

Nadine Brisson et Frédéric Levrault

# LIVRE VERT

DU PROJET

# CLIMATOR

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

2007-2010

ANR  INRA



Adresse des coordinateurs :

**Nadine Brisson<sup>†</sup>**

**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<sup>†</sup>, 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 BOSSENEC ; 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'œuvre 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 2012.

ISBN 978-2-35838-278-6

**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<sup>†</sup> et Frédéric Levraut

# Hommage

Cette deuxième édition du Livre Vert de CLIMATOR est dédiée à la mémoire de Nadine Cohen-Brisson<sup>†</sup> qui nous a quittés le 18 octobre 2011.

Sa riche et brillante carrière scientifique rend difficile l'exercice du résumé. Retenons cependant parmi tant d'autres, deux réalisations majeures qui témoignent de la qualité et de la portée de ses travaux de recherche agronomique.

Pendant plus de 10 ans, elle a initié puis animé une communauté scientifique autour du simulateur de cultures STICS dont elle a été une des créatrices. Au fil des ans, s'est ainsi constitué un groupe de chercheurs et de techniciens dont les travaux nombreux doivent beaucoup au talent de Nadine, tant du point de vue des orientations méthodologiques et thématiques qu'elle a promues, que du point de vue de l'ambiance cordiale de travail qu'elle a toujours su maintenir. Ce faisant, Nadine a joué un rôle majeur dans le développement de la modélisation des cultures en France, y compris hors sphère scientifique puisque certaines des modélisations qu'elle a initiées ont été directement utilisées par le développement agricole.

Plus récemment, à partir de 2007 précisément, Nadine a imaginé puis coordonné le projet CLIMATOR, dont les avancées scientifiques ont été, et sont encore, largement reconnues. Deux ans après la fin du projet, CLIMATOR reste une source majeure d'information sur les impacts agricoles du changement climatique en France et sur les voies d'adaptation. Son souci de la vulgarisation, précieux chez une scientifique de cette envergure, s'est traduit par la réalisation du présent Livre Vert, dont elle a heureusement pu observer le succès. Un succès qui se confirme et qui nous amène à rééditer l'ouvrage, épuisé dans sa première édition. Tout au long des quatre ans du projet CLIMATOR, Nadine a animé avec l'efficacité et la gentillesse que nous lui connaissons, un collectif nombreux aux sensibilités variées. On ne peut que souhaiter à tout scientifique participant à un projet collectif de recherche, de connaître un jour une coordinatrice ou un coordinateur de l'envergure et de la qualité de Nadine.

Au nom de tous les membres du projet CLIMATOR, Nadine je te remercie pour cette belle aventure collective que tu nous as permis de partager.

**Frédéric Levrault**

# Préface

Michel Vaulin

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 ( $\Delta T$  et  $\Delta$  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<sub>2</sub> 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

|   |     |
|---|-----|
| <b>Hommage</b>  | 2   |
| <b>Préface</b>  | 3   |
| <b>Le mot de l'ADEME</b>  | 5   |
| <b>Le projet CLIMATOR</b>   | 9   |
| <b>A   <i>La méthodologie</i></b>   | 17  |
| <b>A   1 Climat</b><br>L'évolution du climat en France au travers<br>de quelques indicateurs agroclimatiques              | 19  |
| <b>A   2 Agriculture</b><br>Quelle agriculture dans Climator ?  | 33  |
| <b>A   3 Modèles</b><br>Description des modèles agronomiques et forestiers et mise en œuvre                               | 41  |
| <b>A   4 Incertitudes et variabilités</b><br>Analyse des sources d'incertitudes et de variabilités                        | 51  |
| <b>B   <i>Les thèmes</i></b>  | 63  |
| <b>B   1 Timing</b><br>Anticipation des stades phénologiques et raccourcissement des phases                               | 65  |
| <b>B   2 Eau</b><br>Confort hydrique et restitution d'eau aux nappes  | 79  |
| <b>B   3 Irrigation</b><br>Évolution des besoins en irrigation des cultures   | 93  |
| <b>B   4 Matière organique</b><br>Stockage/déstockage de carbone dans les sols  | 105 |
| <b>B   5 Santé</b><br>Évolution de quelques pathosystèmes sur le blé et la vigne  | 113 |
| <b>B   6 Rendement</b><br>Complexité des évolutions du rendement des cultures   | 127 |
| <b>C   <i>Les cultures</i></b>  | 139 |
| <b>C   1 Atouts et vulnérabilités</b><br>Atouts et vulnérabilités des productions agricoles face au changement climatique | 141 |
| <b>C   2 Blé</b><br>Changement climatique et culture du blé : l'essentiel des impacts                                     | 155 |
| <b>C   3 Maïs sorgho</b><br>Changement climatique et cultures de maïs et de sorgho grains :<br>l'essentiel des impacts    | 169 |



|   |   |     |
|---|---|-----|
| <b>C   4 Prairie</b>                              | Changement climatique et prairie : l'essentiel des impacts                            | 181 |
| <b>C   5 Colza</b>                                | Changement climatique et culture du colza : l'essentiel des impacts                   | 191 |
| <b>C   6 Tournesol</b>                            | Éléments sur le changement climatique et la culture du tournesol                      | 201 |
| <b>C   7 Vigne</b>                                | Changement climatique et culture de la vigne : l'essentiel des impacts                | 213 |
| <b>C   8 Forêt</b>                                | Éléments sur le changement climatique et la forêt métropolitaine                      | 225 |
| <b>C   9 Agriculture biologique</b>               | Analyse d'un exemple d'agriculture biologique en grandes cultures                     | 237 |
| <b>D   <i>Les régions</i></b>                     |   | 245 |
| <b>D   1 Géoclimat</b>                            | Potential de déplacement géographique des cultures et des essences forestières        | 247 |
| <b>D   2 Centre-Nord</b>                          | Changement climatique en zone Centre-Nord : aperçu des impacts agricoles              | 255 |
| <b>D   3 Ouest</b>                                | Changement climatique en zone Ouest : aperçu des impacts agricoles et forestiers      | 263 |
| <b>D   4 Nord-Est</b>                             | Changement climatique en zone Nord-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers   | 271 |
| <b>D   5 Centre-Est</b>                           | Changement climatique en zone Centre-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers | 279 |
| <b>D   6 Sud-Ouest</b>                            | Changement climatique en zone Sud-Ouest : aperçu des impacts agricoles et forestiers  | 287 |
| <b>D   7 Sud-Est</b>                              | Changement climatique en zone Sud-Est : aperçu des impacts agricoles et forestiers    | 297 |
| <b>D   8 Antilles</b>                             | Changement climatique en zone Antilles : aperçu des impacts agricoles                 | 305 |
| <b>E   <i>Annexes</i></b>                         |   | 311 |
| <b>E   1 Glossaire</b>                            |   | 313 |
| <b>E   2 Les femmes et les hommes de CLIMATOR</b> |   | 325 |



# Le projet CLIMATOR

Nadine Brisson<sup>†</sup>

Le projet

## 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 climatologiques\* 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/](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, DIRE...);
- 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  |
|------------------------|--|---|
| <b>La méthodologie</b> | 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   |
| <b>Les thèmes</b>      | 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   |
| <b>Les cultures</b>    | Atouts et vulnérabilités   | Atouts et vulnérabilités des productions agricoles face au changement climatique  |
|                        | Blé<br>Maïs et Sorgho<br>Prairie<br>Colza<br>Tournesol<br>Vigne<br>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   |
|                        | Géoclimatologie  | Potentiel de déplacement géographique des cultures et des essences forestières  |
|                        | Centre-Nord<br>Nord-Est<br>Ouest<br>Centre-Est<br>Sud-Est<br>Sud-Ouest<br>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 :<br>Recherche<br>agronomique | AGROCLIM   | Nadine Brisson <sup>†</sup>   | Coordination scientifique / projet, modèles, maïs-sorgho, colza, agribus, timing         |
|                                    |  | Frédéric Huard  | Coordination technique, simulations climatiques / protocoles agriculture                 |
|                                    |  | David Delannoy  | Base de données, WEB CLIMATOR  |
|                                    |  | Dominique Ripoché   | Simulations STICS  |
|                                    |  | Damien Chambert   | Ingénierie des données et du cours en ligne  |
|                                    | EGC  | Cédric Flecher  | Générateur climatique  |
|                                    |  | Laurent Huber   | Co-animation « santé »   |
|                                    | URP3F  | Bernard Itier   | Animation « eau » / eau, atouts et vulnérabilités  |
|                                    |  | Romain Roche  | Simulations CERES / rendement, santé   |
|                                    | UREP   | Marie-Odile Bancal  | Simulations CERES-ROUILLE / blé, santé   |
|                                    |  | Nathalie Gagnaire   | Simulations humectation, ingénierie des données  |
|                                    | APC  | Jean-Louis Durand   | Co-animation « azote », simulations STICS / prairie                                      |
|                                    |  | Frédéric Bernard  | Simulations STICS / prairie  |
| INFOSOL                            | J.-F. Soussana                                   | Simulations PASIM   |  |
|                                    | Anne-Isabelle Graux                              | Simulations PASIM / prairie   |  |
| BIOSP                              | Romain Lardy                                     | Simulations PASIM, ingénierie des données / prairie                           |  |
|                                    | Jorge Sierra                                     | Co-animation « azote », simulations / Guadeloupe, matière organique, modèles  |  |
| EGFV                               | Manuel Martin                                    | Animation « matière organique », base de donnée sols, simulations CENTURY     |  |
|                                    | Denis Allard                                     | Données horaires, générateur climatique, analyses statistiques / incertitudes |  |
| EPHYSE                             | Philippe Pieri                                   | Simulations BHV, BOTRYTIS / vigne, santé                                      |  |
|                                    | Alexandre Bosc                                   | Simulations GRAECO / forêt  |  |
| EEF                                | Vincent Badeau                                   | Animation « géoclim », simulations EVOLFOR / géoclimatologie                  |  |
|                                    | Nathalie Bréda                                   | Simulations BILJOU / forêt  |  |
| EMMAH                              | Éric Lebon                                       | Simulations BHV / géoclimatologie   |  |
|                                    | Albert Olioso                                    | Calculs ETO   |  |
| Encadrement agricole               | ARVALIS  | Philippe Gate   | Animation « phénologie et calendriers » / timing, blé                                    |
|                                    |  | David Gouache   | Co-animation « santé », simulations PANORAMIX, septoriose / santé                        |
| Enseignement agronomique           | Chambre régionale d'agriculture Poitou-Charentes | Frédéric Levraut  | Responsable Livre Vert / irrigation / atouts et vulnérabilités / régions métropolitaines |
|                                    |  | SUPAGRO   | Lydie Guilioni   |
| Recherche climatologique           | AGROPARIS-TECH                                   | Jean Roger-Estrade  | Responsable du cours en ligne, simulations OTELO   |
|                                    |  | CERFACS - CNRS  | Laurent Terray   |
|                                    | Météo France CNRS                                | Christian Pagé  | Simulations climatique TT / climat   |
| 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.sisyph.jussieu.fr/~agnes/rexhyss/>

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