre

Canne

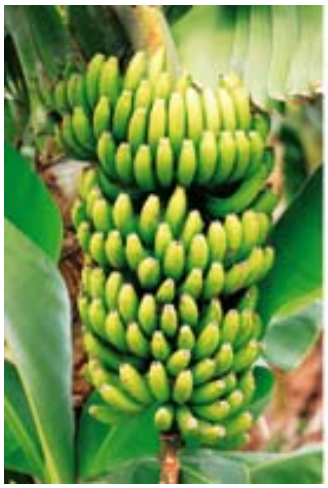
Les résultats correspondent à la variété B69566, sans irrigation, avec une dose de fertilisation de 150 kg d'azote/ha/an et une récolte mécanique.

Les rendements* de canne diminueraient aussi bien dans le FP (–14 %) que dans le FL –23 %) (fig. 3). La réduction de la production en sucre serait plus prononcée en raison d'une teneur plus faible à la récolte : –16 % et –32 % dans le FP et le FL, respectivement. Ces résultats sont à mettre en relation avec le raccourcissement du cycle cultural* (découlant de l'augmentation de la température) et avec la réduction du rayonnement solaire. L'augmentation du CO_2 profitera peu à la canne (plante en C4*).

Banane

Les résultats correspondent à la variété Grande Naine, sans irrigation et avec une dose de fertilisation de 400 kg d'azote/ha/an (50 kg à la plantation et 25 kg tous les dix jours jusqu'à la floraison).

La diminution des rendements devrait être faible dans le FP (– 1%), et plus accentuée dans le FL (–7 %) (fig. 3). Pour cette culture, il existe une compensation partielle entre l'effet positif lié au CO_2 (plante en C3*) et le raccourcissement du cycle provoqué par une température en augmentation. La diminution du rayonnement solaire n'affecterait pas significativement la production de la banane.



Maïs

Les résultats correspondent à la variété guadeloupéenne Spectral, sans irrigation et avec une dose de fertilisation de 150 kg d'azote/ha/an.

Peu important en Guadeloupe, le maïs constitue un enjeu alimentaire de premier ordre dans les tropiques. Cette raison et aussi le fait qu'il représente un exemple de culture à cycle très court (trois mois) nous ont incités à réaliser quelques tests sur l'effet du changement climatique. Les résultats obtenus (fig. 3) et les facteurs climatiques impliqués sont similaires à ceux évoqués pour la canne (le maïs est une plante C4).

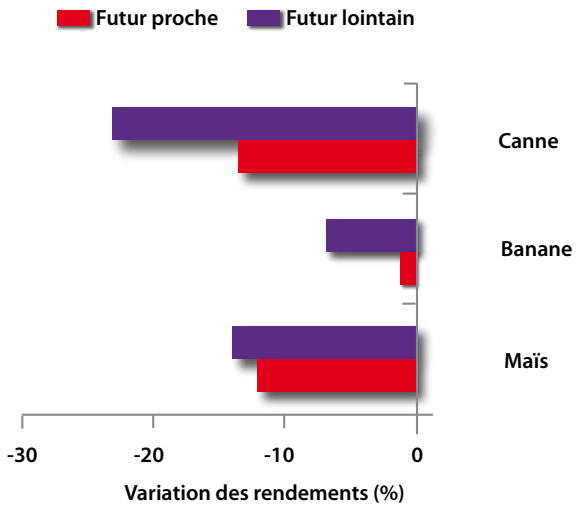


***Figure** 3 : effet du changement climatique sur les rendements.*

D Quelques grands enjeux agri-environnementaux du changement climatique dans la plaine de la Basse-Terre

Qualité de l'eau (concentration en nitrates)

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 saturation de cette capacité de rétention, à cause des doses d'engrais plus élevées, entraînerait une augmentation du lessivage et des concentrations de nitrates dans l'eau de drainage.

Matière organique* du sol

La figure 4 montre que la matière organique diminuerait dans le temps, indépendamment de la culture considérée. En moyenne, la réduction 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 des restitutions *via* les résidus de récolte.

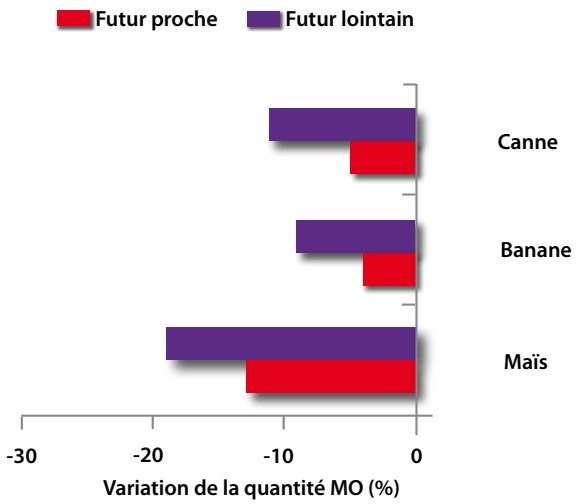


***Figure 4** : effet du changement climatique sur la quantité de MO du sol.*

Adaptations identifiées

Il n'y a pas « une » stratégie d'adaptation pour faire face au changement climatique, mais des mesures à prendre en considération afin de nuancer et/ou d'éviter les aspects négatifs (par exemple, effet de la température sur la durée du cycle) et de profiter des aspects positifs (par exemple, CO_2, pluies en carême). Dans ce sens, l'augmentation de la biodiversité cultivée (rotations, cultures et variétés associées, cultures des légumineuses, pluriactivité agriculture/élevage) serait utile pour minimiser les risques et diversifier les sources de revenus. En même temps, ces pratiques vont dans le sens d'une plus grande protection de la ressource sol, en réduisant le risque de dégradation et en augmentant l'entrée de matière organique dans le sol. Une généralisation de l'utilisation des mulchs végétaux (diminution de la température du sol) et de l'application de composts contribuera aussi au maintien des teneurs en matière organique.

Du point de vue des calendriers culturaux, la tactique consisterait à décaler le cycle de végétation vers des périodes où le climat est plus favorable à la production (par exemple, carême plus humide). Il peut s'agir, par exemple, d'éviter l'exposition à des facteurs limitants (température en hivernage) ou encore d'allonger la durée du cycle, ce qui entraînerait une augmentation du potentiel de production.

L'amélioration génétique a un rôle essentiel à jouer dans l'adaptation, aussi bien en ce qui concerne des variétés avec des seuils de température plus élevés que dans l'augmentation des indices de récolte (c'est-à-dire accroître l'efficacité de transformation de biomasse végétale en rendement), notamment pour les espèces à cycle court (maraîchage).

Nouvelles potentialités agricoles introduites par le changement climatique

Les plantes à tubercules (plantes en C3) pourraient être davantage cultivées, notamment au nord de la région analysée (sans la contrainte liée au chlordécone). Des dates de plantations plus précoces, en faisant jouer l'effet photopériodique et le rallongement de la période végétative, favoriseraient la croissance postérieure du tubercule. Des cultures comme le maïs et les maraîchères, très sensibles au stress hydrique, pourront être réalisées à la faveur d'une meilleure alimentation en eau, pourvu que la disponibilité des variétés adaptées à des températures plus élevées soit assurée.

Ce qu'il faut retenir

✓ Parmi les cultures d'exportation, la canne semble la plus affectée par le changement climatique : elle ne devrait pas profiter de l'augmentation de la concentration en CO_2 et subirait l'effet de la température sur le raccourcissement du cycle. Les cultures à cycle court (par exemple, maraîchage) seraient particulièrement touchées par l'effet de l'accroissement de la température, à cause de la réduction des périodes de croissance et de remplissage des organes récoltés. L'aspect environnemental le plus délicat concernerait la dégradation des sols à cause de la perte en matière organique.

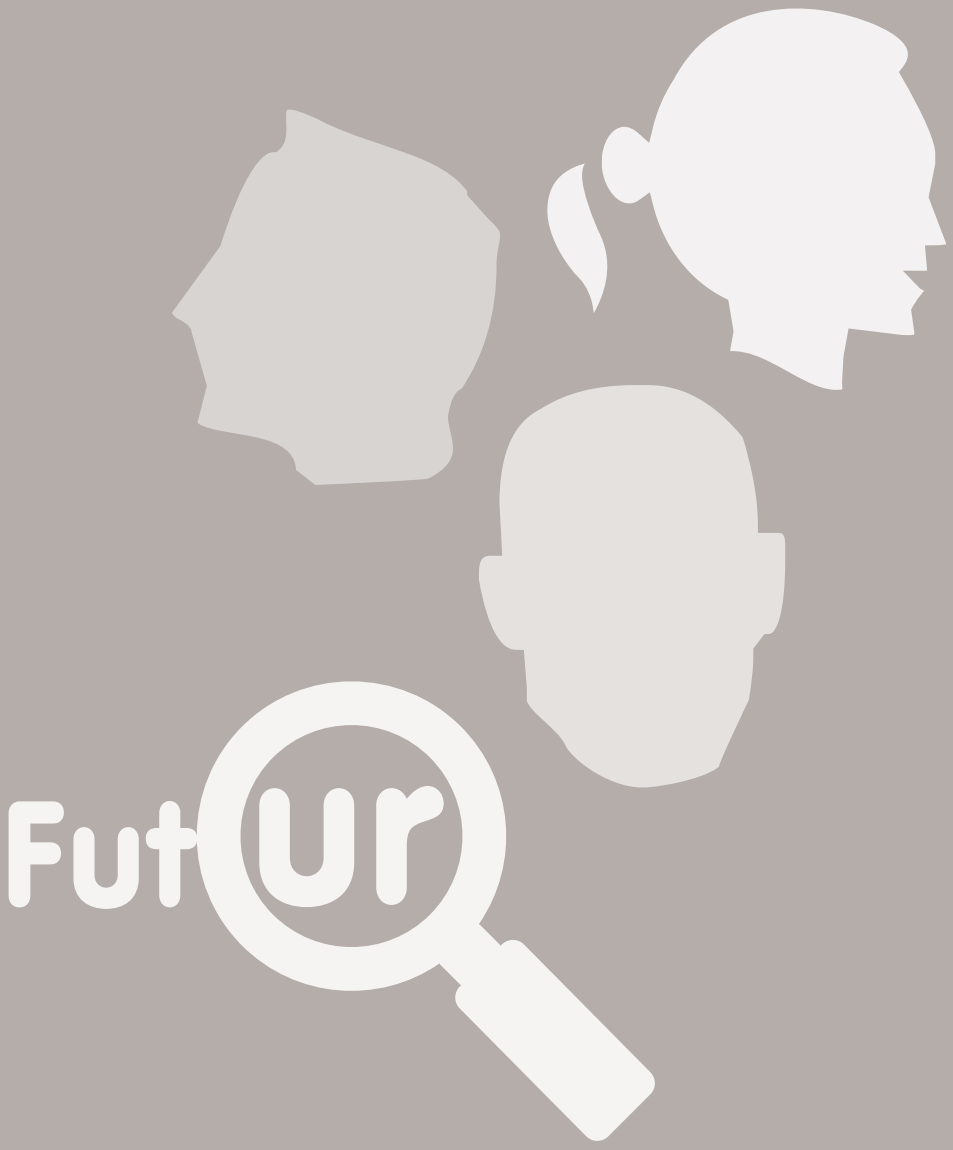
Ce qu'il faut approfondir…

✓ La plupart des modèles de culture* actuellement disponibles ne formulent pas d'hypothèses sur l'évolution des risques de bioagresseurs suffisamment précises pour les intégrer dans un schéma adaptatif plus complet. Cela comprend la dynamique des mauvaises herbes, des champignons et des ravageurs dans un climat plus chaud et humide. De même, les scénarios climatiques ne tiennent pas compte de l'évolution du risque cyclonique (fréquence, intensité et distribution géographique dans la Caraïbe). Ces deux facteurs pourraient affecter notamment la banane et modifier les considérations évoquées ci-dessus pour cette culture. En ce qui concerne les maladies, il reste à améliorer nos connaissances sur l'évolution des pathogènes actuellement présents en Guadeloupe et aussi sur la migration et l'introduction de nouveaux bioagresseurs.

✓ Il existe actuellement un large débat scientifique sur l'importance de l'adaptation thermique des micro-organismes du sol et son effet sur la dégradation de la matière organique. Ce sujet a commencé à être exploré depuis une dizaine d'années en milieu tempéré, mais très peu d'information est aujourd'hui disponible pour les sols tropicaux. L'enjeu d'une telle adaptation concerne la réduction des conséquences de l'augmentation de la température sur les teneurs en matière organique. Accroître nos connaissances sur ce thème est essentiel pour déterminer si oui ou non le changement induira une forte perte de qualité des sols guadeloupéens.

E

Annexes



Annexes

E

• E1 - Glossaire

• E2 - Les femmes et les hommes de CLIMATOR

Adaptation (au changement climatique)
Ajustement des systèmes naturels ou humains face à un environnement changeant. L'adaptation peut être anticipée ou réactive, publique ou privée, autonome ou planifiée.

Analyse de variance
Test statistique permettant de comparer la variabilité* existant entre différentes modalités d'un facteur, dite « inter », et la variabilité à l'intérieur des modalités, dite « intra ». Ce test permet de déterminer si un facteur qualitatif produit des effets statistiquement significatifs à un seuil donné sur une variable donnée.

ANO (méthode des anomalies)
Voir Méthodes de régionalisation*.

Anticipation
Nombre de jours d'avancée d'un stade phénologique entre une période de référence et une période postérieure. Celle-ci peut être « naturelle », c'est-à-dire due à l'augmentation des températures, ou « humaine », c'est-à-dire due à un changement de pratiques (choix variétal, date de semis), voire les deux.

ARPÈGE
Modèle de simulation (voir Simulateur*) du fonctionnement de l'atmosphère, utilisé par Météo-France pour prévoir le climat*, d'ici à la fin du siècle. Dans CLIMATOR, il est couplé à des méthodes de régionalisation* afin d'obtenir des scénarios climatiques régionaux.

A1B
Voir Scénarios d'émission*.

A2
Voir Scénarios d'émission*.

Bilan hydrique
Somme algébrique des flux d'eau concernant la parcelle agricole (à différencier du bilan hydrologique, terme utilisé à l'échelle du bassin versant). En situation de plaine, on compte positivement dans ce bilan : la pluie, l'irrigation et les remontées capillaires. On compte négativement : l'évapotranspiration réelle, le ruissellement (résultant de la capacité limitée d'infiltration) et le drainage (ou percolation). Le bilan simplifié ne tient pas compte des remontées capillaires. La variation de stock en eau (journalière, hebdomadaire ou décadaire) à l'intérieur de la réserve utile est gouvernée par ce bilan : $\Delta S = P + (I) - ETR - Ruissellement - D$.

Boxplot
Représentation graphique d'un échantillon et de sa distribution. Aussi appelé « boîtes à moustaches » ou « boîtes à pattes », un boxplot est une boîte autour d'une valeur centrale prolongée par des segments. La valeur centrale est le quantile* à 50 %, le côté inférieur (resp. supérieur) de la boîte est le quantile à 20 % (resp. 80 %). Les segments relient les côtés de la boîte aux valeurs minimales et maximales de l'échantillon.

B1
Voir Scénarios d'émission*.

Changement climatique
Modification de certains paramètres du climat* par une cause externe. La différence entre deux périodes de 30 ans qui ne s'expliquerait que par la variabilité* naturelle n'est pas un changement

climatique. Dans CLIMATOR, cette cause externe est la modification de concentration atmosphérique en gaz à effet de serre et aérosols, découlant des activités humaines. Le changement climatique ne peut être évalué que sur des périodes supérieures à 30 ans, ce qui est cohérent avec l'évolution lente des causes externes du changement étudié ici.

Climat
Description quantitative des statistiques des variables atmosphériques et de surface sur une période de 30 ans, en faisant abstraction des années particulières de cette période. Parler du climat de l'été 2003 dans cette acception est un non-sens. Le climat est décrit par des paramètres, incluant les valeurs centrales (moyenne, médiane), mais aussi la variabilité* (variance, extrêmes, cycles) et des liaisons spatiotemporelles et intervariables.

Climatologie synoptique
Mise en cohérence des paramètres climatiques de différents sites qui peuvent être expliqués par la circulation atmosphérique de grande échelle (par exemple, anticyclone des Açores). Dans CLIMATOR, ce concept est utilisé dans la méthode de régionalisation* par types de temps*.

Confort hydrique
Ce terme exprime la capacité du couvert végétal à fonctionner de façon potentielle, c'est-à-dire sans fermeture stomatique liée à un stress hydrique. Il est traduit dans CLIMATOR par le rapport ETR/ETM* pendant la période végétative (floraison-récolte chez les annuelles, période feuillue chez les décidus, toute l'année chez les conifères et la prairie).

Croissance
Ensemble des changements quantitatifs irréversibles qui se produisent au cours de la vie d'une plante : allongement des entre-nœuds, multiplication cellulaire, multiplication et croissance des feuilles. En agronomie, la croissance est assimilée à l'accumulation de biomasse et dépend du potentiel fixé par l'espèce et la variété, puis des conditions biophysiques (rayonnement, température, alimentation hydrique et minérale, bioagresseurs) présentes tout au long du cycle cultural. En tendance générale, l'augmentation des températures induite par le changement climatique* entraînera une augmentation de la croissance.

Culture dérobée
Dans une rotation culturale, si l'intervalle de temps entre deux cultures (période dite d'interculture) est suffisant et les conditions pédoclimatiques ad hoc, une culture (dite dérobée) peut être intercalée à des fins particulières :
- couvert végétal servant à piéger l'azote résiduel et à limiter l'érosion des sols (exemple de couvert non récolté : moutarde derrière un colza, dans une rotation maïs-blé-colza ; exemple de couvert récolté : ray grass derrière un blé, dans une rotation maïs-blé) ;
- culture récoltée permettant de lutter contre la flore adventice (exemple : tournesol précoce derrière un blé, dans une rotation maïs-blé).
Par son effet d'avancement des dates de récolte, le changement climatique* devrait augmenter les possibilités de mise en œuvre de cultures dérobées.

Culture piège (à nitrates)
Culture introduite entre deux cultures d'une rotation et destinée à consommer (piéger) l'azote résiduel laissé dans le sol par le précédent. L'augmentation des durées d'interculture et la minéralisation* accrue de l'azote organique du sol liées au changement climatique* entraîneront vraisemblablement un recours accru aux cultures pièges.

Cycle cultural
Ensemble des étapes de la vie d'une culture, que l'on balise généralement par des points de repère, appelés stades, décrivant les étapes les plus importantes. Pour les cultures annuelles, les étapes du cycle vont du semis à la récolte. Pour les cultures pérennes, l'ensemble des étapes est généralement parcouru tous les ans. On peut noter que le changement climatique, par l'accroissement des températures, va induire un raccourcissement de la durée des cycles culturaux (anticipation*).

C3 *versus* C4
Il existe, dans le processus de photosynthèse des plantes, deux types de fixation du CO_2. Les termes « C4 » et « C3 » identifient ces deux types de fixation du CO_2 et reflètent le nombre d'atomes de carbone de la première molécule organique formée. Ces mécanismes sont associés à

des comportements écophysiologiques différents. Les espèces en C3, les plus nombreuses, réagissent plus nettement à l'augmentation du CO_2, alors que la photosynthèse des plantes en C4, déjà optimisée, est moins réactive. Les C4, essentiellement d'origine tropicale (maïs, sorgho…), valorisent mieux l'utilisation de l'eau.

Degrés x jours humectés
Par analogie avec le concept de degrés x jours utilisé comme critère pilote du développement* des plantes, indicateur proposé pour la phase d'infection des pathogènes des cultures et calculé comme le produit de la durée d'humectation par la température moyenne de la période humectée et divisée par 24 pour être ramenée au jour.

Demande climatique en eau
Ce terme est le pendant de l'offre représentée par la pluie. Il correspond à l'évapotranspiration potentielle ET0.

Développement
Ensemble des changement qualitatifs qui s'opèrent au cours de la vie d'une plante. Il consiste en la mise en place des différents organes du végétal (organogenèse). Les stades phénologiques sont les repères qui jalonnent le développement d'une plante. Régi principalement (mais pas exclusivement) par la température, le développement sera affecté par le changement climatique* dans le sens d'une accélération, appelée anticipation*.

Disponibilité thermique
Cumul des températures journalières dépassant un seuil (appelé base) sur une période d'intérêt. Cette quantité est corrélée à des effets biologiques cumulatifs, par la phénologie* des plantes. La disponibilité thermique est très déterminante de la faisabilité*. Elle s'accroît avec le changement climatique*.

Distribution Closed-Skew Normal
Distribution de probabilité possédant un paramètre de dissymétrie, dérivée de la loi normale (loi gaussienne) et conservant ses propriétés mathématiques intéressantes. Cette distribution est utilisée dans le générateur stochastique de temps* pour reproduire les dissymétries des variables climatiques.

Durée d'humectation
Durée (exprimée en heures) de présence d'eau liquide sur les feuilles d'un couvert végétal. Elle dépend de l'architecture du couvert, des propriétés de surface des feuilles et du microclimat dans la végétation. Le phénomène débute avec un dépôt de rosée ou un épisode de pluie. Une fois ces épisodes terminés, se rajoute une phase de séchage plus ou moins longue en fonction de la quantité d'eau déposée et des conditions évaporatives. La durée d'humectation est déterminante pour le développement de certains champignons pathogènes étudiés dans CLIMATOR.

Eau bleue
Fraction de l'eau de pluie correspondant à la restitution au milieu*. En zone tempérée, elle est de l'ordre du tiers de la pluie (en France, globalement, 300 mm par an).

Eau verte
Fraction de l'eau de pluie consommée par les cultures ou les milieux naturels. En zone tempérée, elle est de l'ordre des deux tiers de la pluie (en France, globalement, 600 mm par an).

Écart-type
Mesure de la variabilité* d'un échantillon qui s'exprime dans l'unité de la grandeur étudiée. Par définition, le carré de l'écart-type est la moyenne des écarts élevés au carré entre la variable et sa moyenne arithmétique. Pour une variable distribuée selon une loi gaussienne, 95 % des valeurs se trouvent dans l'intervalle [moyenne ± 2 écarts-types].

Échaudage thermique
Notion englobant l'ensemble des phénomènes ayant un impact négatif sur le remplissage des grains lorsque les températures, durant cette phase, s'élèvent.

Esquive
Manière d'éviter de souffrir de la sécheresse (ou d'un stress thermique ou biotique) en posi-

tionnant son cycle végétatif le plus possible en dehors de la période sèche (ou de l'échaudage ou d'une épizootie). En zone tempérée, plus une espèce ou une variété sera précoce, plus elle « esquivera » la sécheresse estivale. Par opposition à l'évitement qui joue sur l'espace, l'esquive joue sur le temps.

Évapotranspiration maximale (ETM)
Évapotranspiration d'un couvert végétal particulier (blé, tournesol, etc.), à un stade phénologique donné, en l'absence de toute contrainte hydrique. L'ETM dépend de l'ET0. À l'échelle journalière (ou décadaire), c'est une fraction de l'ET0 d'autant plus importante que le taux de couverture du sol est élevé. À l'échelle annuelle, le positionnement de la phénologie* de la culture joue un rôle important.

Évapotranspiration potentielle (ET0)
Évapotranspiration de référence correspondant à un gazon ras bien alimenté en eau et aujourd'hui estimée de façon standard par les services météorologiques au moyen de la formule de Penman-Monteith.

Évapotranspiration réelle (ETR)
Évapotranspiration d'un couvert végétal particulier (blé, tournesol, etc.) pour un stade phénologique quelconque et pour toutes conditions hydriques. L'ETR est une fraction de l'ETM égale à 1 tant que le couvert est en situation hydrique confortable et inférieure dès lors que le manque d'eau dans la zone racinaire contraint le végétal à refermer partiellement les stomates des feuilles.

Événement extrême
Événement, instantané ou non, au cours duquel une variable le quantifiant sort d'un intervalle relatif à sa distribution statistique : par exemple, inférieure au quantile* à 1 % ou supérieure au quantile* à 99 %. ii). Dans CLIMATOR, les distributions statistiques climatiques concernent le passé récent* et l'une des stations* étudiées. Selon cette définition, une température considérée comme extrême sur le passé récent* pourrait ne plus être extrême relativement à la distribution des températures dans le futur proche ou lointain (cas de l'été 2003, par exemple).

Évitement
Manière d'éviter de souffrir de la sécheresse en augmentant les possibilités d'entrée d'eau (fort appareil racinaire) ou en diminuant les possibilités de sortie (moindre feuillage, faible densité de plantation, taille, défoliation naturelle en situation extrême). Par opposition à l'esquive qui joue sur le temps, l'évitement joue sur l'espace à travers la morphologie.

FAISA
Variable de sortie* des modèles de culture* indiquant si la culture est parvenue à l'issue du cycle cultural* à la maturité de récolte (Oui : FAISA = 1 ; Non : FAISA = 0). Dans CLIMATOR, cette variable permet notamment d'observer si l'accroissement de la disponibilité thermique* permet la réalisation de cultures jusque-là irréalisables (par exemple, la vigne dans le nord de la France).

Faisabilité
Proportion du nombre d'années (exprimé le plus souvent sur 10) à laquelle une culture parvient à maturité physiologique en raison de conditions climatiques *ad hoc*, disponibilité thermique* notamment. Pour une espèce donnée, elle varie en fonction de la variété, de la date de semis et des conditions climatiques (dépendant à la fois du lieu et de l'année). L'augmentation des températures liée au changement climatique* conduit, en tendance générale, à une augmentation de la faisabilité des cultures.

Fertilisation carbonée
Accroissement de la fixation de carbone (donc d'élaboration de biomasse) par les plantes, sous l'effet de l'augmentation de la concentration en dioxyde de carbone (CO_2) dans l'atmosphère. La fertilisation carbonée, levier favorable à l'accroissement des rendements, est l'un des effets positifs du changement climatique sur les systèmes cultivés.

FLO
Numéro du jour de l'année de la floraison d'une culture (par exemple, blé, tournesol, vigne). C'est l'une des variables de sortie* des modèles de culture* utilisés dans CLIMATOR. Elle permet de décrire les caractéristiques phénologiques de la plante.

Futur lointain (FL)
Période de 30 années, de 2070 à 2099, considérée comme l'horizon temporel lointain qui nous indique ce qui se passerait si nous ne mettions en place aucune mesure d'adaptation au changement climatique*. Les données climatiques produites pour cette période sont toutes issues de simulations, enchaînant modèles de circulation générale (ARPÈGE et autres modèles du GIEC) et méthodes de régionalisation*. Comme pour toutes les périodes, les résultats concernant le FL sont produits sous la forme de statistiques (moyenne, médiane, écart-type*, déciles) indiquant la variabilité* interannuelle intrapériode et permettant de juger de la significativité des impacts* du changement climatique*. Des « années moyennes » pour la période ont également été calculées pour représenter des dynamiques annuelles types (croissance*, irrigation, par exemple). Les résultats peuvent aussi être analysés sous la forme de projection, c'est-à-dire de différence avec la période de référence PR.

Futur proche (FP)
Période de 30 années, de 2020 à 2049, considérée comme l'horizon temporel proche où les impacts* du changement climatique* seront tangibles, le signal du changement devenant perceptible par rapport à la variabilité* interannuelle. Les données climatiques produites pour cette période sont toutes issues de simulations, enchaînant modèle ARPÈGE* et méthodes de régionalisation*. Les résultats des autres modèles du GIEC ne sont pas disponibles pour cette période. Comme pour toutes les périodes, les résultats concernant le FP sont produits sous la forme de statistiques (moyenne, médiane, écart-type*, déciles) indiquant la variabilité interannuelle intrapériode et permettant de juger de la significativité des impacts du changement climatique*. Des « années moyennes » pour la période ont également été calculées pour représenter des dynamiques annuelle types (croissance*, irrigation, par exemple). Les résultats peuvent aussi être analysés sous la forme de projection, c'est-à-dire de différence avec la période de référence PR.

Gaz à effet de serre (GES)
Les gaz à effet de serre sont les composants gazeux de l'atmosphère, naturels et anthropiques, qui absorbent et émettent des radiations à des longueurs d'ondes spécifiques dans le spectre du rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre, l'atmosphère et les nuages. Cette propriété cause l'effet de serre. La vapeur d'eau (H_2O), le dioxyde de carbone (CO_2), l'oxyde d'azote (N_2O), le méthane (CH_4), et l'ozone (O_3) sont les principaux gaz à effet de serre dans l'atmosphère de la terre.

Générateur stochastique de temps
Algorithme produisant des séries temporelles de variables climatiques statistiquement comparables à des séries réelles. Dans CLIMATOR, le générateur WACS-gen a été utilisé comme méthode de régionalisation*.

GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Évolution du Climat)
Organisation créée au sein de l'ONU, dont la mission est d'évaluer les informations nécessaires pour mieux comprendre les risques liés au changement climatique d'origine humaine, cerner plus précisément les conséquences possibles de ce changement et envisager d'éventuelles stratégies d'adaptation et d'atténuation. Ses évaluations sont principalement fondées sur les publications scientifiques et techniques dont la valeur scientifique est largement reconnue. Les travaux du GIEC sont disponibles sur : www.ipcc.ch

Humification
Processus de transformation de la matière organique en humus, sous l'influence de la microfaune et de la microflore du sol. L'humification succède à la décomposition des débris organiques et comprend l'élaboration de nouvelles molécules par voie microbienne et physicochimique. Ce processus est pris en compte dans CLIMATOR afin de calculer la matière organique apportée au sol par les résidus et les amendements.

Impact
Effet positif ou négatif qu'un changement a, ou pourrait avoir, sur un phénomène. Par exemple, les variations de rendement des cultures ou de minéralisation* des sols sont des impacts du changement climatique*.

Incertitude
Terme dont l'acception statistique renvoie aux imprécisions entachant tout processus de mesure ou de simulation. Elles peuvent le plus souvent être quantifiées au moyen de méthodes

statistiques fondées sur l'analyse des écarts entre répétitions ou des erreurs par rapport à une référence.

Indice foliaire
Rapport de la surface de feuilles d'un peuplement végétal à la surface de sol que celui-ci occupe. Elle est égale à 0 au semis (sol nu) et peut atteindre 5 ou 6 lorsque la surface foliaire atteint son maximum. L'indice foliaire conditionne l'ETR* d'une culture. Son évolution au cours du cycle cultural est fortement dépendante des conditions de température et d'alimentation hydrique des plantes.

Initialisation
Action ou procédure, préalable à l'utilisation d'un modèle*, destinée à établir ou estimer la valeur initiale de certaines variables. Dans CLIMATOR, une procédure d'initialisation a été appliquée afin d'estimer, par exemple, la teneur en matière organique des sols la première année des simulations*.

Itinéraire technique
Suite logique et ordonnée des opérations techniques (semis, fertilisation…) réalisées sur une culture au cours de son cycle pour atteindre un objectif de production. Le changement climatique* peut modifier, d'une part, la chronologie des interventions techniques en fonction de leur faisabilité, d'autre part, le potentiel de production recherché.

Jours disponibles
Nombre de jours où une intervention technique est réalisable pendant des phases précises de la culture ou l'interculture. Par exemple, une variation quantitative des pluies ou de leur répartition à l'automne avec le changement climatique* peut modifier le nombre de jours disponibles pour le travail du sol ou le semis.

Lixiviation
Phénomène d'entraînement des ions nitrate présents dans la solution du sol, par les eaux de drainage vers les couches les plus profondes du sol, voire vers les masses d'eau souterraines.

Maille (d'un modèle climatique)
Résolution horizontale d'un modèle climatique*, c'est-à-dire distance horizontale entre les points de calcul des valeurs climatiques.

Méthodes de régionalisation (QQ, TT, ANO)
Méthodes ayant pour but de ramener les résultats des modèles climatiques* de l'échelle planétaire à l'échelle des observations. Elles jouent le double rôle d'interpolation spatiale et de correction de certains biais. On distingue les méthodes de régionalisation statistiques, qui s'appuient sur les relations modèle-observations du climat présent, et les méthodes de régionalisation dynamiques qui utilisent les lois de la physique, supposées intemporelles, pour la partie interpolation. Voir aussi Quantile-Quantile*.

Minéralisation
Processus de décomposition de la matière organique (humus, débris organiques) en composés minéraux par les micro-organismes du sol, aboutissant, entre autres, à l'émission de dioxyde de carbone dans l'atmosphère et à la libération d'azote sous forme minérale (ions ammonium et nitrate) assimilable par les plantes dans le sol. Dans CLIMATOR, la minéralisation est prise en compte dans les calculs de bilan de matière organique et d'azote disponible pour les plantes.

Modèle climatique (ou simulateur de climat)
Le climat* est généralement calculé à partir des observations météorologiques disponibles. Pour le passé lointain et les futurs possibles, il faut avoir recours aux théories de la physique. Un simulateur de climat fonctionne comme un modèle de prévision météorologique, à la différence qu'on se désintéresse de la chronologie prévue pour ne retenir que la distribution statistique des variables. Pour simuler le climat, il faut représenter le globe et les interactions océan-atmosphère. Une fois la simulation globale établie, on peut utiliser des méthodes de régionalisation* pour les études d'impact*.

Modèle de culture (ou simulateur de culture)
Représentation mathématique et informatique de l'ensemble des mécanismes permettant l'absorption lumineuse et d'éléments minéraux, la production de biomasse et de grains par un couvert végétal, en interaction avec le sol et le climat.

Paramètres d'un modèle
Un modèle est un ensemble d'équations qui vise à reproduire les mécanismes d'un phénomène réel. Les paramètres d'un modèle sont des grandeurs qui interviennent dans les équations. Ils sont fixés pour un phénomène particulier, mais varient d'un cas à l'autre. Par exemple, la profondeur d'un sol* est un paramètre du modèle STICS.

Passé récent (PR)
Période de 30 années, de 1970 à 1999, considérée comme référence pour juger les impacts* du changement climatique*. C'est sur cette période que sont disponibles les données mesurées des sites*, permettant la régionalisation des résultats climatiques de grande échelle produits par les modèles de circulation générale et, en particulier, par ARPÈGE. Pour mettre en cohérence cette série avec les séries climatiques* futures (FP et FL), les diverses méthodes de régionalisation* lui sont appliquées de sorte que le PR de la méthode TT est sensiblement différent du PR produit par la méthode QQ, toutes deux différentes des données mesurées correspondant à la méthode des Anomalies. Comme pour toutes les périodes, les résultats concernant le PR sont produits sous la forme de statistiques (moyenne, médiane, écart-type*, déciles) sur la période indiquant la variabilité* interannuelle intrapériode et permettant de juger de la significativité des impacts du changement climatique. Des « années moyennes » pour la période ont également été calculées pour représenter des dynamiques annuelles types (croissance, irrigation, par exemple).

PERCOL
Variable de sortie* correspondant à la restitution d'eau au milieu* : PERCOL = Drainage + Ruissellement – Irrigation. Dans CLIMATOR, elle contribue à l'étude de l'incidence de l'agriculture sur la ressource en eau.

Phénologie
Étude de l'apparition d'événements périodiques (annuels le plus souvent) dans le monde vivant, déterminée par les variations saisonnières du climat ; étude des événements périodiques, par exemple la levée, la floraison, la feuillaison, la fructification, le remplissage du grain…

Photosynthèse
Processus biochimique permettant aux plantes de fixer le CO_2 atmosphérique grâce à l'énergie lumineuse et aboutissant à l'élaboration de biomasse.

Probabilité conditionnelle
Une probabilité est dite conditionnelle lorsque l'événement concerné ne peut se produire que si un événement complémentaire s'est déjà réalisé. La probabilité d'occurrence du second événement est donc conditionnée par celle du premier.

Projection-Prévision
Les projections sont fondées sur des hypothèses relatives au fonctionnement du système étudié. On y décrit les états futurs du système, sur la base de ces hypothèses. Les prévisions sont des projections dans lesquelles on aurait attribué des degrés de vraisemblance aux états alors atteints. Par exemple, modéliser le climat en France en 2020 constitue une projection, alors qu'attribuer un degré de vraisemblance à cette réalisation constitue une prévision.

Qualité des produits
Ensemble des caractéristiques d'un produit récolté, liées soit à son intérêt organoleptique soit à son intérêt dans un processus de transformation. Habituellement déterminante pour la valorisation économique, la qualité des produits est donc complémentaire du rendement dans l'évaluation d'une production. Elle résulte de processus écophysiologiques sensibles au climat* ou microclimat. Couplés à des variables climatiques ou à des variables de sorties* des modèles, des indicateurs de qualité adaptés à chaque production permettent de quantifier l'impact prévisible du changement climatique*.

Qualité des résidus et des amendements
Composition chimique et biochimique (nutriments, cellulose, hémicellulose, lignine, etc.) qui détermine leur efficacité agronomique. Parfois, la qualité est définie seulement par le rapport C/N. Dans ce cas, une bonne qualité est généralement associée à un C/N faible. Elle est utilisée dans CLIMATOR pour estimer la vitesse de minéralisation* et le taux d'humification* de ces substrats.

Quantile(s)
Famille de descripteurs d'un échantillon. Le « quantile à x % » d'un échantillon est une valeur qui indique que x % des éléments de cet échantillon sont inférieurs à cette valeur. Le quantile à 50 % correspond à la médiane.

QQ ou Quantile-Quantile (méthode de régionalisation)
C'est l'une des trois méthodes de régionalisation* du climat mises en œuvre dans CLIMATOR. Elle consiste en la correction des variables simulées par un modèle climatique par une fonction de correction, qui ramène les quantiles des données simulées par le modèle pour le temps présent vers les quantiles observés sur la même période, pour chaque variable, saison et point de mesure. Il s'agit d'une méthode de régionalisation dynamique.

Quotient photothermique
Rapport, calculé sur une période donnée, entre le rayonnement et la température. Calculé lors de périodes clés pour l'élaboration du rendement des céréales à paille (fin de l'élaboration du nombre de grains, remplissage des grains), il représente la croissance possible rapportée à l'unité de temps de la plante (à savoir, la somme de température) : lorsqu'il est particulièrement élevé, cela indique généralement des conditions climatiques favorables à de bons rendements. Il est utilisé dans CLIMATOR pour évaluer les effets combinés de ces deux variables d'entrée* sur la croissance végétale.

Rang (d'une variable)
Fourchette des valeurs que peut prendre une variable donnée. On parle de rang quand on veut présenter la gamme des valeurs que la variable peut adopter. Exemple dans CLIMATOR : « Les pluies sont comprises entre 800 et 1 000 mm par an ».

REC
Date de récolte des cultures prédite par les modèles agronomiques. Pour les cultures à grain, cette date est postérieure à la maturité physiologique pour permettre la dessiccation. Pour la vigne, la date de récolte dépend de la teneur en sucre de la baie de raisin, tandis que pour les cultures fourragères les dates de coupe dépendent de la quantité et de la qualité attendues du fourrage. Même s'il existe des différences entre les modèles pour les phases finales de maturation du produit agricole, l'estimation de REC est principalement reliée à une somme de degrés-jours. Pour des raisons techniques (nécessité de semer la culture suivante ou gestion de l'alimentation du bétail), la date de récolte peut être imposée.

Réchauffement d'origine radiative
Partie du réchauffement provoqué par un bilan moyen radiatif positif. Le bilan radiatif est composé du rayonnement infrarouge et global (entrant/sortant l'atmosphère et sol). Effet pris en compte par certains modèles.

Région (zone)
Entités spatiales constituées par regroupement de régions administratives françaises, afin de disposer d'un nombre réduit de périmètres ayant chacun une cohérence climatique, géographique et agricole. Dans CLIMATOR, sept régions ont été constituées, incluant chacune un à trois sites* (stations) climatiques :
Centre-Nord : Nord-Pas-de-Calais / Picardie / Champagne-Ardenne / Île-de-France / Haute-Normandie / Centre
Ouest : Basse-Normandie / Bretagne / Pays de la Loire
Nord-Est : Alsace / Lorraine / Franche-Comté / Bourgogne
Centre-Est : Rhône-Alpes / Auvergne / Limousin
Sud-Est : Provence-Alpes-Côte d'Azur / Languedoc-Roussillon
Sud-Ouest : Midi-Pyrénées / Aquitaine / Poitou-Charentes
Antilles : Guadeloupe / Martinique
Ces régions sont utilisées dans CLIMATOR pour décliner géographiquement les impacts* du changement climatique* sur les systèmes cultivés.

Rendement
Production agricole obtenue pour une surface cultivée donnée. Il peut concerner une partie de la plante (en général, le grain) ou la plante entière. Dans CLIMATOR, le rendement est systématiquement une variable de sortie* des modèles de culture*. Sauf mention contraire, il est exprimé en tonnes de matière sèche par hectare, pour une humidité de 0 %. Les pertes (passages d'engins, effets bordures, pertes à la récolte) subies en parcelles agricoles ne sont pas simulées dans CLIMATOR, ce qui apparente les rendements de CLIMATOR aux rendements « placettes » des expérimentations. Si la maturité physiologique n'est pas atteinte à la date butoir de récolte autorisée par les modèles, le rendement est considéré comme nul.

Réanalyse (de variables climatiques)
Méthodes d'analyse, statistiques par exemple, sur des séries climatiques déjà issues de simulation, ou application de modèles statistiques sur des observations. Dans CLIMATOR, la réanalyse a permis, par exemple, sur la base des sorties de modèles climatiques globaux, de procéder à une désagrégation en vue d'obtenir des projections climatiques sur les sites d'étude.

Réserve utile (RU)
Pour un sol, capacité de stockage d'eau extractible par les racines des plantes. Elle est déterminée principalement par le volume exploré par les racines, la densité et la nature des constituants du sol. Pour une profondeur d'enracinement fixée, paramètre caractéristique d'un sol et quasi invariable. Dans CLIMATOR, la RU est considérée comme une propriété intrinsèque et constante de chaque sol. Les résultats de simulations du bilan hydrique* y sont très sensibles.

Restitution en eau au milieu
Quantité d'eau, provenant des précipitations, non consommée par le couvert végétal ou les milieux naturels. Dans les conditions naturelles (culture pluviale), elle est la somme du drainage (eau percolant en dessous de la couche de sol exploitée par les racines) et du ruissellement de surface. À l'échelle du bassin versant, les hydrologues lui donnent souvent le nom de « pluie efficace », terme ambigu puisqu'on peut le confondre avec la « pluie efficace » des agronomes (pluie – ruissellement). Dans des conditions artificielles (comme en culture irriguée), la restitution au milieu doit inclure les doses d'irrigation, comptées négativement, dès lors que cette eau est prélevée au milieu.

Rotation culturale
Désigne la succession des différentes cultures qui sont implantées sur une parcelle donnée. Cette succession est donc définie à la fois par les espèces présentes, mais aussi par leur ordre d'apparition dans le temps.

RU
Voir Réserve utile*.

SAFRAN
Réanalyse horaire et journalière, produite par Météo-France, incorporant des séries climatiques de stations d'observations et présentée sur une grille régulière de 8 km de résolution horizontale (maille*), pour la période 1958-2008. Sept variables atmosphériques sont disponibles : température à 2 m, humidité spécifique à 2 m, précipitations liquides, précipitations solides, rayonnement global incident, rayonnement infrarouge, vitesse du vent à 10 m. Cette base de données observées est utilisée dans CLIMATOR pour la méthode de régionalisation par types de temps*.

Scénarios d'émission (A1B, A2, B1)
Les simulations du climat sur le XIXe siècle (et au-delà) nécessitent des scénarios d'émissions anthropiques de gaz à effet de serre, qui correspondent à différentes trajectoires vraisemblables de développement socio-économique mondial. Le scénario A1B est intermédiaire dans la gamme des scénarios imaginés (A2 plus pessimiste et B1 plus optimiste). Il correspond à une économie mondiale utilisant à la fois des ressources énergétiques fossiles et non fossiles. Il se traduit par une concentration en CO_2 de 500 ppm en 2050 et de 700 ppm en 2100, et par un réchauffement moyen mondial de 2,8 °C en 2100 (gamme de vraisemblance : 1,7 à 4,4 °C).

Série climatique
Série de données couvrant une période temporelle suffisamment longue pour définir le climat* (30 ans en règle générale).

Significativité
Une différence entre deux résultats est jugée significative si cette différence n'est pas due à une simple variabilité* aléatoire. Dans le cadre de CLIMATOR, c'est la variabilité interannuelle du climat qui est la source majeure de variabilité aléatoire. Pour établir la significativité de l'effet du changement climatique* vu par les modèles de culture, on compare les moyennes sur des périodes de 30 ans. Des tests statistiques donnent la probabilité pour que la différence des moyennes entre périodes puisse être attribuée au hasard. Lorsque cette probabilité est inférieure à un certain seuil fixé, on juge la différence significative. Le seuil le plus fréquemment utilisé est de 5 %, mais dans CLIMATOR on utilise aussi les seuils de 1 et 10 %.

Simulateur (ou modèle)
Outil informatique utilisé par le chercheur pour étudier le fonctionnement d'un système complexe sans réaliser d'expérience réelle. Une simulation est la réalisation numérique issue des simulateurs. Dans CLIMATOR, les impacts du changement climatique* sur les systèmes cultivés sont calculés en croisant des simulateurs de climat et des simulateurs de culture.

Site (station)
Point du territoire national caractérisé par une station climatique, localisée en milieu agricole, sur une surface respectant les conditions standard des mesures météorologiques de l'OMM. Dans CLIMATOR, treize sites ont été choisis (douze en Métropole, un en Guadeloupe), selon les critères suivants : disponibilité des variables climatiques requises au pas de temps journalier (températures minimale et maximale, pluviométrie, rayonnement, vent et humidité de l'air) sur une série d'au moins 30 ans (pour pouvoir réaliser les régionalisations des prédictions climatiques) et bonne représentativité du climat alentour. Douze stations sont localisées en plaine, seule la station de Clermont-Ferrand, située à Theix, est à 800 m d'altitude. L'ensemble de ces sites fournit une image de la variété des climats* français dans leurs diverses composantes : septentrionale, méditerranéenne, continentale et océanique. Douze des treize stations sont issues du réseau AGROCLIM de l'INRA, la station de Saint- Étienne provient du réseau Météo-France. Chacune des six zones CLIMATOR (sept avec la Guadeloupe) est représentée par une à trois stations climatiques. Tous les sols et systèmes de cultures* sont étudiés dans chacun des sites.

SRES
Voir Scénario d'émission*.

Stades phénologiques
Voir Phénologie*.

Stress hydrique
On parle de stress hydrique lorsque les ressources en eau du sol ne permettent plus au couvert végétal de satisfaire l'évapotranspiration maximale*, réduisant ainsi la croissance* des plantes. Le stress hydrique est le pendant du confort hydrique*. Dans CLIMATOR, le stress hydrique est intégré dans les simulations en relation avec l'ensemble des termes du bilan hydrique*.

Système de culture
Ensemble, pour une parcelle culturale donnée, des successions de cultures (et intercultures) qui s'y déroulent avec leurs itinéraires techniques* associés. Le changement climatique* peut, par exemple, modifier la chronologie d'occupation d'une parcelle par chaque culture et donc modifier la faisabilité* d'une succession de culture, tant pour des raisons de date que de nombre de jours disponibles* pour réaliser une intervention technique.

Tolérance
Résistance à la sécheresse. Par opposition à l'esquive* et à l'évitement* qui sont deux manières de ne pas subir la sécheresse, la tolérance est une caractéristique qui permet à une plante de vivre et produire (et pas seulement de survivre) dans des conditions de restriction de ses échanges hydriques et même de son état hydrique. Le sorgho est plus tolérant que le maïs parce qu'il accepte des restrictions à la floraison que n'accepte pas le maïs (ne pas confondre avec sa meilleure exploitation de l'eau du sol qui correspond à de l'évitement).

TT (méthode des types de temps)
Voir Méthodes de régionalisation* et page 21 du Livre Vert pour plus de précisions.

Variabilité
Notion utilisée pour décrire l'ampleur des variations d'un phénomène autour de sa moyenne.

Variable d'entrée (d'un modèle)
Un modèle est un ensemble d'équations qui vise à reproduire les mécanismes d'un phénomène réel. Il utilise pour cela (entre autres) des variables d'entrée dont la valeur n'est pas calculée par le modèle, mais fixée par l'utilisateur ou issue d'un autre modèle en amont. Dans CLIMATOR, les variables climatiques, issues des simulateurs de climat*, sont des variables d'entrée des modèles de culture*.

Variable de sortie (d'un modèle)
Un modèle est un ensemble d'équations qui vise à reproduire les mécanismes d'un phénomène réel. Traduit en instructions informatiques, un modèle transforme des variables d'entrée* en un ensemble de variables de sorties. Par exemple, STICS modélise des systèmes de culture* ; informatiquement, il transforme des variables climatiques en variables agronomiques, telles que rendement, évapotranspiration*, etc.

Vernalisation
La vernalisation correspond aux besoins quantitatifs en froid, nécessaires aux apex végétatifs pour leur passage au développement* reproducteur. Ces besoins sont comptés en nombre de jours ayant des températures moyennes inférieures à un seuil dépendant de l'espèce. Le changement climatique* va modifier le nombre de jours disponibles* en phase hivernale pour réaliser cette vernalisation.

Zone
Voir Région*.

Les femmes et les hommes de CLIMATOR

Nadine BRISSON est directrice de recherche à l'INRA. Agronome, spécialiste de la modélisation des cultures, de leur fonctionnement écophysiologique et de l'agroclimatologie, elle a dirigé le service agroclimatique de l'INRA de 2005 à 2009. Elle est à l'origine du modèle générique de culture STICS et, à ce titre, en interaction avec les sphères de la recherche agronomique et des services R&D des organismes professionnels. Depuis huit ans, elle est fortement impliquée dans les études d'impact du changement climatique sur l'agriculture, en particulier pour les grandes cultures et la vigne. Elle a élaboré, puis coordonné le projet CLIMATOR.

Nadine BRISSON
AGROCLIM – INRA Avignon
AGROPARC, 84914 AVIGNON cedex 9
E-mail : nadine.brisson@avignon.inra.fr
Tél : 04 32 72 23 83

Denis ALLARD est directeur de recherche à l'INRA. Il dirige depuis cinq ans l'unité Biostatistique et Processus Spatiaux, à Avignon. Il poursuit des recherches en statistiques spatiales et spatio-temporelles, appliquées à l'environnement et au climat. Il est membre et trésorier du groupe Environnement de la Société Française de Statistique. Dans le projet CLIMATOR, il était responsable de l'analyse statistique en lien avec la problématique de l'incertitude. En lien avec le projet CLIMATOR, il a également développé une méthode stochastique de désagrégation des variables climatiques.

Denis ALLARD
Biostatistique et Processus Spatiaux
INRA, Site Agroparc, 84914 AVIGNON cedex 9
Tél : 04 32 72 21 71
http://denis.biosp.org

Vincent BADEAU est Ingénieur de recherche au sein de l'équipe Phytoécologie de l'UMR INRA-UHP 1137 Écologie & Écophysiologie Forestières. Il est spécialiste de la caractérisation des milieux naturels, de la gestion des bases de données environnementales et de la modélisation statistiques des aires climatiques des espèces forestières. Il est, en outre, responsable scientifique de l'Arboretum d'Amance (INRA-Nancy) et responsable du Réseau des Arboretums Publics. Dans CLIMATOR, il a contribué aux réflexions sur la géoclimatologie, à partir notamment de son modèle de niche ÉVOLFOR.

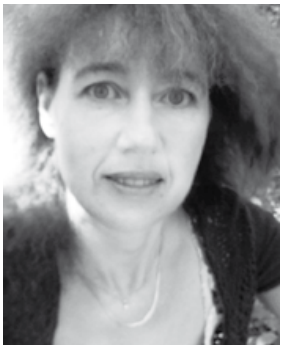
Vincent BADEAU
Centre INRA de Nancy
54280 CHAMPENOUX
E-mail : badeau@nancy.inra.fr

Marie-Odile BANCAL est enseignant-chercheur à AgroParisTech. Elle enseigne l'écophysiologie des cultures sous contraintes biotiques et abiotiques. Intégré à l'UMR Environnement et Grandes Cultures de Grignon, son travail de recherche est centré sur l'analyse et la modélisation des impacts des maladies aériennes foliaires sur l'élaboration du rendement et de la qualité du blé. Depuis 2003, elle participe à la modification du modèle de culture CERES, pour pouvoir prendre en compte l'effet de la rouille brune sur le fonctionnement du blé. Couplé à un modèle épidémiologique simplifié, ce modèle est utilisé dans le projet CLIMATOR pour prédire les évolutions des impacts de la rouille sur la productivité du blé avec le changement climatique.

Marie-Odile BANCAL – UMR AgroParisTech
INRA Environnement et Grandes Cultures
78850 THIVERVAL GRIGNON
E-mail : mobancal@grignon.inra.fr
Tél : 01 30 81 55 55

Alexandre BOSC est Ingénieur de recherche en Écophysiologie forestière au sein de l'Unité de Recherche ÉPHYSE de l'INRA-Bordeaux. Il assure la mise en œuvre de projets de recherche liés au suivi et à la caractérisation des flux d'H_2O et de CO_2 des écosystèmes forestiers dans le cadre des changements globaux. Depuis dix ans, il est le principal développeur du modèle GRAECO. Dans le projet CLIMATOR, il a conduit les simulations relatives à la réponse des couverts forestiers de pins.

Alexandre BOSC – INRA, UR1263 ÉPHYSE
69, route d'Arcachon
33612 CESTAS
E-mail : alexandre.bosc@pierroton.inra.fr
Tél : 05 57 12 28 49



Nathalie BREDA est directrice de recherches au sein de l'équipe Phytoécologie de l'UMR INRA-UHP 1137 Écologie & Écophysiologie forestières. Elle est à la fois forestière et écophysiologiste, spécialisée dans les dysfonctionnements forestiers. Elle coordonne le programme Dryade et anime le thème Vulnérabilité du Réseau Mixte Technologique AFORCE « Forêt face au changement climatique ». Elle est impliquée dans l'analyse de dépérissements forestiers d'origine climatique et biotique, en couplant des approches rétrospectives (dendrochronologiques) et mécanistes. Elle anime également un axe de recherche sur le rôle de la gestion du carbone dans les effets différés des contraintes de type sécheresse et défoliation. Dans CLIMATOR, elle a été responsable du volet « Forêt » et, en particulier, des simulations du modèle BILJOU.

Nathalie BREDA – Centre INRA de Nancy
54280 CHAMPENOUX
E-mail : breda@nancy.inra.fr

Damien CHAMBERT est informaticien, assistant ingénieur à l'INRA. Il travaille, depuis décembre 2007, à l'unité AGROCLIM de l'INRA, dans le cadre des études sur le climat et le changement climatique.
Il est responsable des sites web de l'unité, de la réalisation des simulations de la Veille Agroclimatique (http://www.avignon.inra.fr/veille_agroclimatique) et participe aux systèmes de vigilance pour l'acquisition de données météorologiques.
Dans le projet CLIMATOR, il a travaillé sur la mise en place de la structure d'accueil informatique du cours en ligne.

Damien Chambert – Unité AGROCLIM
INRA, domaine St Paul, Site Agroparc
84914 AVIGNON cedex 9
E-mail : damien.chambert@avignon.inra.fr

David DELANNOY est informaticien, ingénieur d'étude à l'INRA. Il travaille dans l'unité AGROCLIM d'Avignon et est en charge de la création et de l'administration des bases de données agroclimatiques (climat et données liées au climat).
Dans le projet CLIMATOR, il a créé et administré la base qui regroupe l'ensemble des données simulées dans le cadre du projet et a créé l'interface web qui permet son utilisation.

David DELANNOY – Unité AGROCLIM
INRA, domaine St Paul, Site Agroparc
84914 AVIGNON cedex 9
E-mail : david.delannoy@avignon.inra.fr
Tél : 04 32 72 24 13

Michel DEQUE est responsable à Météo-France du développement, de la diffusion et de la maintenance du modèle d'atmosphère ARPÈGE-Climat, issu du modèle de prévision de Météo-France et du Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme. Ce modèle peut servir pour les simulations globales couplées à un modèle d'océan de type GIEC, ou pour des simulations régionales grâce à sa maille variable (de 60 km sur la France à 300 km sur le Pacifique sud).
Dans le projet CLIMATOR, il a produit trois scénarios (A1B, A2 et B1) pour le XXIe siècle et développé une technique pour calibrer les sorties de modèle sur les séries quotidiennes des douze stations pour les sept variables météorologiques.

Michel DEQUE – Météo-France CNRM/GMGEC/EAC
42, avenue Coriolis
31057 TOULOUSE cedex 1
E-mail : deque@meteo.fr
Tél : 05 61 07 93 82

Jean-Louis Durand est chargé de recherches à l'INRA, dans l'unité de recherches pluri-disciplinaires sur la prairie et les plantes fourragères. Il y conduit des travaux sur l'utilisation de l'eau par les peuplements végétaux, et les relations avec l'alimentation minérale. Ses travaux actuels portent sur les diverses sources de variation de la profondeur d'extraction de l'eau par les plantes sur un sol donné : variabilité génétique, demande atmosphérique, architecture du système racinaire. Dans le projet CLIMATOR, il était responsable de la coordination des travaux sur la prairie.

Jean-Louis Durand
INRA URP3F
Domaine du Chêne- B.P.6 - 86600 LUSIGNAN
E-mail : jean-louis.durand@lusignan.inra.fr
Tél : 05 49 55 60 94

Cédric FLECHER est doctorant en Sciences Agronomiques de Montpellier SUPAGRO. Ses travaux se sont inscrits au sein d'une coopération entre l'INRA d'Avignon et le LSCE (Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement). Ingénieur Agronome spécialisé en biostatistiques et modélisation, il a conçu le générateur de temps WACS-Gen sous la direction de Nadine BRISSON et les co-encadrements de Denis ALLARD et Philippe NAVEAU. Il a proposé des méthodes statistiques innovantes nécessaires à la mise au point de WACS-Gen et à la désagrégation spatiale des variables climatiques aboutissant à une méthodologie d'évaluation des sensibilités des cultures aux variabilités climatiques et leurs évolutions.

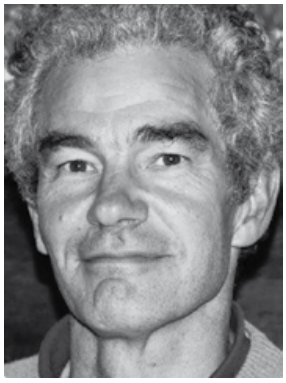
Cédric FLECHER
E-mail : cedricflecher@hotmail.fr ; cflecher@avignon.inra.fr
Tél : 06 78 34 42 78

Nathalie GAGNAIRE est ingénieur d'études à l'INRA (Institut National de le Recherche Agronomique) au sein de l'Unité Mixte de Recherche INRA-AgroParisTech Environnement et Grandes Cultures (EGC). Elle participe au développement de modèles biophysiques d'évaluation d'impacts environnementaux des grandes cultures (Ceres-EGC) et à la réalisation de bilan environnemental par l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) dans le cadre des agroénergies (production biocarburant, chaleur). Dans le projet CLIMATOR, elle a contribué à la simulation de cultures et de variables microclimatiques (durée humectation) en fonction de différents scénarios climatiques.

Nathalie GAGNAIRE - INRA
UMR INRA/AgroParisTech Environnement et Grandes Cultures
78850 THIVERVAL-GRIGNON
http://www.versailles-grignon.inra.fr/egc
E-mail : nathalie.gagnaire@grignon.inra.fr
Tel : 01 30 81 55 51

Lydie GUILIONI est enseignant-chercheur à l'école agronomique SUPAGRO de Montpellier. Elle enseigne dans les disciplines écophysiologique et agrométéorologique.
Elle est spécialiste de la culture du tournesol et a participé à l'élaboration de plusieurs modèles de fonctionnement des cultures. Dans le projet CLIMATOR, elle était responsable des simulations de la culture du tournesol, en particulier avec le modèle SUNFLO.

Lydie GUILIONI
Montpellier SupAgro
UMR 759 LEPSE
2, place Viala, 34060 MONTPELLIER cedex 1
E-mail : lydie.guilioni@supagro.inra.fr
Tél : 04 99 61 29 57



Philippe GATE a effectué une grande partie de sa carrière à l'ITCF, devenu ARVALIS-Institut du Végétal en 2002. Tout au long de son parcours, il s'est attaché à mieux comprendre le fonctionnement des céréales dans leur milieu. On lui doit les premiers modèles de prévision sur les stades de développement, puis sur le rendement et la qualité des grains. Son intérêt pour la télédétection a permis la réalisation de Farmstar, outil d'aide à la décision basé sur cette discipline. Il a également réalisé des travaux de valorisation de l'écophysiologie dans le domaine des biotechnologies. Depuis quelques années, Philippe GATE s'intéresse au fonctionnement de la plante malade et carencée, afin de proposer des itinéraires techniques plus sobres et plus efficients. Plus récemment, son activité a porté sur les impacts du changement climatique. Il est, depuis 2009, directeur scientifique d'ARVALIS.

Philippe GATE
Arvalis – Institut du Végétal
3, rue Joseph et Marie Hackin, 75116 PARIS
E-mail : pgate@arvalisinstitutduvegetal.fr
Tél : 01 44 31 10 00

David GOUACHE est ingénieur agronome de l'Institut National Agronomique Paris-Grignon. Il a intégré en 2006 l'équipe Écophysiologie d'ARVALIS-Institut du Végétal, pour prendre en charge des études sur le fonctionnement des céréales dans leur milieu. Il a également développé une activité spécifique sur la compréhension et la prévision des épidémies qui affectent les céréales. C'est ainsi qu'il a mis au point un modèle et une offre de service sur la prévision de la septoriose du blé tendre. Il contribue à de nombreux projets nationaux sur cette maladie. Depuis 2009, il a pris en charge l'animation de l'équipe Écophysiologie d'ARVALIS, qui travaille aussi sur le pilotage des cultures par la télédétection et sur la gestion de l'eau. Il est impliqué, depuis 2007, sur différents projets ayant trait aux impacts du changement climatique sur les cultures.

David GOUACHE
ARVALIS – Institut du Végétal
Station de La Minière
78280 GUYANCOURT
Tél : 01 30 12 96 22

Anne-Isabelle GRAUX est doctorante au sein de l'unité de Recherche sur l'Écosystème Prairial (UREP) de l'INRA de Clermont-Ferrand. Elle modélise les impacts du changement climatique sur les écosystèmes prairiaux et les adaptations possibles pour les systèmes d'élevage. Elle a amélioré la simulation du modèle des impacts climatiques et des adaptations, en développant notamment les sous-modèles animaux et végétaux. Le projet CLIMATOR a servi de base aux projections stationnelles d'impacts prévues dans le cadre du projet de thèse. Elle s'intéresse également aux adaptations possibles pour les systèmes d'élevage, *via* l'utilisation d'un algorithme d'optimisation des pratiques agricoles sous forçage climatique.

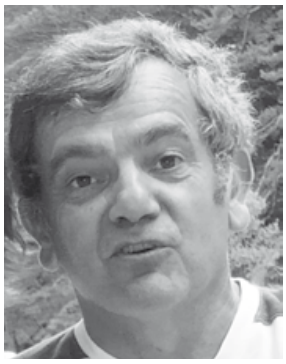
Anne-Isabelle GRAUX
UR874 Unité de recherche sur l'écosystème prairial
INRA, 234, avenue du Brézet, 63100 CLERMONT-FERRAND
E-mail : anne-isabelle.graux@clermont.inra.fr
Tél : 04 73 62 45 72

Frédéric HUARD est ingénieur de recherche à l'INRA dans l'unité Agroclim d'Avignon. Il est spécialiste des analyses climatiques et agroclimatiques et, depuis quelques années, s'intéresse plus particulièrement aux scénarios de changement climatique en collaboration avec Météo-France.
Dans le projet CLIMATOR, il a été responsable des composantes techniques du projet avec une attention particulière pour la mise à disposition des différents scénarios climatiques et pour le cours en ligne.

Frédéric Huard
Unité AGROCLIM
INRA, domaine Saint-Paul, Site Agroparc
84914 AVIGNON cedex 9
E-mail : huard@avignon.inra.fr
Tél : 04 32 72 24 08

Laurent HUBER, sur la base de travaux sur le rôle du microclimat des grandes cultures dans les maladies fongiques aériennes et en tant que chercheur de l'UMR INRA-AgroParisTech Environnement et Grandes Cultures, il a co-animé le groupe « maladies » au sein du projet CLIMATOR. Au sein de cette UMR, il a animé pendant 5 ans l'équipe Biosphère-Atmosphère et notamment développé des recherches sur la dispersion des bioaérosols et plus généralement sur les mécanismes biophysiques impliqués dans l'épidémiologie des mycoses foliaires. Actuellement, Laurent Huber a la responsabilité scientifique de l'ACTA, tête de réseau des Instituts techniques agricoles, dont les orientations principales incluent la santé des plantes et le développement de la protection intégrée.

Laurent HUBER
ACTA-Réseau des Instituts des filières animales et végétales
149 rue de Bercy
75595 PARIS cedex 12
E-mail : laurent.huber@acta.asso.fr
Tel : 01 40 04 49 05



Bernard ITIER est directeur de recherches à l'UMR « Environnement et Grandes Cultures » de Grignon. Il travaille sur la relation de l'agriculture à l'eau : dépendance de la ressource-incidence sur la ressource. Il a été chef des départements de recherche « Bioclimatologie » de 1992 à 1997 et « Environnement et Agronomie » de 1998 à 2001, puis président du Centre INRA de Montpellier de 2003 à 2007. Il a conduit l'expertise collective « Agriculture et sécheresse » mandatée par le MAP en 2005-2006. Dans le projet CLIMATOR, il avait en charge la thématique « Eau ».

Bernard ITIER
UMR1091 Environnement et Grandes Cultures
INRA-EGC, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
E-mail : bernard.itier@grignon.inra.fr

Romain LARDY est ingénieur de recherche au sein de l'unité de Recherche sur l'Écosystème Prairial (UREP) de l'INRA de Clermont-Ferrand. Il travaille au développement et à la validation des cycles du C et de l'N d'un modèle biogéochimique de simulation des écosystèmes prairiaux, PASIM, dans le cadre du projet européen NitroEurope. Dans le projet CLIMATOR, il est responsable de l'ingénierie de données pour PASIM. Il a également participé au développement du modèle.

Romain LARDY
UR874 Unité de recherche sur l'écosystème prairial
INRA, 234, avenue du Brézet
63100 CLERMONT-FERRAND
E-mail : romain.lardy@clermont.inra.fr
Tél : 04 73 62 49 07

Eric LEBON est ingénieur de recherche à l'INRA. Il est écophysiologiste, spécialiste de l'étude de la réponse de la vigne aux contraintes environnementales (déficit hydrique du sol et de l'air). Il a participé au développement de différents modèles biophysiques adaptés à l'étude du fonctionnement des couverts viticoles. Parmi ceux-ci, le modèle de bilan hydrique de la vigne (BHV), utilisé dans le cadre du projet CLIMATOR, permet d'étudier l'impact du changement climatique sur l'évolution des conditions d'alimentation hydrique du vignoble.

Eric LEBON
INRA Montpellier SupAgro
UMR 759 LEPSE
2, place Pierre Viala
34060 MONTPELLIER
E-mail : eric.lebon@supagro.inra.fr
Tél : 04 99 61 29 54

Frédéric LEVRAULT est chargé de programme « Recherche et innovation » à la Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes. Il y assure le relais entre la recherche agronomique (INRA, CIRAD, CEMAGREF…) et le milieu agricole, qu'il s'agisse des agriculteurs eux-mêmes ou de leurs conseillers agricoles. Il a animé pendant cinq ans un groupe de conseillers irrigation, en s'appuyant sur une version de STICS adaptée aux problématiques de l'irrigation du maïs. Actuellement, il est impliqué dans les questions de changement climatique, d'énergies renouvelables et de suivi-évaluation des activités agricoles. Dans le projet CLIMATOR, il était responsable du Livre Vert.

Frédéric LEVRAULT
Chambre régionale d'agriculture de Poitou-Charentes
Agropôle, B.P. 50002
86550 MIGNALOUX-BEAUVOIR
E-mail : frederic.levrault@poitou-charentes.chambagri.fr
Tél : 05 49 44 74 50

Manuel MARTIN est ingénieur de recherche dans l'Unité de Service INFOSOL, à l'INRA d'Orléans. Ses travaux portent notamment sur l'étude et la modélisation de l'évolution des stocks de carbone organique dans les sols. Il applique pour cela des modèles de dynamique du carbone organique des sols, tels que RothC ou CENTURY. C'est principalement à ce titre qu'il est intervenu dans le projet CLIMATOR. Il a également participé au choix et au paramétrage des sols qui auront servi de support aux différentes simulations réalisées dans le cadre du projet.

Manuel MARTIN
INRA – INFOSOL Centre de recherche d'Orléans
2163, avenue de la Pomme de Pin, 40001 ARDON
45075 ORLEANS cedex 2
E-mail : manuel.martin@orleans.inra.fr
Tél : 02 38 41 48 21

Albert OLIOSO travaille à Avignon au sein de l'UMR Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydrosystèmes (EMMAH). Ses recherches portent sur la modélisation des échanges d'énergie et de masse (H_2O, CO_2) entre la surface et l'atmosphère et l'utilisation de la télédétection pour cartographier ces échanges, en particulier l'évapotranspiration. Ces travaux ont pour objectif actuel l'analyse des impacts des changements globaux sur les relations entre les ressources hydriques et la production agricole à l'échelle des aquifères ou de petites régions de production. Dans le projet CLIMATOR, il a plus particulièrement analysé l'impact de la teneur atmosphérique en CO_2 sur l'évapotranspiration de référence.

Albert OLIOSO
AGROCLIM – INRA Avignon
AGROPARC
84914 AVIGNON cedex 9
E-mail : albert.olioso@avignon.inra.fr

Christian PAGÉ est ingénieur de recherche depuis deux ans au Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique (CERFACS) à Toulouse. Il est spécialisé dans le domaine des méthodes de régionalisation des scénarios climatiques. Son travail l'amène à mettre à disposition des données de scénarios climatiques pour des projets de recherche et des études d'impacts climatiques, accompagné d'une expertise sur ces données. Il agit donc comme lien entre la communauté des scientifiques du climat et des impacts et est amené à interagir avec plusieurs groupes qui travaillent sur des aspects différents des impacts du climat. Dans le projet CLIMATOR, il était responsable de la mise à disposition de scénarios climatiques régionalisés, ainsi que de la mise à disposition de la méthodologie de régionalisation.

Christian PAGÉ – Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique (CERFACS)
Global Change and Modelling Team
42, avenue Coriolis, 31057 TOULOUSE cedex 1
E-mail : christian.page@cerfacs.fr
Tél : 05 61 19 30 11

Philippe PIERI est chargé de recherches à l'INRA de Bordeaux, dans l'UMR Écophysiologie et Génomique Fonctionnelle de la Vigne (EGFV) de l'Institut des Sciences de la Vigne et du Vin (ISVV) de Bordeaux. Il a mené diverses études sur l'écophysiologie de la vigne (interception du rayonnement, bilan d'énergie, bilan hydrique, photosynthèse, développement, microclimat et épidémiologie…) et produit des modèles décrivant ces aspects en fonction des caractéristiques du climat, du sol, du système de conduite et du cépage. Actuellement, il est impliqué dans les problématiques de changement climatique et de relations entre le microclimat des baies de raisin et leur maturation. Dans le projet CLIMATOR, il était responsable des simulations concernant la vigne et l'épidémiologie de Botrytis sur raisin.

Philippe PIERI – UMR EGFV – ISVV – INRA
210, chemin de Leysotte, CS-50008, 33882 VILLENAVE D'ORNON
E-mail : philippe.pieri@bordeaux.inra.fr

Dominique RIPOCHE est ingénieur d'étude à l'INRA. Elle travaille depuis 1994 sur le modèle de simulation de culture STICS, utilisé seul ou en couplage avec d'autres modèles et dont l'originalité provient de ses possibilités à s'adapter à des espèces très variées. Elle a été affectée, en janvier 2006, dans l'unité de service AGROCLIM d'Avignon, où elle a la responsabilité du développement et de la maintenance informatique du modèle de culture ainsi que de ses interfaces et des utilitaires spécifiques au modèle. Dans le projet CLIMATOR, elle a réalisé les simulations du modèle STICS.

Dominique RIPOCHE
Unité AGROCLIM
INRA, domaine Saint-Paul, Site Agroparc, 84914 AVIGNON cedex 9
E-mail : dominique.ripoche@avignon.inra.fr
Tél : 04 32 72 23 84

Romain ROCHE est ingénieur de recherche à l'Unité INRA Environnement et Grandes Cultures de Grignon. Il travaille sur la modélisation du fonctionnement des cultures, et plus particulièrement à l'amélioration ou l'introduction de nouveaux modules de contraintes biotiques (par exemple, maladies) ou abiotiques (par exemple, stress ozone). Dans CLIMATOR, outre une participation importante à la thématique Santé des plantes (calcul des durées d'humectation et couplage du modèle CERES avec un module de rouille brune), il a pris en charge la synthèse des aspects Rendements et a développé, à ce titre, des approches spécifiques de prise en compte des effets du CO_2 selon les modèles.

Romain ROCHE – UMR1091 Environnement et Grandes Cultures
INRA-EGC, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
E-mail : romain.roche@grignon.inra.fr
Tél : 01 30 81 55 06

Jean-Roger ESTRADE est Professeur d'Agronomie à AgroParisTech. Son domaine de compétence concerne l'effet des systèmes de culture sur les sols (composantes physique, chimique et surtout biologique), programme de recherches qu'il développe au sein de l'Unité Mixte INRA-AgroParisTech agronomie Grignon. Il a récemment co-encadré une thèse sur l'évaluation *ex ante* de l'insertion du pois d'hiver dans des exploitations de grande culture, qui l'a amené à utiliser le modèle OTELO, utilisé pour l'évaluation de l'effet du changement climatique sur les jours disponibles et les calendriers de travail en grande culture.

Jean-Roger ESTRADE – AgroParisTech
Centre de Grignon, BP 01, 78850 THIVERVAL-GRIGNON
E-mail : jean.roger_estrade@grignon.inra.fr
Tél : 01 30 81 54 12

Jorge SIERRA est chercheur à l'Unité Agrosystèmes Tropicaux de l'INRA en Guadeloupe et enseignant à l'Université Antilles-Guyane. Il travaille sur le fonctionnement des sols tropicaux, notamment sur les cycles du carbone et de l'azote, et sur le recyclage des déchets organiques. Il a animé plusieurs projets sur la gestion des sols sous cultures tropicales (agroforesterie, banane, igname, maïs), en collaboration avec des partenaires de la Caraïbe et de la profession agricole locale. Actuellement, il s'intéresse à l'impact du changement climatique sur les sols et les cultures tropicales. Dans CLIMATOR, il était co-animateur des groupes Matière Organique et Azote.

Jorge SIERRA – UR1231 Agrosystèmes Tropicaux
INRA Antilles-Guyane,, 97170 PETIT-BOURG
E-mail : jorge.sierra@antilles.inra.fr
Tél : 05 90 25 59 49

Laurent TERRAY est directeur de recherche au Centre Européen de Recherche et Formation Avancées en Calcul Scientifique (CERFACS) à Toulouse. Il est le directeur de l'unité de recherche associée CERFACS/CNRS Sciences de l'Univers au CERFACS (URA1875). Il travaille depuis vingt ans sur les questions de variabilité du changement climatique. Il a contribué au dernier rapport (2007) du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. Il s'intéresse depuis plusieurs années aux questions de régionalisation climatique et aux méthodes de descente en échelle appliquées aux scénarios climatiques. Dans le projet CLIMATOR, il était responsable de la thématique CLIMAT.

Laurent TERRAY – CERFACS
42, avenue Coriolis, 31057 TOULOUSE cedex 01
E-mail : terray@cerfacs.fr
Tél : 05 61 19 31 31

Imprimé par Maugein imprimeurs

Maugein imprimeurs est adhérent Imprim'Vert
et utilise des encres à base végétale.

Ce document est imprimé sur papier 100% PEFC,
provenant de la gestion durable de la forêt.

PEFC
PEFC/10-31-1508
PROVENANT DE
LA GESTION DURABLE
DE LA FORÊT

Dépot légal : juin 2010
Imprimé en France

Quels impacts le changement climatique est-il susceptible d'avoir au cours du XXIe siècle sur l'agriculture française et tout particulièrement sur nos systèmes cultivés ? Pour répondre à cette question, 17 équipes de 8 organismes de recherche et de développement agricole, coordonnées par l'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA), ont collaboré quatre années durant au projet de recherche CLIMATOR (2007 – 2010) financé par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme « Vulnérabilité, Milieux et Climat » (VMC).

Pour mener à bien cette étude, ces scientifiques ont croisé modèles climatiques et modèles agronomiques et forestiers afin de simuler le fonctionnement des peuplements cultivés sous l'effet d'un changement du climat. Cette approche, indispensable pour prospecter l'avenir, associe des disciplines aussi variées que la climatologie, l'agronomie, l'écophysiologie, la bioclimatologie, la science du sol et les statistiques.

Les impacts agricoles et forestiers futurs du changement climatique ont été analysés aussi bien en termes de rendement, que de qualité des produits agricoles, de calendriers culturaux, de besoins en eau, ou encore de santé des plantes, sans oublier les éventuels déplacements des cultures. Treize sites représentatifs de la diversité climatique et agricole française ont été étudiés en métropole et outre-mer, tandis que les systèmes sélectionnés représentent une large gamme de notre diversité agricole : cultures annuelles en monoculture ou en rotation (blé, tournesol, maïs, sorgho, colza…), cultures pérennes (vigne, prairie, forêt, banane, canne à sucre), niveaux d'intrants contrastés (sec ou irrigué, conventionnel ou biologique).

Ce Livre Vert, édité par l'Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Énergie (ADEME) regroupe l'essentiel des résultats du projet de recherche CLIMATOR. À mi-chemin entre une publication scientifique et un ouvrage grand public, ce livre est destiné à tous ceux qui, sans être des spécialistes du changement climatique, sont concernés par l'avenir de l'agriculture française : responsables agricoles et forestiers, ingénieurs et techniciens agricoles et forestiers, agronomes, agents des services de l'état ou de collectivités, enseignants et élèves en agronomie ou en agriculture, représentants d'associations.

Les résultats présentés sont organisés en quatre parties (La méthodologie, Les thèmes, Les cultures, Les régions) permettant ainsi à chacun une lecture à la carte en fonction de ses centres d'intérêt prioritaires.

RÉF. ADEME : 6872

Livre Vert édité par

ADEME
Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
MINISTÈRE DE L'ÉCOLOGIE, DE L'ÉNERGIE, DU DÉVELOPPEMENT DURABLE ET DE LA MER
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE

Les partenaires du projet CLIMATOR

INRA
CNRS
AgroParisTech
Chambre d'agriculture Poitou-Charentes
CERFELS
ARVALIS Institut du végétal
Montpellier SupAgro
METEO FRANCE Toujours un temps d'avance

ISBN : 978-2-35838-128-4