

Juin 2015
volume n° 5 / numéro n° 1
www.agronomie.asso.fr

Agronomie

environnement & sociétés

La revue de l'association française d'agronomie



Changement climatique et agriculture
comprendre et anticiper, ici et ailleurs.



Agronomie, Environnement & Sociétés

<https://agronomie.asso.fr/les-travaux-de-lassociation/revue-aes/tous-les-numeros-de-aes/aes-5-1-changement-climatique-et-agriculture-comprendre-et-anticiper-ici-et-ailleurs/revue-aes-vol5-n1-4/>

Revue éditée par l'Association française d'agronomie (Afa)

Siège : 16 rue Claude Bernard, 75231 Paris Cedex 05.

Secrétariat : 2 place Viala, 34060 Montpellier Cedex 2.

Contact : douhairi@supagro.inra.fr, T : (00-33)4 99 61 26 42, F : (00-33)4 99 61 29 45

Site Internet : <http://www.agronomie.asso.fr>

Objectif

AE&S est une revue en ligne à comité de lecture et en accès libre destinée à alimenter les débats sur des thèmes clefs pour l'agriculture et l'agronomie, qui publie différents types d'articles (scientifiques sur des états des connaissances, des lieux, des études de cas, etc.) mais aussi des contributions plus en prise avec un contexte immédiat (débats, entretiens, témoignages, points de vue, controverses) ainsi que des actualités sur la discipline agronomique.

ISSN 1775-4240

Contenu sous licence Creative commons



Les articles sont publiés sous la *licence Creative Commons 2.0*. La citation ou la reproduction de tout article doit mentionner son titre, le nom de tous les auteurs, la mention de sa publication dans la revue AE&S et de son URL, ainsi que la date de publication.

Directeur de la publication

Marc BENOÎT, président de l'Afa, Directeur de recherches, Inra

Rédacteur en chef

Olivier RÉCHAUCHÈRE, chargé d'études Direction de l'Expertise, Prospective & Etudes, Inra

Membres du bureau éditorial

Pierre-Yves LE GAL, chercheur Cirad

Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du département Persyst, Cirad

Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en ligne

Danielle LANQUETUIT, consultante Triog et webmaster Afa

Comité de rédaction

- Marc BENOÎT, directeur de recherches Inra
- Valentin BEAUVAL, agriculteur
- Jacques CANEILL, directeur de recherches Inra
- Joël COTTART, agriculteur
- Thierry DORÉ, professeur d'agronomie AgroParisTech
- Sarah FEUILLETTE, cheffe du Service Prévision Evaluation et Prospective Agence de l'Eau Seine-Normandie
- Yves FRANCOIS, agriculteur
- Jean-Jacques GAILLETON, inspecteur d'agronomie de l'enseignement technique agricole
- François KOCKMANN, chef du service agriculture-environnement Chambre d'agriculture 71
- Marie-Hélène JEUFFROY, directrice de recherche Inra et agricultrice
- Aude JOMIER, enseignante d'agronomie au lycée agricole de Montpellier
- Jean-Marie LARCHER, responsable du service Agronomie du groupe Axérial
- François LAURENT, chef du service Conduites et Systèmes de Culture à Arvalis-Institut du végétal
- Francis MACARY, ingénieur de recherches Irstea
- Jean-Robert MORONVAL, enseignant d'agronomie au lycée agricole de Chambray, EPLEFPA de l'Eure
- Christine LECLERCQ, professeure d'agronomie Institut Lassalle-Beauvais
- Adeline MICHEL, Ingénieure du service agronomie du Centre d'économie rurale de la Manche
- Philippe POINTEREAU, directeur du pôle agro-environnement à Solagro
- Philippe PRÉVOST, directeur Agreenium Université en Ligne
- Hervé SAINT MACARY, directeur adjoint du Département Persyst, Cirad

Secrétaire de rédaction

Philippe PREVOST

Assistantes éditoriales

Sophie DOUHAIRIE et Danielle LANQUETUIT

Conditions d'abonnement

Les numéros d'AE&S sont principalement diffusés en ligne. La diffusion papier n'est réalisée qu'en direction des adhérents de l'Afa ayant acquitté un supplément
(voir conditions à <http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>)

Périodicité

Semestrielle, numéros paraissant en juin et décembre

Archivage

Tous les numéros sont accessibles à l'adresse <http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/>

Soutien à la revue

- En adhérant à l'Afa via le site Internet de l'association (<http://www.agronomie.asso.fr/espace-adherent/devenir-adherent/>). Les adhérents peuvent être invités pour la relecture d'articles.
- En informant votre entourage au sujet de la revue AE&S, en disséminant son URL auprès de vos collègues et étudiants.
- En contactant la bibliothèque de votre institution pour vous assurer que la revue AE&S y est connue.
- Si vous avez produit un texte intéressant traitant de l'agronomie, en le soumettant à la revue. En pensant aussi à la revue AE&S pour la publication d'un numéro spécial suite à une conférence agronomique dans laquelle vous êtes impliqué.

Instructions aux auteurs

Si vous êtes intéressé(e) par la soumission d'un manuscrit à la revue AE&S, les recommandations aux auteurs sont disponibles à l'adresse suivante :

<http://www.agronomie.asso.fr/carrefour-inter-professionnel/evenements-de-lafa/revue-en-ligne/pour-les-auteurs/>

À propos de l'Afa

L'Afa a été créée pour faire en sorte que se constitue en France une véritable communauté scientifique et technique autour de cette discipline, par-delà la diversité des métiers et appartenances professionnelles des agronomes ou personnes s'intéressant à l'agronomie. Pour l'Afa, le terme agronomie désigne une discipline scientifique et technologique dont le champ est bien délimité, comme l'illustre cette définition courante : « *Etude scientifique des relations entre les plantes cultivées, le milieu [envisagé sous ses aspects physiques, chimiques et biologiques] et les techniques agricoles* ». Ainsi considérée, l'agronomie est l'une des disciplines concourant à l'étude des questions en rapport avec l'agriculture (dont l'ensemble correspond à l'agronomie au sens large). Plus qu'une société savante, l'Afa veut être avant tout un carrefour interprofessionnel, lieu d'échanges et de débats. Elle se donne deux finalités principales : (i) développer le recours aux concepts, méthodes et techniques de l'agronomie pour appréhender et résoudre les problèmes d'alimentation, d'environnement et de développement durable, aux différentes échelles où ils se posent, de la parcelle à la planète ; (ii) contribuer à ce que l'agronomie évolue en prenant en compte les nouveaux enjeux sociétaux, en intégrant les acquis scientifiques et technologiques, et en s'adaptant à l'évolution des métiers d'agronomes.

Lisez et faites lire AE&S !

Sommaire

Avant-propos

P7- O. RÉCHAUCHÈRE (Rédacteur en chef) et M. BENOÎT (Président de l'Afa)

Éditorial

P9- M. BENOÎT et E. TORQUEBIAU (coordonnateurs du numéro)

Le Changement climatique et son impact sur l'agriculture : état des lieux, prévision et prospective

P13- Vers une prospective des impacts du changement climatique sur la sécurité alimentaire : les enseignements du 5ème rapport du GIEC

T. BRUNELLE (CIRAD)

P23- Evolutions constatées et prévisibles des principales composantes du climat impactant l'agriculture

F. HABETS (CNRS) et P. VIENNOT (Mines-ParisTech)

P33- Prospective Agriculture Forêt Climat (AFClim) du Centre d'étude et de prospective du MAAF

N. SCHALLER

S'adapter au changement climatique : outils, moyens et acteurs

P41- S'adapter au changement climatique

Agriculture, écosystèmes et territoires (Jean-François Soussana Coord.)

E. TORQUEBIAU (Cirad)

P43- L'observation des effets agricoles du changement climatique en France : combat d'arrière-garde, ou aide à l'adaptation ?

F. LEVRAULT (CRA POITOU-CHARENTES)

P55- Impacts du changement climatique sur les pratiques agricoles : évolution des calendriers culturels en région de polyculture-élevage

M. BENOÎT (Inra), T. FOURNIER, C. DE LA TORRE

P67- Adaptation au changement climatique en agronomie viticole : le programme Icare

G. BARBEAU, E. NEETHLING, N. OLLAT, H. QUENOL, J.M. TOUZARD

P77- Prospective participative sur l'agriculture du Roussillon face au changement climatique

P. GARIN, D. ROLLIN, L. MATON, J.D. RINAUDO, A. RICHARD-FERROUDJI, Y. CABALLERO

P87- Retour sur le colloque final du projet ADAPT'EAU

N. SCHALLER

P89 - Stratégies d'adaptation aux changements climatiques d'agriculteurs du Nicaragua : actions d'AVSF

L. DIETSCH (AVSF)

P93- Adaptations paysannes aux changements et aléas climatiques dans trois régions du monde

M.J. DUGUE

S'adapter au changement climatique et en atténuer les effets

P99- Changement climatique et Agricultures du Monde (Editions Quae, Torquebiau, E. (Ed)).

M. BENOÎT (Inra)

P101- Le fonio : une culture climato intelligente ?

N. ANDRIEU, E. VALL, M. BLANCHARD, F. BEAVOGUI, D. SOGODOGO

P107- Reconsidérer les rôles agronomiques de l'élevage dans la contribution à l'adaptation et l'atténuation du changement climatique

V. BLANFORT, M. VIGNE, J. VAYSSIERES, P. LECOMTE, J. LASSEUR, A. ICKOWICZ (Cirad)

P117- Agribalyse : résultats et enseignements

A. COLSAET, V. COLOMB et J. MOUSSET (ADEME)

P133- Stratégies d'atténuation mises en œuvre sur les territoires : l'outil et la démarche ClimAgri®

S. MARTIN (ADEME)

P139- Agriculture et gaz à effet de serre (Sylvain Pellerin et al.)

M. BENOÎT (Inra)

Annexe

P141 Appel à contribution du numéro



Évolutions constatées et prévisibles des principales composantes du climat ayant un effet sur l'agriculture avec un focus sur l'hydrologie

Observed and projected evolution of the main components of the climate affecting agriculture with a focus on hydrology

Florence HABETS¹ - Pascal VIENNOT²

¹CNRS UPMC UMR 7619 Metis, Paris, Case 105, 4 Place Jussieu - 75252 Paris Cedex - Tel : 01 44 27 51 30 - Courriel : florence.habets@upmc.fr

²Centre de Géosciences Mines-Paristech, 35 rue Saint Honoré - 77305 Fontainebleau Cedex - Tel: 01 64 69 47 56 - Courriel : pascal.viennot@mines-paristech.fr

Résumé

L'augmentation de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre a des conséquences importantes sur le climat y compris pour des régions tempérées comme la France. Après quelques rappels sur les processus et les méthodes utilisées pour projeter les impacts, l'article se focalise sur l'évolution de la ressource en eau en France. On projette une diminution marquée des débits d'étiage et de la ressource en eau souterraine, ainsi qu'une occurrence accrue des sécheresses édaphiques. Cette évolution sur la ressource en eau sera une contrainte pour l'évolution et l'adaptation de l'agriculture, qui subit par ailleurs des modifications importantes de la phénologie et une amplification des stress thermiques.

Mots-clés

Changement climatique ; ressource en eau ; agriculture ; adaptation ; France.

Summary

The increase of the atmospheric greenhouse gas concentration leads to important climate change even in temperate regions as France. First, the main processes and methods used to project the impacts of climate change are briefly summarized. Additionally to the intensification of the precipitation, i.e., to the larger part of the annual accumulated precipitation that fall as intense precipitations that is projected worldwide, France is expected to have reduced precipitation in summer, and contrasted North-South evolution of the precipitation in winter. Therefore, a marked decrease in low flows as well as in groundwater resources are projected, together with an increased occurrence of soil droughts. This will constraint the evolution and adaptation of French agriculture, which also undergoes significant changes in phenology and amplification of thermal stress. Agroclimatic indicator shows that the feasibility of crops is projected to decrease on average and to suffer from larger annual variability in the future, although this tendency is more pronounced in the south than in the north of France.

Key-words

Climate change; water ressource; agriculture; adaptation; France.

La prise de conscience des actions anthropiques impactant le climat

L'impact de l'homme sur le climat est indéniable. Ce fait rappelé formellement dans le cinquième rapport du Groupe Intergouvernemental sur l'Étude du Climat (GIEC) en 2013 (IPCC, 2013), était déjà la conviction de scientifiques en 1970 (Landsberg, 1970). En effet, dès 1970, les évidences scientifiques étaient acquises : l'effet de serre, c'est-à-dire, le rôle majeur de la couche atmosphérique pour conserver la chaleur de la terre avait été identifié par Fourier en 1824 ; le rôle singulier du dioxyde de carbone (CO₂) comme principale composante de l'atmosphère contribuant à l'effet de serre en plus de la vapeur d'eau avait été relevé par Arrhenius dès 1896 ; les premières mesures continues de concentration de l'air en CO₂ débutées en 1958 avaient déjà montré une nette tendance à la hausse de ces concentrations induisant qu'une part non négligeable du CO₂ émis par l'homme se retrouvait dans l'atmosphère (Keeling, 1960) ; enfin, les premières modélisations numériques ont confirmé les suppositions d'Arrhenius, c'est-à-dire que l'augmentation du CO₂ pourrait conduire à une augmentation globale de la température de l'air (Manabe and Wetherald, 1967).

Cette conviction scientifique, débattue pendant plus de 50 ans (Dumont, 2013), a conduit les Nations Unies ainsi que l'Organisation Météorologique Mondiale à organiser une première conférence mondiale sur le climat dès 1979 (le « Sommet de la Terre de Stockholm ») qui recommandera de « prévoir et prévenir les changements climatiques d'origine anthropique qui pourraient nuire au bien-être de l'humanité », et demanderont notamment la création du Programme mondial de recherche sur le climat et du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) qui naîtra en 1988 (Cornut, 1997). En 1992, le Sommet de la Terre de Rio de Janeiro adopte la convention climat, qui vise en particulier à stabiliser les concentrations de gaz à effet de serre (GES) dans l'atmosphère à un niveau qui empêche toute perturbation anthropique dangereuse du climat. Pour cela, les états signataires (196 pays) se réunissent tous les ans pour faire le suivi des émissions et des engagements et décider de nouvelles mesures nécessaires lors de Conférences des Parties (COP) dont la première se déroula en 1995. La COP21 de Paris en décembre 2015 doit aboutir à l'adoption d'un premier accord universel et contraignant sur le climat pour maintenir la température globale en deçà de 2°C, convention qui devrait être effective en 2020. En effet, une augmentation de la température de l'air de plus de 2° aurait des conséquences globalement négatives et coûteuses pour nos sociétés, via notamment l'occurrence d'événements extrêmes, des risques accrus de sécheresse et d'inondation, et la submersion d'importantes surfaces par la montée des océans (IPCC 2013), ce qui ne sera pas sans conséquence pour l'agriculture.

Les processus en jeu

Il y a déjà des évidences fortes des modifications du climat liées à l'action de l'homme. Ainsi, les différentes mesures directes ou indirectes de la concentration en CO₂ de l'atmosphère ont permis de reconstituer son évolution depuis plus de 600 000 ans (Figure 1, IPCC 2013) : on constate

une augmentation extrêmement rapide et sans précédent de la concentration en CO₂ depuis le début du vingtième siècle. En parallèle, à l'échelle mondiale, entre 1901 et 2012, la température de l'air a augmenté de 0.9 degré, l'année 2014 ayant été la plus chaude jamais observée. Ce réchauffement planétaire se fait également ressentir en France, où l'augmentation de la température atteint 1,3 (Figure 2, Planton et al., 2015).

Mais cette hausse de la température a des conséquences plus larges sur le climat. Ainsi, la température et l'humidité de l'air sont tous deux reliées, car plus l'air est chaud, plus il peut porter d'eau. Selon l'équation de Clausius Clapeyron, une élévation de la température de l'air de 15 à 16°C permet à l'air de transporter 6.5% d'eau en plus. La présence plus importante d'eau dans l'atmosphère peut donc conduire à une augmentation des précipitations. S'il est difficile d'observer des tendances très nettes sur les précipitations du fait de leurs fortes variabilités spatiales et temporelles, une tendance à l'augmentation des précipitations fortes (précipitations supérieures à 10mm/jour, correspondant au moins à un bel orage) est observée depuis 1900 (Donat et al., 2013). *A contrario*, le seuil de déclenchement des précipitations pouvant être plus élevé, les zones situées dans des régions où l'air est sec (versants montagneux sous les vents par exemple) pourraient avoir moins de précipitation.

Ces changements de l'humidité de l'air ne sont pas les seuls qui affecteront les précipitations. En effet, la circulation dynamique des masses d'air sur notre planète est pilotée en partie par les gradients de température. C'est le cas avec les différences de température entre la surface de la terre et la stratosphère, et entre les pôles et l'équateur. Or, le réchauffement climatique n'est pas homogène : les pôles se réchauffent plus vite, notamment du fait d'une rétroaction positive : l'augmentation de la température conduit à faire fondre la neige et la banquise, exposant des océans ou terres nues capables de recevoir plus d'énergie (par l'effet albédo –couleur-, leur surface ne renvoyant pas les rayons du soleil), ce qui contribue à augmenter la température locale. Ces modifications des gradients de température conduisent à une modification de la circulation atmosphérique, qui se traduira par un déplacement des zones climatiques (Figure 3).

On notera que ces modifications attendues et pour certaines déjà observées, s'accompagnent d'effet secondaires pouvant alimenter la tendance au réchauffement climatique. Parmi eux, l'augmentation de l'humidité de l'air conduit à renforcer la présence d'un des principaux gaz contribuant à l'effet de serre d'origine naturelle, la vapeur d'eau. De plus, dans l'hémisphère Nord, la fonte des sols gelés (ou pergélisols) conduit à la libération d'importantes quantités de gaz à effet de serre (méthane¹ (CH₄) et CO₂) du fait de la décomposition de matières organiques stockées dans le sol depuis des siècles.

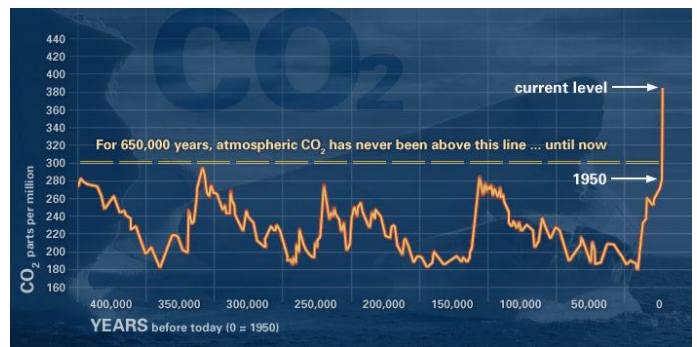


Figure 1 : Évolution de la concentration en CO₂ de l'atmosphère depuis environ 650 000 ans. A partir de 1960 les données sont issues de postes d'observations in situ. Avant 1960 les données sont reconstituées à partir de mesures indirectes comme les bulles d'air piégées dans les calottes glaciaires par exemple.

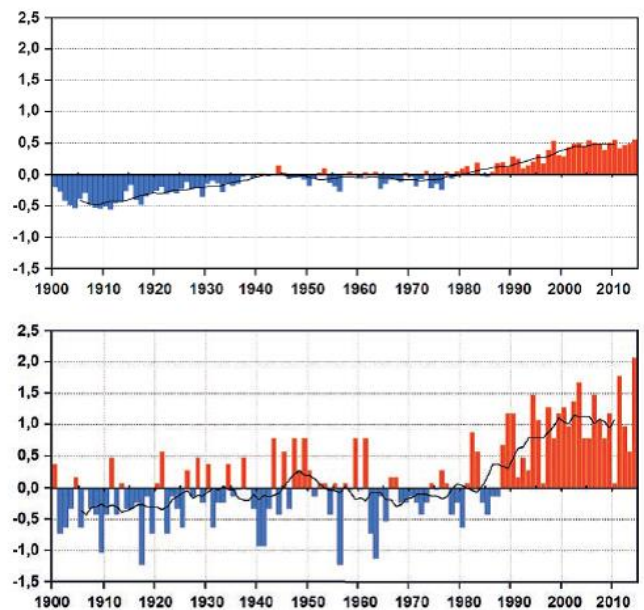


Figure 2 : Anomalie de l'évolution de la température de l'air à l'échelle mondiale (en haut) et à l'échelle de la France (en bas) sur la période 1901-2012 par rapport à la moyenne calculée sur la période 1961-1990 (référence 0). La courbe noire en trait plein représente une moyenne glissante calculée sur 10 années. Figure issue de Planton et al. 2015

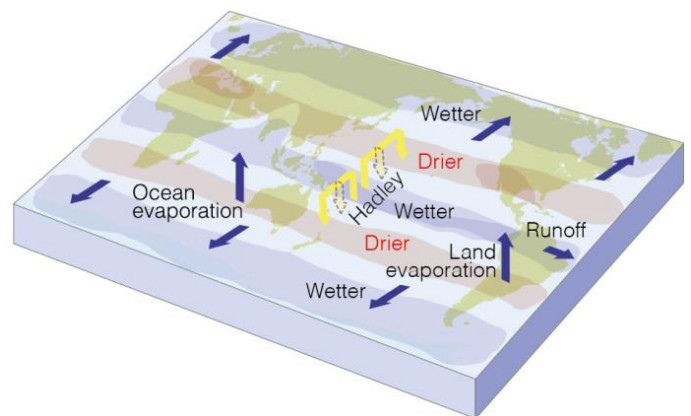


Figure 3 : Représentation simplifiée des impacts attendus du changement climatique sur les modifications de la circulation générale et implication sur la répartition des zones humides et sèches. En jaune : les cellules de Hadley gouvernant la circulation au niveau de l'équateur se renforcent générant plus de précipitations et s'étendent en latitude conduisant à un assèchement des zones situées autour des latitudes 30. Les zones humides des latitudes 70 se déplacent vers des plus hautes latitudes amenant plus d'humidité dans ces zones. La zone Méditerranée et le Sud-Ouest de l'Amérique centrale sont marquées par un assèchement plus marqué (figure issue de Collins et al. 2013).

¹ Le CH₄ a un potentiel de réchauffement global (PRG) à 100 ans 25 fois plus fort que le CO₂ avec une durée de séjour dans l'atmosphère (10 ans), 10 fois plus faible.

Les projections climatiques

Pour anticiper l'évolution du climat dans les années à venir de façon plus fine, la communauté scientifique se base sur deux principaux éléments : les scénarios d'évolution des émissions de gaz à effet de serre et aérosols, et les simulations de modèles climatiques utilisant comme contrainte ces scénarios d'évolutions des concentrations en gaz à effet de serre.

Les scénarios d'émissions de gaz à effet de serre et d'aérosols se fondent sur une bonne connaissance des émissions actuelles. On considère qu'un habitant des pays de l'OCDE émet 14 t d'équivalent CO₂ par an, 8 t par an pour les habitants de pays dont l'économie est en transition, et moins de 4 t par an pour les autres. Les sources de ces émissions en France aujourd'hui sont présentées Figure 4 par secteur d'activité. Environ 20% des émissions sont directement liées à la production agricole, ce qui est assez proche de la moyenne mondiale estimée pour ces dernières décennies. Le CH₄ notamment produit par l'élevage de ruminants et le protoxyde d'azote² (N₂O) dont l'émission est liée à l'emploi des engrais et amendements azotés font partie des principaux gaz à effet de serre émis par l'agriculture (Pellerin et al., 2013). Pour estimer l'évolution de ces émissions dans le futur, différents scénarios ont été retenus par les scientifiques (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Ils sont référencés en fonction de leur impact sur le bilan radiatif de la terre car c'est un forçage radiatif qui se rajoute au bilan naturel. Le scénario 2.6 (ou RCP pour Recursive Concentration Pathway, Mosses et al., 2010) en bleu **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** est le seul à permettre de maintenir un réchauffement climatique limité à 2°, objectif visé pour la COP21. On note que pour cela, les émissions de gaz à effet de serre doivent diminuer drastiquement dès 2020, et que l'on doit même « consommer » du CO₂ dès 2070. En effet, l'effet de serre dépend des concentrations en GES, et ces concentrations ne peuvent se stabiliser tant que l'on continue à émettre plus de GES que ce qui peut être absorbé naturellement par le continuum sol-végétation et les océans. Néanmoins, les scénarios 6.5 voire 8.5 sont ceux vers lesquels l'humanité se dirige le plus sûrement actuellement.

Ces scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols sont ensuite utilisés par les modèles climatiques. Ces modèles, également appelés « modèles du système terre », ont les mêmes bases physiques que les modèles utilisés pour la prévision météorologique. Cependant, ils intègrent plus d'éléments comme des modèles océaniques simulant la circulation sur l'ensemble de la profondeur des bassins océaniques et les processus biogéochimiques associés, des modèles de chimie atmosphérique, la représentation explicite de la glace de mer et de la circulation hydrologique continentale, des modèles dynamiques de la biosphère afin d'intégrer la réponse des plantes à l'augmentation du CO₂ atmosphérique.

Les modèles de climat sont évalués en comparant les simulations aux observations sur le vingtième siècle. Ainsi, la Figure 6 présente une évaluation des modèles de climat, en comparant les observations de température de l'air avec les

simulations. Elle illustre également l'**attribution** de l'augmentation de la température aux activités humaines en comparant les résultats de simulations réalisées avec et sans intégration de l'évolution des concentrations des gaz à effet de serre liées aux activités humaines au cours du vingtième siècle.

Les projections climatiques sur le 21^{ème} siècle sont néanmoins bien sur soumises à des incertitudes, en particulier après 2050, notamment parce qu'il y a moins d'incertitudes sur les émissions de GES jusqu'à cette période. D'une manière générale, les projections climatiques s'accordent sur une augmentation de l'occurrence des jours très chauds, une diminution des jours les plus froids, et une augmentation de la part des précipitations tombant lors d'épisodes de précipitations intenses, quelques soient les scénarios d'émissions de GES et aérosols (Figure 7).

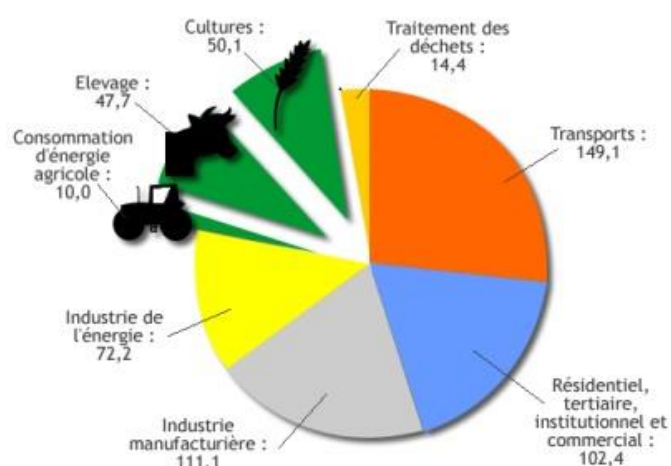


Figure 4 : Émission de gaz à effet de serre en Mt d'équivalent CO₂ en France (source : CITEPA)

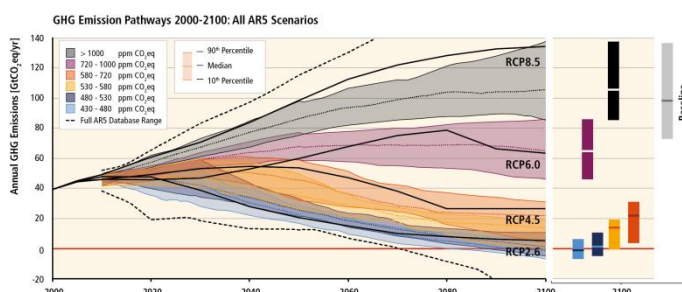


Figure 5 : Scénarios d'émission de gaz à effet de serre utilisés par le GIEC (IPCC 2014 WGIII)

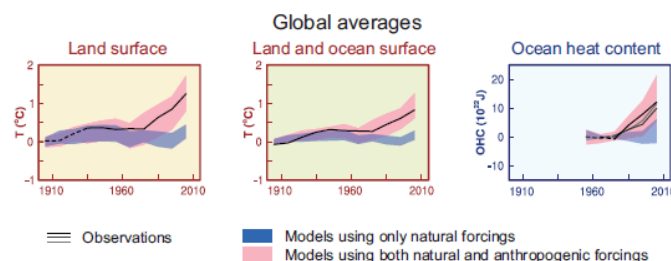


Figure 6 : Comparaison entre les températures au-dessus des continents (gauche) des océans (droites) et globales (centre) observées (en noir) et simulées par les modèles de climat en prenant en compte les évolutions observées des concentrations des gaz à effet de serre et d'aérosols (en rose) et en considérant ces concentrations constantes (en bleu). Les écarts entre les courbes rose et bleu, Source IPCC 2013

² Le pouvoir réchauffant global (PRG) à 100 ans du N₂O est 298 fois plus important que le CO₂ avec une durée de séjour dans l'atmosphère équivalente (environ 100 ans)

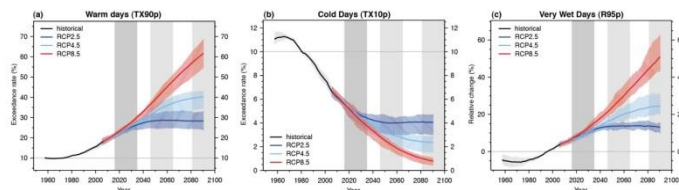


Figure 7 : a) Projections de l'évolution de l'occurrence des jours où la température de l'air sera supérieure aux températures les plus chaudes atteinte 10% du temps sur la période 1961-1990 b) inférieure aux températures les plus froides atteinte 10% du temps sur la période 1961-1990 c) projection de l'évolution de la fraction des précipitations qui tomberont sous la forme de pluie intense (les 5% des précipitations les plus intenses) par rapport à la période 1986-2005. Les résultats sont présentés pour 3 scénarios d'émission de gaz à effet de serre et d'aérosols. Source Kirtman et al 2013

Le changement climatique en France

Lorsque l'on s'intéresse à l'évolution climatique d'une région du globe, il est nécessaire de « régionaliser » les projections climatiques. En effet, afin de prendre en compte les caractéristiques locales (proximité de la mer, présence de relief), mais aussi afin de corriger certains biais systématiques notamment sur le déclenchement des phénomènes précipitants, les projections climatiques doivent être régionalisées. Deux méthodes sont utilisées. La régionalisation dynamique repose sur l'utilisation de modèles régionaux de climat capables de réaliser des projections climatiques avec une meilleure résolution spatiale et une paramétrisation plus physique des processus (voir par exemple CORDEX <http://wcrp-cordex.ipsl.jussieu.fr/>). La régionalisation statistique consiste quant à elle à se fonder sur les observations régionales pour raffiner la résolution spatiale des projections tout en corrigeant les biais de ces projections. Cette dernière étape est particulièrement nécessaire pour les applications hydrologiques car les phénomènes précipitants sont très difficiles à simuler, notamment du fait des échelles spatiales impliquées dans leur formation (du kilomètre à la centaine de kilomètre pour la convergence d'humidité, au

nanomètre pour la formation de goutte sur des noyaux de condensation).

La nécessité d'utiliser ces projections régionalisées conduit à un délai supplémentaire entre la disponibilité des projections climatiques et leur exploitation. De ce fait, les résultats présentés ici reposent majoritairement sur des projections réalisées lors du précédent exercice du GIEC (AR4). Bien que peu de changements soient à attendre avec les nouvelles projections (AR5), celles-ci devraient permettre une meilleure compréhension des phénomènes en jeu grâce à la richesse des informations produites.

En plus d'une augmentation des températures comprise entre 0,6 °C et 1,3 °C, à l'horizon 2021- 2050, toutes saisons confondues, par rapport à la moyenne de référence calculée sur la période 1976-2005 (Ouzeau et al., 2014), la France subira des modifications de précipitations. La Figure 8, adaptée de Boé et al., 2009, présente l'évolution moyenne des précipitations annuelles en France projetée par 14 modèles de climat régionalisés à l'horizon 2050. Ces 14 modèles de climat ont été choisis du fait de la disponibilité des variables nécessaires à la régionalisation. La prise en compte de plusieurs modèles climatiques différents permet d'aborder les incertitudes associées aux projections climatiques. Les changements sont relativement modérés, seul le pourtour Ouest est affecté par une diminution des précipitations qui peut atteindre plus de 10%. En moyenne sur la France, la réduction des précipitations annuelles atteint 6%. Afin d'illustrer les incertitudes sur la projection des précipitations en France, les projections issues de trois modèles de climat régionalisés sont présentées également Figure 8. Les variations peuvent être conséquentes, et en moyenne, la diminution des précipitations en France varie de -4% à -13% entre les trois projections.

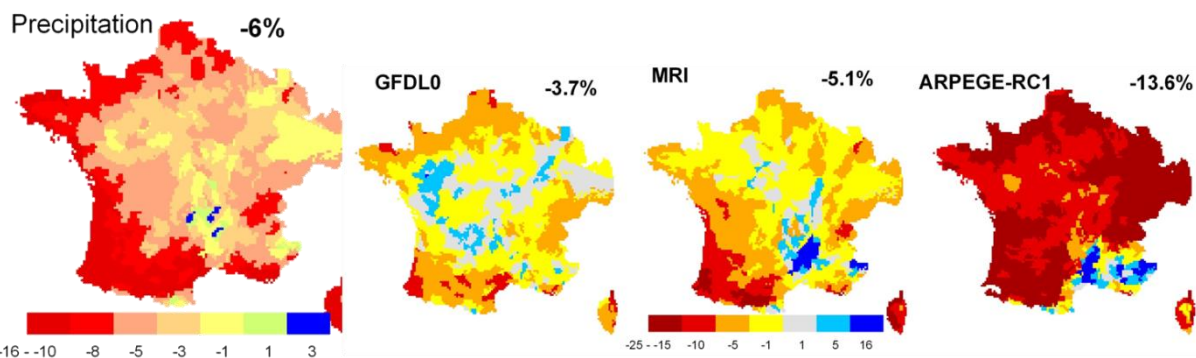


Figure 8 : Évolution des précipitations annuelles en France à l'horizon 2050 (en pourcent) en moyenne sur 14 projections régionalisées (à gauche) et pour 3 projections données (à droite). La moyenne du changement sur la France est indiquée pour les 4 cas. Source Boé et al. 2009

Impact sur l'hydrologie en France

Ces évolutions des précipitations combinées à l'évolution de l'ensemble des variables climatiques (rayonnements, humidité, température, vent) ont été utilisées afin de simuler l'évolution des débits des cours d'eau à l'horizon 2050. On obtient des diminutions importantes des débits sur la France, en moyenne de l'ordre de 15% (Figure 9), la région la plus touchée étant le Sud-Ouest. Certaines régions dans le Sud semblent à l'inverse marquées par une hausse modérée des débits annuels. Ces résultats obtenus avec les trois projections de la Figure 8 sont cohérents avec les résultats obtenus avec un total de 14 projections hydrologiques lors du projet Explore 2070 (Chauveau et al., 2013). Ce projet a de

plus montré que les projections convergeaient vers des étiages plus sévères et plus longs, sans pour autant que le risque de crue ne diminue. Le risque de crue augmente même dans certaines régions comme le Sud et le Nord-Est. Les eaux souterraines sont également impactées par le changement climatique. Bien que cette ressource soit peu visible, elle contribue de façon importante à l'eau potable et même à l'irrigation dans de nombreuses régions. La gestion

des eaux souterraines s'effectue à l'aide de piézomètre pour lesquels sont définis des niveaux de références qui permettent de se rendre compte des périodes de déficit. Ainsi, le niveau piézométrique de crise est utilisé sur le bassin versant de la Seine afin de limiter les prélèvements notamment

agricoles, de façon à assurer les prélèvements pour l'alimentation en eau potable. La Figure 10 présente l'évolution de la fréquence de dépassement de ce niveau piézométrique de crise à l'horizon 2050 sur le bassin de la Seine pour les trois projections climatiques précédentes. Dès l'horizon 2050, le niveau de crise serait dépassé de 47 à 71% de l'année en moyenne sur le bassin. On constate de plus que malgré la dispersion entre les projections, les zones les plus impactées sont les mêmes du fait de leurs caractéristiques hydroclimatiques : le centre du bassin, actuellement faiblement arrosé, la Beauce et la Haute Normandie. Une des solutions d'adaptation au changement climatique régulièrement proposée est la création de retenues de substitution pour permettre l'irrigation. Ces retenues se remplissent en période de hautes eaux uniquement, c'est-à-dire, en hiver, limitant ainsi l'impact sur les étiages. Une étude a été menée afin d'évaluer la capacité de remplissage de ces retenues de substitution sous climat actuel et sous changement climatique, ainsi que l'impact cumulé de ces réservoirs et du changement climatique sur les débits. Bien que sous le climat présent, ces retenues soient en moyenne capables de

se remplir facilement, leur taux de remplissage peut se limiter à 50% les années les plus sèches (Habets et *al.*, 2014). Dans un contexte de changement climatique, la capacité de remplissage de ces retenues est réduite de plus de 15% en moyenne dans le Sud-Ouest de la France et dans le bassin de la Seine à l'horizon 2050, et ce quel que soit la projection climatique (Figure 11). Dans ces régions, la capacité de ces retenues à fournir de l'eau les années les plus sèches est donc particulièrement remise en question dans un contexte de changement climatique.

Or, l'étude menée dans le cadre du projet CLIMSEC (Soubeyrou et *al.*, 2012) a montré que la sévérité des sécheresses risquait de s'aggraver dans le futur. La Figure 12 présente la superficie de la France impactée par des sécheresses pluviométriques et édaphiques telle qu'observée et projetée à différents horizons temporels selon trois projections climatiques. Il apparaît que le déficit pluviométrique connu en 1976, qui était le plus intense connu depuis 1958, pourrait apparaître de façon récurrente à la fin du 21^{ème} siècle, et que la sécheresse édaphique la plus étendue (celle de 1989-1990) pourrait même devenir récurrente à l'horizon 2070.

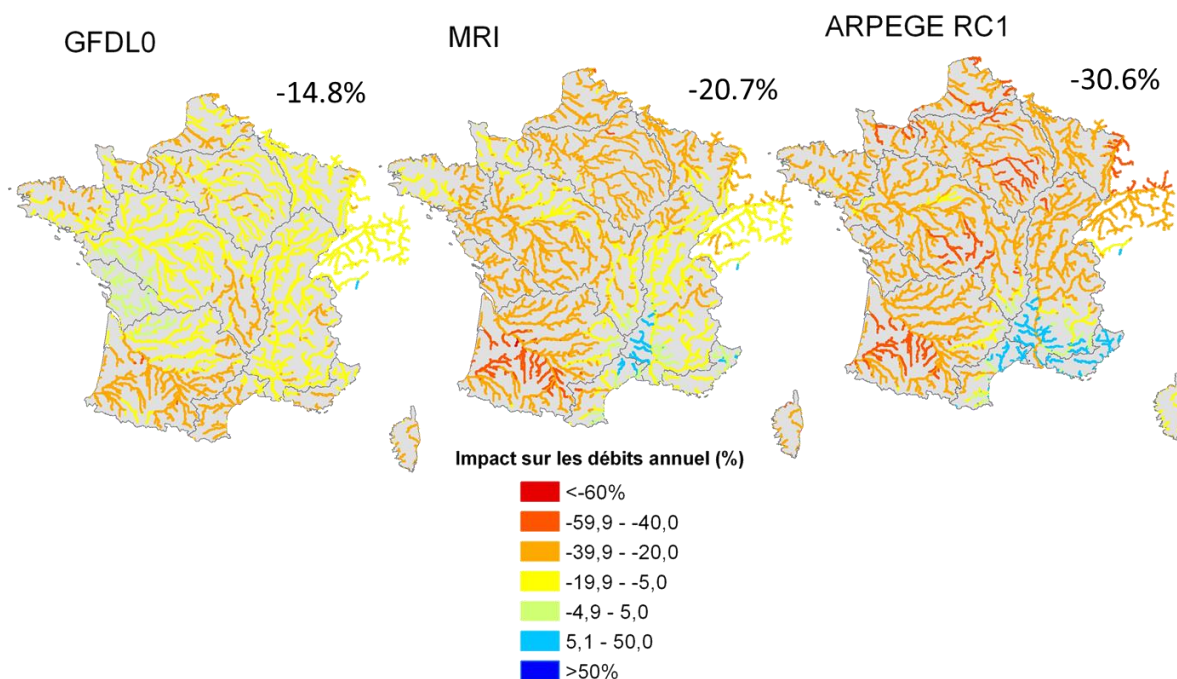


Figure 9 : Évolution des débits annuels à l'horizon 2050 pour 3 projections climatiques données estimée par le modèle hydrologique SIM. La moyenne de l'impact sur la France est donnée pour chaque projection. Source Habets et al 2014

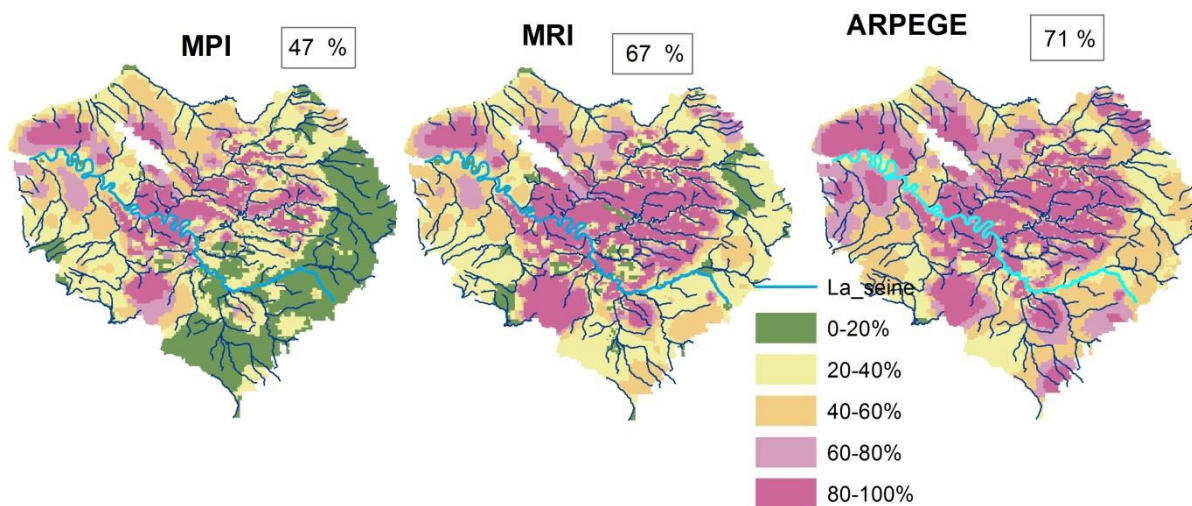


Figure 10 : Fréquence de dépassement du niveau piézométrique de crise sur les aquifères de la Seine à l'horizon 2050 selon 3 projections climatiques. Des valeurs de 100% indiquent que le niveau piézométrique de crise est constamment dépassé. De nos jours là où il est défini le dépassement du niveau piézométrique de crise implique des limitations des prélèvements en nappe. La Seine est dessinée en bleu clair. Source Habets et al. soumis.

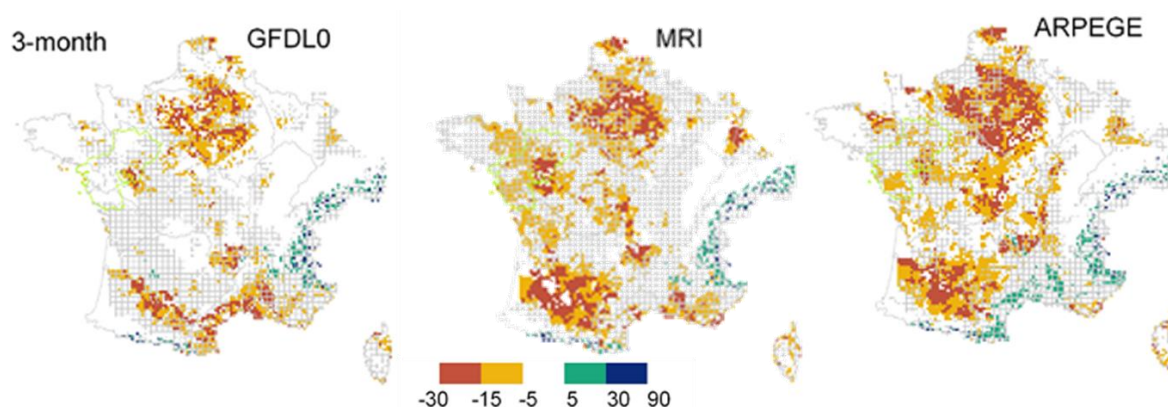


Figure 11 : Evolution de la capacité de remplissage de retenues d'eau de substitution en pourcent pour un (remplissage de Janvier à Mars) à l'horizon 2050 selon 3 projections climatiques. Source Habets et al. 2014.

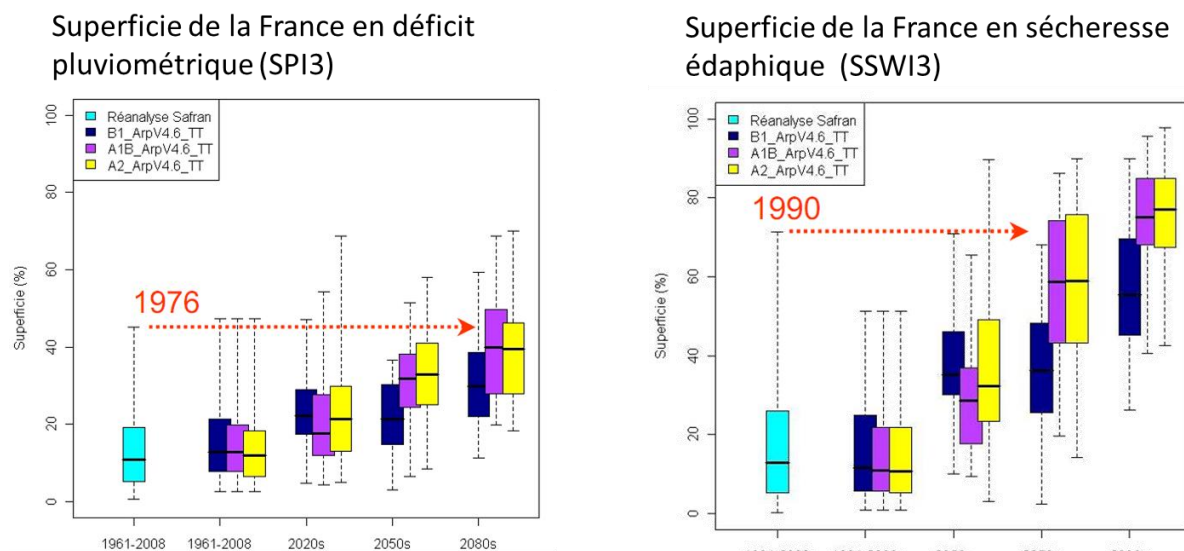


Figure 12 : Évolutions de la superficie de la France atteinte par des sécheresses pluviométriques (à gauche) et édaphiques (à droite) observées sur la période 1961-2008 (en bleu clair) et estimées avec le modèle SIM selon trois projections climatiques à différentes périodes. La boîte à moustache représente la médiane (trait noir) les 1^{er}s et 3^{es} quartiles (zones colorées) ainsi que les valeurs minimales et maximales. Pour le déficit pluviométrique l'indice standardisé sur les cumuls de précipitations à 3 mois (SPI3) est utilisé. L'épisode le plus étendu s'est produit en 1976. Pour la sécheresse édaphique l'indice standardisé de l'humidité des sols sur 3 mois (SSWI3) est utilisé. L'épisode le plus étendue s'est produit sur la période 1989-1990. Source projet Climsec Soubeyroux et al. 2011

Impact sur l'agriculture en France

Tous ces changements vont bien sûr impacter l'agriculture qui devra s'adapter aux conditions et ressources (notamment hydriques) disponibles. Le projet Climator (Brisson et Levraut, 2010) a rassemblé de nombreux éléments sur

l'impact que le changement climatique pourrait avoir sur l'agriculture en fonction des régions, des cultures, des variétés et des types de sol notamment. La prospective Adaptation de l'agriculture et des écosystèmes anthropisés au changement climatique (ADAGE) a permis de dresser une

première cartographie des défis et des enjeux de l'adaptation de l'agriculture (Soussana et al., 2013). Un des impacts majeurs est la modification des stades phénologiques des plantes, qui se traduit principalement par des dates plus précoces et donc un raccourcissement du cycle cultural et des risques de pertes de récolte associés par une augmentation de l'occurrence et/ou de l'intensité des stress hydriques, thermiques ainsi que par des épisodes de pluies intenses.

L'ensemble de ces stress peuvent être résumés par un indicateur unique, l'indicateur agroclimatique (Caubel et al., 2015) qui permet de résumer la faisabilité d'une culture dans un contexte de changement climatique. De nombreux éléments sont pris en compte pour estimer cet indicateur, comme par exemple l'avancement des stades phénologiques ou la qualité de la récolte. La Figure 13 présente ainsi l'évolution de la faisabilité de deux cultures

(variété courte et variété longue) sur deux sites contrastés (aux environs de Toulouse ou Colmar) et à trois horizons temporels différents (présent, futur proche et lointain). La faisabilité est bonne lorsque l'indicateur est proche de 1. On constate d'une part que la faisabilité diminue sous changement climatique, et que la variabilité de cette faisabilité augmente, ce qui traduit le fait que des phénomènes météorologiques nocifs (pluie intense, gel, sécheresse ou canicule) peuvent devenir plus fréquents ou à un stade plus nocifs du cycle de cultures malgré une adaptation des pratiques agricoles.

Une autre contrainte est le risque de propagation de parasites vers le Nord qui pourra être favorisée par la diminution des jours de gel. Cependant, certaines maladies, comme la rouille brune du blé pourrait régresser du fait de condition d'humidité du sol moins favorable.

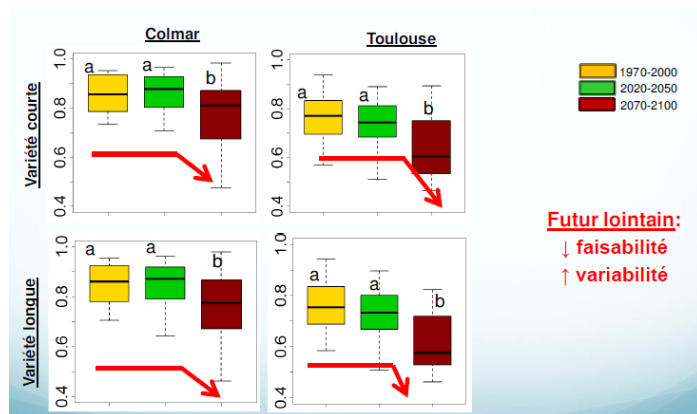


Figure 13 : Indicateurs agroclimatiques illustrant l'évolution de la faisabilité des cultures à cycle court ou long dans deux régions climatiques (autour de Toulouse ou Colmar), pour trois horizons temporels (présent, futur proche, futur lointain). La faisabilité de la culture est bonne si l'indicateur est proche de 1. Source : Caubel et al., 2015

Conclusions

Il est maintenant clair que le changement climatique aura des conséquences importantes à des horizons de temps assez proches (20 à 30 ans). Même si les projections climatiques ne sont pas encore assez fiables pour fournir des prévisions décennales (Cassou et Mignot, 2013), il est nécessaire de s'adapter à ces changements, sans toutefois abandonner les efforts concernant l'atténuation (c'est-à-dire la réduction des émissions des gaz à effet de serre).

Par le passé, nous avons subi des variations naturelles du climat déjà importantes, puisqu'au cours du vingtième siècle, les températures au printemps ont subi des variations multi-décennales atteignant 1°, et les précipitations ont varié de 20%, ce qui a eu un impact sur les débits annuels de plus de 20% (Boé et Habets, 2014) et très certainement également sur l'agriculture. Il faut s'attendre à ce que le changement climatique s'ajoute à cette variabilité naturelle, ce qui pourra amplifier son signal autant que le retarder, limitant ainsi la prise de conscience du phénomène.

Une bonne adaptation au changement climatique passe par une augmentation de la résilience de nos sociétés à ces changements. Concernant la ressource en eau, cela implique donc de réduire notre dépendance à l'eau, et pour cela, des mesures d'économies sont possibles, ce qui passera bien sûr par la chasse aux gaspillages d'eau, mais également, par la préservation de la réserve utile des sols via des pratiques agricoles adaptées (le drainage agricole ou l'appauvrissement des sols en matière organique réduisant cette capacité naturelle des sols à contenir de l'eau) et la capacité à retrouver dans l'environnement un fonctionnement naturel de réserves en eau notamment via le maintien des zones humides et la limitation de l'extension des zones péri-urbaines (voir par exemple AERMC, 2014). Pour l'agriculture, trois pistes d'adaptations sont possibles à des échelles différentes : i) l'adaptation des pratiques culturales visant à limiter les stress et augmenter la résilience ; ii) l'adaptation des systèmes de cultures via des modifications des rotations culturales vers des systèmes globalement plus économes en eau et iii) la modification des vocations territoriales qui implique une refonte du système de production. La mise en œuvre de ces trois leviers pose la question de l'accompagnement par la recherche, les politiques publiques et les acteurs du développement agricole.

Une bonne adaptation ne sera possible que si les effets observés et les impacts projetés sont bien connus et accessibles à tous. A cette fin, on peut relever l'existence d'observatoires régionaux tels qu'ORACLE Poitou-Charente³ ou l'ORECC Rhône-Alpes⁴, mettant à disposition par exemple les chroniques observées des évolutions des stades phénologiques ou des choix variétaux pour différentes cultures, et de services climatiques tels que DRIAS⁵ ou le CSE⁶ mettant à disposition des projections climatiques et des indicateurs sur la France.

Remerciements

Un grand merci à Patrick Bertuzzi et Thierry Doré pour leur relecture constructive, à Marc Benoit pour sa sollicitation ainsi qu'à Julie Caubel qui a fourni les résultats sur l'indicateur agroclimatique. Les résultats présentés sur la France ont principalement été obtenus lors des projets Explore 2070 financé par le MEDDE, ORACLE financé par l'ANR et Retenue financé par la DREAL Pays de la Loire.

³<http://www.poitou-charentes.chambagri.fr/innovation/changement-climatique/oracle-observatoire.html>

⁴<http://orecc.rhonealpes.fr/fr/observatoire-des-effets-du-changement-climatique.html>

⁵<http://www.drias-climat.fr>

⁶<http://cse.ipsl.fr>

Références

- AERMC (Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse), 2014. Plan de bassin d'adaptation au changement climatique dans le domaine de l'eau http://www.eaurmc.fr/fileadmin/grands-dossiers/documents/Changement_climatique/Plan_Bassin_Chgt_Clim-VF30-06-14.pdf.
- Arrhenius Svante, 1896. On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground, *Philosophical Magazine and Journal of Science*, Series 5, Volume 41, pages 237-276.
- Boé, J., Terray L., Martin E., Habets F., 2009. Projected changes in component of the hydrological cycle in French river basins during the 21st century, *Water Resour. Res.*, 45, W08426, doi:10.1029/2008WR007437.
- Boé, J., Habets, F., 2014. Multi-decadal river flows variations in France *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 18, 691-708, doi:10.5194/hess-18-691-2014.
- Brisson, N, Levraut, F., ÉDS. 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 (<http://www.inra.fr/Chercheurs-etudiants/Agroecologie/Toutes-les-actualites/Livre-vert-du-projet-Climator>).
- Cassou, C., Mignot, J., 2013. Enjeux, méthodes et fondamentaux de prévisibilité et prévision décennale, *La Météorologie*, n°81 p23-30 <http://hdl.handle.net/2042/51099>, DOI : 10.4267/2042/51099.
- Caubel, J., de Cortázar-Atauri, I. G., Launay, M., de Noblet-Ducoudré, N., Huard, F., Bertuzzi, P., & Graux, A. I. (2015). Broadening the scope for ecoclimatic indicators to assess crop climate suitability according to ecophysiological, technical and quality criteria. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207, 94-106.
- Chauveau, M., Chazot, S., Perrin, C., Bourgin, P.Y., Sauquet, E., et al.. 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, n°4, p. 5-15.
- Collins, M., R. Knutti, J. Arblaster, J.-L. Dufresne, T. Fiechter, P. Friedlingstein, X. Gao, W.J. Gutowski, T. Johns, G. Krinner, M. Shongwe, C. Tebaldi, A.J. Weaver and M. Wehner, 2013. Long-term Climate Change: Projections, Commitments and Irreversibility. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1029-1136, doi:10.1017/CBO9781107415324.024.
- Cornut, P. 1997. La convention Climat, Les cahiers de GLOBAL CHANCE - N°8 p 53-56.
- Donat, M. G., et al., 2013. Updated analyses of temperature and precipitation extreme indices since the beginning of the twentieth century: The HadEX2 dataset, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 2098-2118, doi:10.1002/jgrd.50150.
- Dumont Olivier, 2013. Histoire de la découverte du réchauffement climatique, <http://23dd.fr/climat/histoire-rechauffement-climatique/99-histoire-de-la-decouverte-du-rechauffement-climatique-i>.
- Fourier, M., 1824. Remarques générales sur les températures du globe terrestre et des espaces planétaires, *Mémoire de l'académie Royale des Sciences de l'Institut de France*, Tome 7, p569 <http://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k32227/f1.image>.
- Habets, F. E. Philippe, E. Martin, C. H. David, and F. Leseur, 2014. Small farm dams: impact on river flows and sustainability in a context of climate change, *Hydrol. Earth Syst. Sci.* 2014 18, 4207- 4222 doi:10.5194/hess-18-4207-2014.
- Habets Florence, Pascal Viennot Charlotte Thierion Jean-Pierre Vergnes Ahmed Ait Kaci Yvan Caballero Combined effect of climate change and groundwater abstraction on aquifers, submitted to *J Hydrol*.
- IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1-30, doi:10.1017/CBO9781107415324.004.
- IPCC, 2014: Summary for Policymakers. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. Adler, I. Baum, S. Brunner, P. Eickemeier, B. Kriemann, J. Savolainen, S. Schlömer, C. von Stechow, T. Zwickel and J.C. Minx (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Keeling, Charles D. (1960). "The Concentration and Isotopic Abundances of Carbon Dioxide in the Atmosphere." *Tellus* 12: 200-203.
- Kirtman, B., S.B. Power, J.A. Adedoyin, G.J. Boer, R. Bojariu, I. Camilloni, F.J. Doblas-Reyes, A.M. Fiore, M. Kimoto, G.A. Meehl, M. Prather, A. Sarr, C. Schär, R. Sutton, G.J. van Oldenborgh, G. Vecchi and H.J. Wang, 2013: Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 953-1028, doi:10.1017/CBO9781107415324.023.
- Landsberg, E.H., 1970. *Man-Made climatic changes*. Science. 170 3964.
- Manabe S. and R. T. Wetherald (1967). "Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity." *J. Atmospheric Sciences* 24: 241-59.
- Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., Van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J. (2010). The

next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.

Ouzeau G., M. Déqué, M. Jouini, S. Planton, R. Vautard, 2014, *Le climat de la France au XXI^e siècle*, Volume 4, ONERC, http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC_Climat_France_XXI_Volume_4_VF_2.pdf.

Pellerin S. Bamière L. , Angers D. , Béline F. , Benoit M. , Butault J.-P. , Chenu C. , Colnenne-David C. , De Cara S. , Delame N. , Doreau M. , Dupraz P. , Faverdin P. , Garcia-Launay F. , Hassouna M. , Hénault C. , Jeuffroy M.-H. , Klumpp K. , Metay A. , Moran D. , Recous S. , Samson E. , Savini I. , Pardon L. 2013. Quelle contribution de l'agriculture française à la réduction des émissions de gaz à effet de serre? Potentiel d'atténuation et coût de dix actions techniques. *Synthèse du rapport d'étude, INRA (France) (Rapport N° convention n° 11-60-C0021, convention n° 11-60-C0021,)* <http://prodinra.inra.fr/record/198570>.

Planton Serge, Bopp Laurent, Brun Eric, Cattiaux Julien, Chauvin Fabrice, Chevallier Matthieu, Ciais Philippe, Douville Hervé, Giraud Gérald, Soubeyroux Jean-Michel, Terray Laurent «Evolution du climat depuis 1850 *La Météorologie* 88 p48-55 <http://hdl.handle.net/2042/56361> DOI : 10.4267/2042/56361.

Soubeyroux JM N. Kitova M. Blanchard J.P. Vidal E. Martin et al.. Caractérisation des sécheresses des sols en France et changement climatique : Résultats et applications du projet ClimSec. *La Météorologie* 2012 78 p. 21 - p.30.

Soussana J.F., coordination éditoriale, 2013. *S'adapter au changement climatique Agriculture, écosystèmes et territoires*. 296 pages. Editions Quae. ISBN : 9782759220168.