

Nadine Brisson et Frédéric Levrault

Synthèse

DU PROJET

CLIMAT
OR

Agence Nationale de la Recherche
ANR



INRA



Sommaire

Le projet Climator

A | *La méthodologie*

- A | 1 Climat
- A | 2 Agriculture
- A | 3 Modèles
- A | 4 Incertitudes et variabilités

B | *Les thèmes*

- B | 1 Timing
- B | 2 Eau
- B | 3 Irrigation
- B | 4 Matière organique
- B | 5 Santé
- B | 6 Rendement

C | *Les cultures*

- C | 1 Atouts et vulnérabilités
- C | 2 Blé
- C | 3 Maïs et sorgho
- C | 4 Prairie
- C | 5 Colza
- C | 6 Tournesol
- C | 7 Vigne
- C | 8 Forêt
- C | 9 Agriculture biologique

D | *Les régions*

- D | 1 Géoclimat
- D | 2 Centre-Nord
- D | 3 Ouest
- D | 4 Nord-Est
- D | 5 Centre-Est
- D | 6 Sud-Ouest
- D | 7 Sud-Est
- D | 8 Antilles

Le Projet

CLIMATOR est un projet de recherche pluridisciplinaire destiné à étudier les impacts potentiels du changement climatique sur les systèmes de culture français.

Le projet de recherche CLIMATOR a mobilisé dix-sept équipes de sept instituts et organismes, pendant trois ans (2007-2010), associant ainsi des disciplines variées – climatologie, agronomie, écophysiologie, bioclimatologie, science du sol – pour des objectifs divers : recherche, développement, enseignement.

L'objectif

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

L'organisation du travail

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

La méthode

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.

Les résultats produits sont le fruit du croisement de modèles climatologiques et de modèles agronomiques, déclinés sur deux périodes d'intérêt : le futur proche (2020-2049) et le futur lointain (2070-2099), en référence à une période de passé récent (1970-1999).

Les modèles climatologiques produisent les variables climatiques : ce sont les variables d'entrée de modèles agronomiques simulant le fonctionnement des cultures dans ces conditions.

CLIMATOR traduit des hypothèses climatiques en impacts chiffrés, mettant en lumière les effets induits sur l'agriculture et la forêt françaises.

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...).

Le projet CLIMATOR a été financé par l'ANR, dans le cadre du programme Vulnérabilité, Milieux et Climat (VMC), pour un montant de 620601 €.

L'organisation du projet

Les thèmes abordés représentent des sujets transversaux sur lesquels le changement climatique peut provoquer des modifications sensibles. Il s'agit de :

- l'anticipation des stades **phénologiques**, du raccourcissement des phases et de leurs conséquences,
 - l'évolution des conditions de **confort hydrique** des plantes et de la restitution en eau au milieu,
 - la santé des plantes, approchée par une étude probatoire pour quelques pathosystèmes,
- l'évolution du stockage de carbone dans les sols.

Plusieurs regards synthétiques sont portés sur les résultats :

- l'évolution attendue des rendements,
- les atouts et vulnérabilités par culture,
- la géoclimatologie ou l'opportunité de déplacement des cultures.

Phénologie

Étude de l'apparition d'événements périodiques, déterminée par les variations saisonnières du climat.

Confort hydrique

capacité du couvert végétal à fonctionner de façon potentielle, sans fermeture stomatique liée à un stress hydrique.

A

Méthodologie



1 | Le climat

Des projections climatiques locales ont été générées grâce à des simulations de l'évolution du climat de 1950 à 2100.

Le modèle ARPÈGE

Afin de disposer, au sein de CLIMATOR, de projections climatiques à échelle fine sur la France, des simulations de l'évolution du climat de 1950 à 2100 ont été réalisées 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.

Les méthodes de régionalisation

Nous avons donc développé une technique de désagrégation statistique basée sur les types de temps. Cette méthode permet de dériver, à partir de la circulation atmosphérique de grande échelle, un ensemble de variables 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, en suivant le **scénario d'émission A1B** pour le **xxi^e 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'objectif est d'extérioriser au mieux les impacts du changement climatique sur nos agro-écosystèmes.

Scénario d'émission A1B

Il prévoit, en 2100, une concentration en CO₂ de 700 ppm et un réchauffement moyen mondial de 2,8°C.

La méthodologie

Les résultats

L'ensemble de ces méthodologies de projection climatique 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.

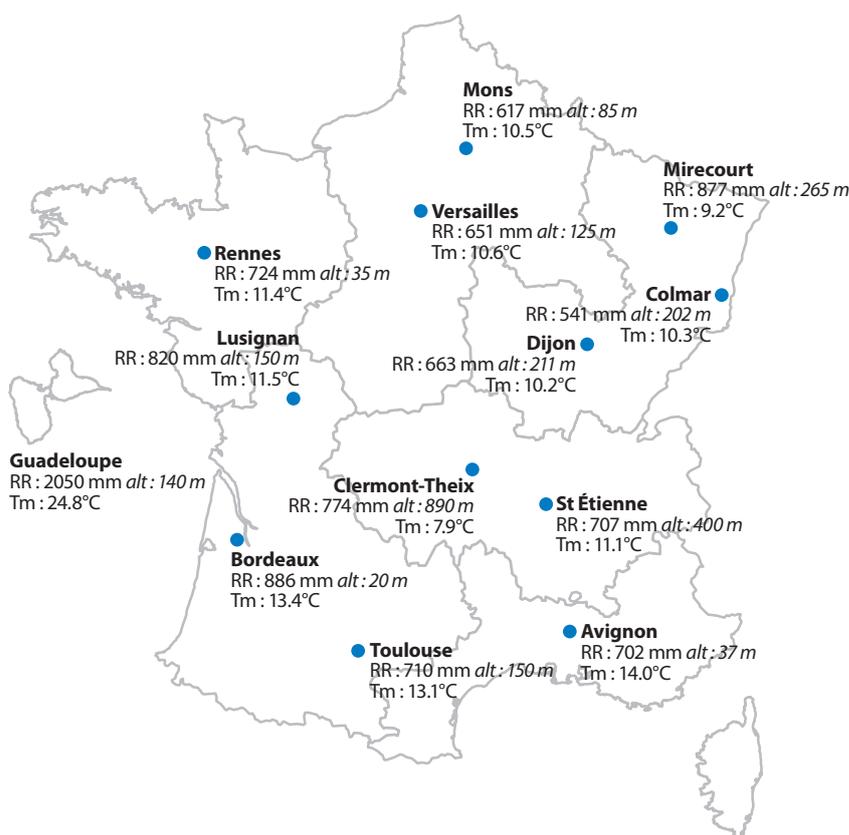


2 | L'agriculture

Des choix raisonnés ont permis de construire une représentation simplifiée de l'agriculture française.

Des choix concertés

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, c'est-à-dire 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.



Les sols, une double approche

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).

Des combinaisons multiples

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 chapitre *Incertitudes et Variabilités*).

3 | Les modèles

La diversité des systèmes analysés dans le projet CLIMATOR s'appuie sur de nombreux modèles de culture.

La prise en compte des différences...

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 CO₂ dans la croissance des plantes ou le **bilan hydrique** et organique du sol.



Bilan hydrique

somme algébrique des différents flux d'eau concernant la parcelle agricole

... mais une homogénéisation des paramètres

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 écophysiological, 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 au changement climatique.

Il ne peut pas y avoir de réponse univoque au changement climatique.

La méthodologie



4 | Les incertitudes et variabilités

Trois méthodes ont été retenues pour explorer et quantifier les incertitudes et les sources de variabilité.

La méthodologie

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 changement climatique se positionnent par rapport aux autres sources d'incertitudes et de variabilités.

Les incertitudes climatiques

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 futur proche. Pour le futur lointain, en revanche, l'effet dû au choix du scénario domine largement les effets dus à la méthode de régionalisation.



Scénarios SRES

Ensemble des scénarios d'émission (A1B, A2, B1) de gaz à effet de serre, selon le développement socio-économique mondial.

Les impacts du changement climatique

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 d'action

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 procédés 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.

Il n'est pas raisonnable de parler d'un impact généralisé sur l'ensemble du territoire et pour l'ensemble des cultures.

Conclusion

Trois méthodes de régionalisation appliquées au modèle climatique ARPÈGE ont permis d'établir une évolution potentielle du climat en France, à échelle locale, au cours du XXI^e siècle.

L'agriculture française a été caractérisée par un nombre limité mais représentatif de productions végétales, de sites d'étude, de sols et d'itinéraires techniques, sur lesquels on a appliqué les hypothèses de changement climatique afin d'en observer les impacts.

B

Les thèmes



1 | Timing

La modification des calendriers culturaux représente une réponse à l'augmentation des températures.

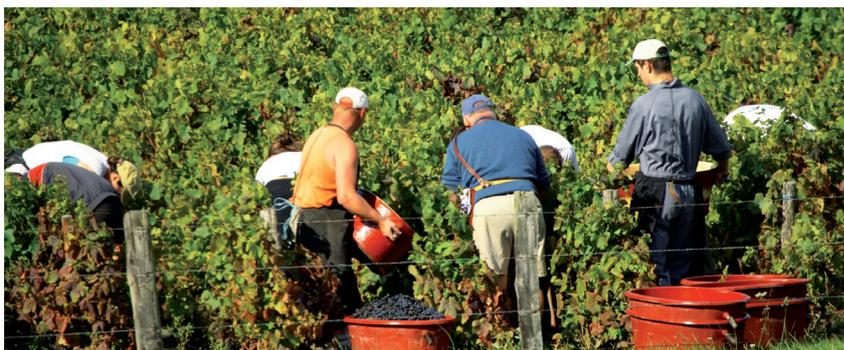
L'anticipation des stades phénologiques

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 disposition.

L'anticipation des stades est significative quelles que soient les espèces.

Les conséquences physiologiques

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 ils 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 il 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.



Les thèmes

2 | Eau

Le changement climatique va provoquer une baisse de pluviométrie (offre) couplée avec une augmentation de l'évapotranspiration de référence (demande climatique).

Ce phénomène sera tout particulièrement marqué dans l'Ouest, affectant des zones déjà structurellement fragiles (Sud-Ouest).

Les incidences d'un bilan hydrique de plus en plus déséquilibré

Ce déséquilibre accru entre l'offre et la demande, matérialisé par l'augmentation de l'indice $P-ET_o$, se fera sentir :

- d'une part, sur le confort hydrique des cultures pluviales : le rapport ETR/ETM (évapotranspiration réelle/évapotranspiration maximale) 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 chapitre *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'évapotranspiration maximale, résultant du raccourcissement des phases phénologiques.

 Futur ET_o

Évapotranspiration potentielle de référence

Quelle variabilité des résultats ?

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 chapitre *Régions*).



3 | Irrigation

Les besoins en irrigation sont liés aux modifications de bilan hydrique et à l'accélération des rythmes phénologiques.

L'évolution des besoins en irrigation

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 passé récent et le futur proche, 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.

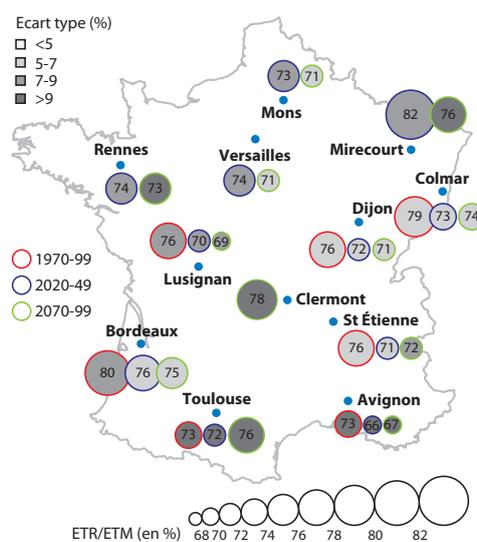
En matière d'irrigation de complément (exemple du sorgho), il faut s'attendre à devoir irriguer de l'ordre de 20 % en plus dans le futur proche par rapport au passé récent. Dans le futur lointain, des effets de raccourcissement du cycle pour les cultures de printemps engendrent une stabilisation, voire 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.

Les nouveaux besoins en irrigation

De nouveaux besoins vont apparaître 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.

Pour une bonne gestion de l'eau

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.



Évolution du rapport ETR/ETM de la vigne sur sol à faible réserve utile (73 mm)



4 | Matière organique

L'évolution du stock de matière organique (donc de carbone) dans les sols est en lien avec les conditions de température et d'humidité.

L'évolution selon le système de culture

Près de 60 % de l'impact du changement climatique sur la dynamique de la matière organique sont dus aux interactions système de culture x site x période x sol. Cela conforte l'idée que l'évolution de la matière organique 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 matière organique. 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 matière organique.



BB
monoculture de blé

TT
monoculture de tournesol

MI
maïs irrigué

Les thèmes

L'évolution selon le site

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 matière organique : les sols les plus riches en matière organique stockent moins et déstockent plus, en fonction du système de culture.

La variation de la matière organique

La dynamique de la matière organique est peu sensible aux variations climatiques annuelles ; elle reflète davantage les effets des composantes du système à moyen et long terme. La faible réactivité de la matière organique 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).



5 | Santé

La pression phytosanitaire sur les cultures est en lien avec les conditions d'humidité et de température.

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. La **durée d'humectation**, variable transversale à de nombreux pathosystèmes (bien au-delà des trois étudiés ici), diminue.



Durée d'humectation

Durée en heures de présence d'eau liquide sur les feuilles (pluie, rosée)

L'évolution de la rouille du blé

La variable « degrés-jours humectés », à priori plus pertinente pour les maladies ayant un optimum thermique élevé comme la rouille du blé, augmente légèrement.

L'évolution du Botrytis de la vigne

Pour la vigne, la pression du 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 du Botrytis serait très forte.

La pression des maladies fongiques devrait diminuer.

L'évolution de la septoriose du blé

Enfin, pour la septoriose, il existe 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.

On retiendra que, pour chaque pathosystème, on a pu identifier des variables synthétiques, plus simples à calculer, qui semblent en bonne relation avec les évolutions projetées. Toutefois, ces relations sont pour l'instant spécifiques de chaque pathosystème.



6 | Rendement

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 CO₂, le bilan hydrique climatique (P-ET₀) et la température.

Le CO₂

Il 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 futur lointain.

FutUR C3

les espèces en C3 réagissent plus nettement à l'augmentation du CO₂

Le bilan hydrique

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 CO₂.

La température

Son augmentation 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.

L'augmentation de la température génère des effets souvent contradictoires.

Les conséquences

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 incertitudes

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 celle des systèmes de culture sont 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.

Conclusion

Les interactions entre le changement climatique et la croissance des espèces végétales ont été définies au travers de six enjeux agricoles et environnementaux : la modification des calendriers culturaux (pour répondre à l'augmentation des températures), l'évolution de l'alimentation en eau (baisse de pluviométrie et augmentation de l'évapotranspiration), l'avenir de l'irrigation (besoins augmentés), l'évolution du stock de matière organique, la pression phytosanitaire (en diminution en raison d'une moindre humidité), les tendances de développement des rendements (largement influencés par l'ensemble des facteurs climatiques).

C

Les cultures



1 | Atouts et vulnérabilités

Le changement climatique, tel qu'il est prévu par les modèles climatiques, ne provoquera ni dégradation ni amélioration générale des possibilités de culture.

Un ensemble de facteurs, dont dépendent les possibilités de culture, sera probablement modifié par les évolutions du climat.

Les principales modifications favorables

- 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, verront le jour ;
- une accélération des rythmes phénologiques permettra une esquivance 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 conduira à davantage de jours disponibles pour les travaux d'automne ;
 - on notera une réduction des accidents liés au gel automnal pour les cultures d'hiver ;
 - les rendements, dans les cas où les stress hydriques sont évités ou compensés par une croissance à des périodes hors stress, augmenteront : cultures d'hiver, prairie et cultures pérennes.

L'augmentation prévue des températures offrira des opportunités de nouvelles cultures.

Les principales modifications défavorables

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

2 | Blé

Si les effets positifs du climat futur sur la culture du blé compensent les impacts néfastes, il faut cependant rester prudent.

Les impacts positifs du changement climatique

Pour le blé, culture à cycle long moyennement sensible au stress hydrique estival, l'augmentation de la 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 chapitre *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.

L'amélioration sanitaire potentielle permet d'envisager la culture du blé plus systématiquement sur la façade atlantique.

Les impacts négatifs du changement climatique

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 CO₂, l'augmentation de la variabilité interannuelle invite plutôt à la prudence et à la recherche de solutions alternatives.



Les solutions

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.

Les cultures



3 | Maïs et sorgho

La relocalisation géographique et édaphique des cultures de maïs et de sorgho semble nécessaire pour faire face aux impacts négatifs du changement climatique.

Les impacts négatifs du changement climatique

La monoculture de maïs grain irriguée sera très défavorisée par le changement climatique, surtout dans les zones actuelles de production. En effet, le positionnement estival du cycle de culture, sans changement variétal, engendra des raccourcissements de la période de remplissage des grains et provoquera des baisses de rendement de l'ordre de 1 à 1,5 t.ha⁻¹ pour, respectivement, le futur proche et le futur lointain.

D'autre part, l'augmentation du déficit hydrique climatique se traduira par un supplément d'irrigation de l'ordre de 40 mm en moyenne dans le futur proche. Dans le futur lointain, 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, sera moins marquée, avec même des perspectives d'augmentation dans les zones septentrionales.

Pour les deux cultures, des opportunités apparaîtront dans les zones actuellement en limite Nord de l'aire du maïs, mais aussi dans de nouvelles zones du Nord-Est ou d'altitude.



Les impacts positifs du changement climatique

Une avancée des semis de 1 jour tous les 4 ans, en moyenne, sera possible, mais elle 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.

Les solutions

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, présente 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.



4 | Prairie

Les effets du changement climatique sur la production fourragère devraient s'équilibrer.

Des impacts modérés

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, ainsi qu'une faible baisse tendancielle de la teneur en azote de la production pour le ray-grass.

L'étude prévoit globalement une augmentation de l'ordre de 5 à 20% de la production fourragère d'ici à 2100.

Les solutions

Les systèmes d'élevage basés sur l'exploitation de l'herbe dépendent directement des effets du climat qui déterminent à la fois la croissance de l'herbe et la constitution des stocks fourragers. Ils devraient nécessairement adapter non seulement la conduite des prairies (fertilisation notamment) mais aussi l'exploitation, à travers une organisation différente de l'activité : celle-ci impliquera probablement davantage de reports et une plus grande diversification de la production fourragère (autres espèces herbacées, légumineuses, sorgho...), afin d'assurer un rendement suffisant 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 la gestion de la reproduction du troupeau.

5 | Colza

Si l'amointrissement des risques de gel dans le futur favorise la culture du colza, les problèmes de sécheresse la fragiliseront.

Les impacts positifs du changement climatique

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.

Les cultures

Les impacts négatifs du changement climatique

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 et, 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, 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 CO₂ atmosphérique. Pour esquiver quelque 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.

Les solutions

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.



6 | Tournesol

Le tournesol est une culture qui réagit plutôt bien au changement climatique.



L'équilibre des impacts

Son extension au Nord, dans le cadre de rotations céréalières, sera possible dès le futur proche. 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 CO₂ de l'atmosphère compensant les effets négatifs du stress hydrique.

Les solutions

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. chapitre *Irrigation*).

Le choix de variétés progressivement à cycle long et l'avancée des semis pourront ponctuellement offrir des perspectives d'augmentation des rendements, mais pas de façon systématique.

7 | Vigne

Bien que les sites viticoles s'étendent grâce au changement climatique, les conditions de la culture de la vigne deviendront plus difficiles.

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.

Des impacts très importants et négatifs sont prévisibles sur les conditions de maturation du raisin et donc sur sa qualité.

L'avancée phénologique

Entre le passé récent et la fin du ^{xxi} 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

sa qualité, surtout en termes d'arômes et de polyphénols. En effet, pour les sites de tradition viticole, des élévations de température de l'ordre de 5 °C au moins pendant la période de maturation sont à prévoir pour la fin du siècle.

Le confort hydrique

Le fonctionnement hydrique des vignobles devrait évoluer globalement vers une baisse très modérée du confort hydrique, mais une diminution très nette de la restitution d'eau au milieu. Des « relations diagnostiques » établies avec l'indicateur climatique de déficit hydrique ($P-ET_0$) permettent de facilement évaluer l'impact du changement climatique sur la vigne. Les sites et les séries climatiques simulées, où $P-ET_0$ évolue le plus, engendrent les plus forts impacts sur le fonctionnement hydrique de la vigne.

Les solutions

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 des 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.

8 | Forêt

Les forêts, feuillues et conifères, pourraient être impactées par le changement climatique dès le futur proche et de manière très significative au futur lointain, quel que soit le site en France.

Les impacts négatifs du changement climatique

Les sécheresses édaphiques et atmosphériques sont les contraintes principales. Contrairement à tous les autres systèmes culturels, 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 suffisante, contrairement aux cultures annuelles. La température joue négativement *via* une augmentation de la sécheresse atmosphérique.

Les impacts positifs du changement climatique

Le seul effet bénéfique est celui de l'augmentation de la teneur en CO₂ atmosphérique qui améliore la photosynthèse, mais sans compenser les effets négatifs de l'augmentation des contraintes hydriques.

Les incertitudes

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.

9 | Agriculture biologique

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.

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 futur lointain, la variabilité inter-annuelle augmente, ce qui fragilisera l'agriculture biologique dans les conditions contraignantes de sol et de climat.

Conclusion

L'impact du changement climatique est quantifié et qualifié sur différentes espèces représentatives de l'agriculture française, pour le futur proche et le futur lointain. Ces cultures réagissent différemment aux variations climatologiques, leur croissance et leur développement pouvant être améliorés ou dégradés. Des possibilités d'adaptation des pratiques culturales sont proposées pour répondre à ces effets.

D

Les régions



1 | Géoclimat

Grandes cultures et systèmes à rotation longue ne réagiront pas de la même façon au changement climatique.

L'impact sur les grandes cultures

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 devraient être probablement relocalisées en fonction des ressources en eau disponibles.

L'impact sur la vigne et les forêts

La distribution des systèmes à rotation longue (vigne, forêts) pourrait être, par contre, profondément modifiée. L'adaptation de l'encépagement et des pratiques culturales devraient permettre l'adaptation progressive de la plupart des vignobles traditionnels au prix d'une évolution majeure des caractéristiques des vins produits. Parallèlement, de nouvelles régions situées au-delà de la limite de culture actuelle de la vigne pourraient devenir favorables à la production de vins de qualité.

L'expansion continue des espaces forestiers pourrait s'arrêter, voire diminuer.

Les forêts resteront probablement des forêts, car elles sont en 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 cependant d'être modifiée, dans un sens pour l'instant assez difficile à évaluer. Citons quelques possibilités d'évolution :

- des forêts plus mélangées afin de tamponner les effets potentiels des changements climatiques et des événements extrêmes ;
- des forêts à vocations plus spécifiques (développement des taillis à courte révolution pour le bois énergie) ;
- le développement de 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.

Les régions

Les principales conséquences du changement climatique sont présentées pour sept zones géographiques, constituées par regroupement de régions administratives dans un souci de cohérence agricole et climatique.

2 | Centre-Nord

Aperçu des impacts agricoles

Nette diminution des précipitations ; augmentation significative du rendement du blé dans le futur proche et le futur lointain ; stagnation des rendements du colza ; augmentation significative des rendements du maïs accompagnée d'une augmentation des besoins en eau d'irrigation dès le futur proche ; viticulture devenant faisable dès le milieu du siècle dans le centre et le nord de la zone.

3 | Ouest

Aperçu des impacts agricoles

Hausse des températures légèrement tamponnée par l'influence océanique ; dégradation du déficit hydrique climatique annuel ; maintien de la productivité de la prairie dans le futur proche et accroissement dans le futur lointain ; maintien des rendements du blé en conventionnel et accroissement des rendements pour le blé non traité ; augmentation non significative du rendement du colza, 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 futur lointain.

4 | Nord-Est

Aperçu des impacts agricoles et forestiers

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.

5 | Centre-Est

Aperçu des impacts agricoles et forestiers

Accroissement des températures et dégradation du déficit hydrique climatique annuel ; forte hausse de production de la prairie dans le futur lointain ; opportunités accrues pour les cultures de sorgho et de tournesol ; diminution modérée du confort hydrique de la forêt permettant, dans le futur proche, le maintien de sa productivité.

6 | Sud-Ouest

Aperçu des impacts agricoles et forestiers

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 futur lointain ; 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.

7 | Sud-Est

Aperçu des impacts agricoles et forestiers

Forte dégradation du déficit hydrique climatique annuel ($P-ET_0$) ; 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.

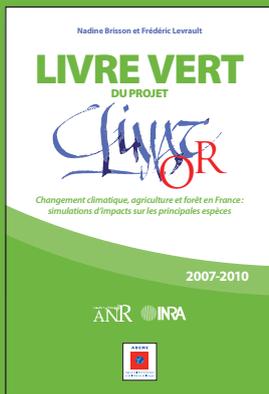
8 | Antilles

Aperçu des impacts agricoles

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.

Conclusion

CLIMATOR a permis de dégager les principaux impacts du changement climatique sur les cultures emblématiques des différentes zones étudiées. Cette approche territoriale décrit les principales évolutions du climat et leurs effets directs sur les agro-écosystèmes.



Auteurs :
Nadine Brisson
et Frédéric Levrault
Édité par l'ADEME
Date de parution :
juin 2010
ISBN 978-2-35838-128-4
336 pages

Quels impacts le changement climatique est-il susceptible d'avoir au cours du XXI^e siècle sur l'agriculture française et tout particulièrement sur nos systèmes cultivés ?

Afin de répondre à cette question, le projet CLIMATOR a réuni dix-sept équipes de sept instituts et organismes de recherche et de développement agricoles coordonnées par l'INRA, pendant trois ans (2007-2010).

Au travers de treize sites représentatifs de la diversité climatique et agricole française et par le croisement de modèles climatiques, agronomiques et forestiers, les impacts du changement climatique ont été analysés en termes de rendement, de qualité des produits, de calendriers culturaux, de besoins en eau, de santé des plantes. Cet ouvrage présente la synthèse des résultats publiés dans le *Livre vert du projet CLIMATOR*, organisés en quatre parties : la méthodologie, les thèmes, les cultures et les régions.

Retrouvez le *Livre vert du projet CLIMATOR* en ligne sur les sites :

- de l'ADEME : www.ademe.fr rubrique « Médiathèque » ;
- de l'INRA : www.inra.fr rubrique « La science et vous ».

Les partenaires du projet CLIMATOR

