

Les connaissances scientifiques au service de la COP21 - Florilège de projets de recherche 2008-2015 du programme " Gestion et impacts du changement climatique ", Novembre 2015

Sandrine Maljean-Dubois, M. Glachant, A. Haurie, P. Braconnot, P. Dandin, Eric Sauquet, P. Le Hir, Hervé Quénol

▶ **To cite this version:**

Sandrine Maljean-Dubois, M. Glachant, A. Haurie, P. Braconnot, P. Dandin, et al.. Les connaissances scientifiques au service de la COP21 - Florilège de projets de recherche 2008-2015 du programme " Gestion et impacts du changement climatique ", Novembre 2015. Bossini, S. Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), 79 p., 2015. hal-01357606

HAL Id: hal-01357606
https://hal.science/hal-01357606

Submitted on 30 Aug 2016

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

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

COMMISSARIAT GÉNÉRAL AU DÉVELOPPEMENT DURABLE

Références

Novembre 2015

Les connaissances scientifiques au service de la COP21

Florilège de projets de recherche 2008-2015 du programme « Gestion et impacts du changement climatique »

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Direction de la recherche et de l'innovation

www.developpement-durable.gouv.fr

Collection « RéférenceS » de la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD)

Titre du document : Les connaissances scientifiques au service de la COP21

Directeur de la publication : Serge Bossini

Auteur(s) : Sandrine Maljean-Dubois (CNRS), Matthieu Glachant (MINES ParisTech), Alain Haurie (ORDECSYS), Pascal Braconnot (IPSL/LSCE), Philippe Dandin (Météo-France), Eric Sauquet (Irstea), Pierre Le Hir (Ifremer), Hervé Quénol (CNRS)

Coordination éditoriale : Maurice Imbard (CGDD/DRI)

Date de publication : Novembre 2015

Remerciements : Denis Salles (Irstea), Anne-Sophie Tabau (université de La Réunion), Philippe Dandin (Météo-France), Didier Richard (Irstea)

Ce document n'engage que ses auteurs et non les institutions auxquelles ils appartiennent. Les opinions exprimées n'engagent pas le ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie. L'objet de cette diffusion est de stimuler le débat et d'appeler des commentaires et des critiques.

Les connaissances scientifiques au service de la COP21

Florilège de projets de recherche 2008-2015 du programme « Gestion et impacts du changement climatique »

Le programme Gestion et impacts du changement climatique (GICC)

Introduction du président du programme GICC, Denis Salles, Irstea *page 3*

Présentation du programme GICC *page 5*
Maurice Imbard, CGDD/DRI

Atténuation du changement climatique, en aide à la décision

Introduction *page 7*
Anne-Sophie Tabau, Université de La Réunion

Les négociations internationales du post-2012 : une lecture juridique des enjeux fondamentaux *page 9*
Sandrine Maljean-Dubois, CNRS

Économie industrielle des accords sectoriels *page 15*
Matthieu Glachant, MINES ParisTech

ETEM-AR, Modéliser l'atténuation et l'adaptation du système énergétique dans un plan climat local *page 21*
Alain Haurie, ORDECSYS

Services climatiques, en support à la décision

Introduction *page 27*
Philippe Dandin, Météo-France

page 29

INVULNERABLE 2, Vulnérabilité des entreprises phase 2
Pascale Braconnot, IPSL/LSCE

DRIAS : Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnements *page 37*
Philippe Dandin, Météo France

Adaptation au changement climatique, au service du territoire

Introduction *page 45*
Didier Richard, Irstea

R²D² 2050 Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050 *page 47*
Eric Sauquet, Irstea

C3E2 Conséquences du changement climatique sur l'écogéomorphologie des estuaires *page 57*
Pierre Le Hir, Ifremer

TERADCLIM Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles *page 67*
Hervé Quénol, CNRS

Le programme Gestion et impacts du changement climatique (GICC)

Denis Salles, directeur de recherche à Irstea, Bordeaux,
Président du conseil scientifique du programme Gestion et impact du changement climatique

Cette publication de résultats de projets sur la période 2008 à 2014 du programme GICC résonne, et c'est l'objectif, avec l'actualité de la COP21 à Paris en décembre 2015. Cette coïncidence de calendrier est une opportunité pour le programme de contribuer à la réflexion qui va entourer la négociation d'un accord international sur le climat qui suscite de fortes attentes.

La recherche n'a cependant pas le même pas de temps que la décision politique et une fois éteints les feux de la COP21, avec l'espoir d'un accord ambitieux, le besoin de connaissances scientifiques nouvelles et originales sur le changement climatique et l'adaptation va devenir une priorité de premier plan. Le nouveau conseil scientifique GICC, installé début 2015, représente la diversité des approches scientifiques sur le changement climatique abordé par le programme, avec en particulier un renforcement des compétences en sciences humaines et sociales dédiées à l'adaptation au changement climatique.

Le conseil scientifique va mettre à profit les deux années à venir pour d'une part, organiser des actions de valorisation des recherches GICC auprès des acteurs des territoires en attente de références et d'expertises pour asseoir leurs politiques climatiques territoriales, et d'autre part, pour positionner la future programmation 2017 sur le front des recherches internationales sur le changement climatique et les défis sociétaux associés, en espérant que pourront alors être mobilisés des financements pour soutenir de futurs projets. L'ouverture de ce temps de réflexion et d'échanges ouverts sera des plus utiles pour mobiliser les communautés de recherche sur le changement climatique par des animations scientifiques soutenues par le programme GICC et répondre à l'attente post COP21.



Maurice Imbard, chargé de mission changement climatique
Responsable du programme Gestion et impact du changement climatique

Le programme de recherche Gestion et Impacts du Changement Climatique, www.programme-gicc.fr, a permis de réaliser depuis quinze ans plus d'une centaine de projets.

Le programme, par une approche multidisciplinaire, veut favoriser le développement des connaissances en considérant les changements climatiques sous l'angle aussi bien de leurs impacts que des mesures d'atténuation et d'adaptation, d'ailleurs souvent conjuguées. Les projets de recherche couvrent de nombreux domaines scientifiques et font appel aux équipes de différentes disciplines : sciences formelles et de la nature, sciences humaines et sociales.

L'objectif général du programme est de susciter et développer des recherches finalisées en appui aux politiques publiques et s'inscrivant dans la mise en œuvre du plan national de lutte contre le changement climatique et du plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC).

À travers le programme, il s'agit de mettre au point outils et méthodes qui permettront aux pouvoirs publics d'optimiser les stratégies d'atténuation et d'adaptation. À titre d'exemple, le programme a soutenu le projet DRIAS dont on trouvera ci-joint la synthèse des résultats sous la rubrique Services climatiques. Ce projet a conduit à l'ouverture en 2012 du portail Drias[les futurs du climat], http://www.drias-climat.fr/, donnant accès aux simulations climatiques régionalisées réalisées par la communauté scientifique française. Aujourd'hui pérennisé et actualisé, ce portail met à la disposition de tout un chacun les résultats des dernières projections pour la métropole et l'outre-mer, correspondant aux scénarios du 5e rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC).

On trouvera dans cette brochure un échantillon de résultats de projets conduits sur la période 2008 à 2014, correspondant à deux appels à projets de recherche, en 2008 et 2010. Cette sélection permet de présenter la diversité des thèmes abordés et de montrer leurs résonances avec les questionnements scientifiques du moment.

Lors de l'appel de 2008 qui s'inscrivait dans la dynamique du Grenelle de l'environnement et de l'élaboration du PNACC, ont été sélectionnés quatorze projets traitant de l'atténuation des impacts avec une ouverture sur l'adaptation. En 2010, la sélection de neuf projets s'est plutôt focalisée sur ce dernier thème, l'adaptation, qui est devenue entre temps un sujet de recherche majeur. En effet, le changement climatique est bien là comme l'a encore confirmé le dernier rapport du GIEC. L'année 2014 est une des années les plus chaudes si ce n'est la plus chaude jamais enregistrée depuis le début de l'ère industrielle, et en 2015 l'étendue maximale de glace de mer en Arctique est la plus réduite jamais observée. Le changement est irréversible à l'échelle humaine, il va se poursuivre et son ampleur à la fin du siècle dépendra de la capacité de nos sociétés à changer de modèle et à évoluer vers une société bas carbone plus efficace dans sa consommation d'énergie. S'adapter nécessite une action non différée aujourd'hui pour un changement à venir qui relève du moyen et long terme et qui implique le renouvellement des politiques publiques et l'adhésion de l'ensemble de la société. Cela ne peut se concevoir sans l'éclairage de la recherche.

Au-delà de ces résultats 2008-2014 valorisés au travers de publications et de séminaires, le programme poursuit son activité. Six projets sont encore en cours dont plusieurs cherchant à explorer de nouvelles méthodes comme le partenariat avec le design pour développer l'approche adaptation en associant élus, citoyens, gestionnaires et chercheurs, ou la recherche d'une gestion intégrée de l'adaptation sur un territoire « climato-sensible » comme la montagne ou une collectivité d'outre-mer en adoptant une approche globale et coordonnée de l'ensemble des actions qui composent la politique d'adaptation.

Pour conclure, en 2015, le programme a organisé plusieurs actions et manifestations dans la perspective de la COP21 :

– un colloque labellisé COP21 présentant le projet EPIDOM sur la prévision décennale (voir Le point sur N° 203, http://intra.cgdd.i2/IMG/pdf/LPS203_cle159df5.pdf),

– en juillet, l'animation d'une session à la conférence scientifique Our Common Future Under Climate Change à l'UNESCO avec pour sujet « Comment interagir entre chercheurs et parties prenantes pour conduire des recherches sur l'adaptation au changement climatique ? »,

– La publication de l'intégralité de synthèses des neuf projets menés de 2011 à 2014.

– Le lancement lors d'un séminaire à Villard-de-Lans du projet ADAMONT qui, fort des acquis des projets précédents, va plus loin et propose de développer sur 2015-2017 une action de recherche intégrée sur l'adaptation en moyenne montagne en impliquant les acteurs socio-économiques et en confrontant les connaissances scientifiques à la réalité de leurs pratiques de gestion et d'adaptation, afin d'aider à une réelle co-construction entre chercheurs et acteurs du territoire.

I

Atténuation du changement climatique en aide à la décision

Anne-Sophie Tabau, professeur de droit public, université de La Réunion
membre du conseil scientifique du programme

Le programme GICC a soutenu la réalisation de plusieurs projets adoptant une approche juridique ou économique, à différentes échelles.

Un projet dirigé par Mme Sandrine Maljean-Dubois (CERIC, université Aix-Marseille) a ainsi donné lieu à une lecture juridique des négociations internationales, lancées à Bali en 2007, pour la période post-2012. Destinés à analyser les enjeux des négociations dans la perspective de la Conférence de Copenhague de décembre 2009, les résultats de ce projet conservent, à plusieurs égards, leur actualité dans la perspective de la Conférence de Paris de décembre 2015. Les points de tension au cœur des pourparlers en cours y avaient déjà été identifiés : structure juridique du futur accord, interprétation du principe des responsabilités communes mais différenciées, interaction entre le régime international de lutte contre les changements climatiques et le droit de l'Organisation mondiale du commerce, moyens d'impliquer les entreprises et modalités du suivi et du contrôle de la mise en œuvre des engagements internationaux. Ces questions ont toutefois évolué depuis la fin de ce projet. La forme juridique que prendra l'accord de Paris semble plus consensuelle. La formulation de leurs « contributions nationales » par les États eux-mêmes favorise une auto-différenciation. De nouvelles perspectives sont apparues concernant le contrôle de la mise en œuvre des engagements, notamment en raison de l'introduction de différents recours devant les juges internes. Enfin, désormais, les négociations internationales ne sont plus appréhendées de manière cloisonnée et les initiatives non-onusiennes tendent à être mieux considérées dans une perspective de complémentarité. C'est particulièrement vrai s'agissant de celles qui impliquent des acteurs non-étatiques.

À cet égard, l'analyse économique des accords sectoriels, réalisée dans le cadre d'un autre projet, coordonné par M. Mathieu Glachant (CERNA, MINES Paris/Tech) s'avère là-aussi éclairante dans le contexte de la COP 21. Envisagés pendant un temps comme une piste à explorer dans le cadre des négociations internationales, les accords sectoriels sont peu à peu sortis du cadre onusien, sans pour autant disparaître d'autres enceintes de coopération régionales ou transnationales (ex. partenariat Asie-Pacifique). Ce projet a permis de démontrer que si les accords sectoriels entre industriels ne peuvent pas se substituer à l'action des États, ils la complètent en suscitant l'émergence du consensus nécessaire à la mise en place de réglementations ou de mécanismes de marchés transnationaux. Parallèlement, les accords sectoriels conclus entre pays développés et pays en développement sont de nature à créer des conditions favorables à l'engagement de ces derniers en faveur d'objectifs plus ambitieux, selon une logique « bottom-up » adaptée aux contraintes locales, et grâce à l'obtention, en contrepartie, d'un soutien financier ou technologique axé sur les actions engagées.

La nécessaire correspondance entre les politiques climatiques et les caractéristiques locales a également fondé le projet ETEM-AR, coordonné par M. Alain Haurie (université de Genève), qui visait à identifier les mesures d'atténuation et d'adaptation appropriées dans le secteur de l'énergie à l'échelle régionale. S'appuyant sur le cas de la région Midi-Pyrénées, ce projet a développé un outil méthodologique permettant de conduire des analyses coût/efficacité tenant compte des activités d'atténuation et d'adaptation dans le cadre d'un système énergétique complet, afin d'identifier des politiques robustes malgré l'incertitude des impacts du changement climatique. Ces recommandations de « politiques robustes » sont de nature à venir renseigner l' « agenda des solutions » de la Conférence de Paris.

LES NÉGOCIATIONS INTERNATIONALES DU POST 2012, UNE LECTURE JURIDIQUE DES ENJEUX FONDAMENTAUX

PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Date d'engagement : 1er octobre 2009

Montant du budget : 227 000 € TTC dont 107 710 € TTC de subvention du service de la recherche du ministère chargé du développement durable.

Coordinateurs :

Sandrine Maljean-Dubois, directeur de recherche au CNRS

Directrice du CERIC

Espace René Cassin, 3, avenue Robert Schuman, 13628 Aix-en-Provence cedex 1.

Mail : maljean.dubois@gmail.com

Matthieu Wemaere

Institut du développement durable et des relations internationales, 27, rue Saint-Guillaume, 75337 Paris Cedex 07 France

Mail : matthieu.wemaere@gmail.com

Mots clés :

Changements climatiques, négociations internationales, relations internationales, droit international, protocole de Kyoto, convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques, forêts, commerce international, Organisation mondiale du commerce, Union européenne.

Objectifs des recherches :

Notre équipe a fait l'hypothèse qu'une lecture juridique des enjeux fondamentaux de ces négociations permettrait utilement d'éclairer la compréhension des blocages et de contribuer à la réflexion sur une issue positive. La restitution de notre recherche est organisée en cinq chapitres correspondant à cinq enjeux fondamentaux dont l'analyse a fait l'objet du rapport :

- Négociations et structuration juridique d'un nouvel accord.
- La portée du principe des responsabilités communes mais différenciées dans les négociations du post-2012.
- Les approches sectorielles.
- La contrainte (et les flexibilités) du droit de l'OMC dans la conception d'un nouveau régime.
- Le contrôle de la mise en œuvre et la sanction du non-respect dans le nouveau régime : évolution ou adaptation de l' "observance".

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

Chacun de ces enjeux pouvant faire l'objet d'un traitement relativement distinct, cinq groupes de travail ont été constitués et ont travaillé sous la direction d'un responsable.

L'analyse conduite a été principalement juridique (recherches bibliographiques, entretiens, observation in situ des négociations), mais en tant que de besoin, les membres de l'équipe ont collaboré avec des chercheurs d'autres disciplines, notamment de la science politique et de la science économique. Ainsi, l'équipe a organisé différentes manifestations pluridisciplinaires :

- un séminaire à Aix-en-Provence sur "Comment impliquer davantage les entreprises dans les politiques climatiques ? Entre autorégulation et corégulation" associant juristes et économistes, praticiens et chercheurs et enseignants chercheurs (mai 2010) ;
- un séminaire à l'institut d'études politiques de Paris en partenariat avec l'université de Genève sur "Le mécanisme d'inclusion carbone (MIC) à la lumière des règles de l'Organisation mondiale du commerce" associant juristes et économistes, et croisant là encore le regard du praticien avec celui du chercheur ou enseignant-chercheur (octobre 2010) ;
- un séminaire de travail, cette fois interne à l'équipe, avec Amy Dahan-Dalmedico, directrice de recherche au CNRS, spécialiste des négociations internationales sous l'angle de la sociologie des sciences (Aix-en-Provence, CERIC, octobre 2010).



Le colloque de restitution s'est déroulé durant deux journées à Paris (Institut d'études politiques) les 26 et 27 janvier 2012.

1. Architecture juridique du régime international du climat post 2012

Le régime international du climat se construit par étapes. La convention elle-même, qui compte aujourd'hui 194 Parties[1] ne contient que des obligations très générales. En tant que Convention *cadre,* elle a été complétée en 1997 par le Protocole de Kyoto, instrument venant préciser les engagements de réduction des gaz à effet de serre qui compte aujourd'hui 196 Parties mais ne contient d'engagements de réduction des émissions de gaz à effet de serre que pour une première période se terminant en 2012, laissant la suite (qui paraissait encore bien lointaine lorsque le Protocole a été adopté en 1997) entièrement à construire. La forme et le contenu des engagements pour une deuxième période d'engagement restaient donc à définir.

Les négociations du "post-2012", en réalité ouvertes dès 2005, lors de la première Réunion des Parties au Protocole[2], ont été officiellement lancées lors de la Conférence de Bali (2007), qui a abouti, à l'issue de négociations difficiles, à une "feuille de route", dont le "plan d'action de Bali" constituait l'élément central[3]. Il prévoyait l'adoption d'un accord global lors de la conférence de Copenhague en décembre 2009 définissant une *"vision commune de l'action concertée à long terme, notamment à un objectif global à long terme de réduction des émissions, pour atteindre l'objectif ultime de la Convention, conformément aux dispositions de cet instrument et aux principes qui y sont énoncés, en particulier le principe des responsabilités communes mais différenciées et des capacités respectives, et compte tenu des conditions sociales et économiques et des autres facteurs pertinents"* [4]. Le plan d'action précisait encore qu'il devait notamment être tenu compte des "différences existant dans la situation de chaque pays" dans la définition des engagements d'atténuation[5].

S'il impulsait un nouvel élan aux négociations, destinées à aboutir deux ans plus tard lors de la conférence de Copenhague, cette "feuille de route" était vague et peu ambitieuse. Fruits d'un compromis délicat, les négociations restaient très ouvertes que ce soit sur la forme (le Plan d'action évoque simplement la nécessité de parvenir d'un "commun accord à un résultat") ou sur le fond (aucun objectif chiffré de réduction, que ce soit à moyen ou à long terme n'était précisé) et aboutirent à un résultat relativement décevant sur le fond et sur la forme.

Sur la forme, on notera que le "résultat" de la Conférence n'est pas le "agreed outcome" recherché depuis Bali, mais un ensemble de décisions de la Conférence des Parties (à la Convention) et de la Réunion des Parties (au Protocole), la première ayant simplement pris note de l'"Accord de Copenhague"[6]. La procédure d'adoption de l'Accord, et même au-delà et plus largement les négociations de

1http://unfccc.int/essential_background/convention/status_of_ratification/items/2631.php, consulté le 18 mai 2015.

2 Conformément à l'article 3§9 du Protocole.

3 Voir la Décision 1/CP.13, *in* Décisions adoptées par la Conférence des Parties, FCCC/CP/2007/6/Add.1, 14 mars 2008, p. 3.

4 §1 a).

5 § 1b) i). Voir aussi le v).

6 Voir la Décision 1/CP.15 http://unfccc.int/2860.php, consulté le 24 novembre 2010.

Copenhague, ont été tout sauf équitables. Marginalisation des petits États par des négociations *off,* exclusion de la société civile, nombreuses maladresses de la présidence danoise… Alors que le résultat était âprement négocié depuis de nombreuses semaines en *in* dans les deux groupes de travail (AWG), que la COP-MOP était réunie, l'Accord a été négocié en *off* par cinq pays, accepté par une vingtaine, puis soumis quelque peu cavalièrement à la COP-MOP pour adoption, ce qui a suscité l'indignation légitime de nombreux États. La Conférence des Parties a refusé de l'endosser en l'absence d'un consensus pour cela, certains États (Tuvalu, le Soudan, les pays de l'Alliance bolivarienne) mettant en avant à la fois le caractère inéquitable du processus (restreint, non démocratique, non transparent) et du résultat (pas suffisamment ambitieux, le Soudan parlant d'un génocide organisé de l'Afrique). L'Accord de Copenhague est donc un accord politique, non juridiquement obligatoire, resté en outre un temps "en dehors" du champ conventionnel, même si lui-même, prenait "note" "les résultats des travaux effectués par les deux groupes de travail spéciaux" fonctionnant l'un dans le cadre de la Convention-cadre ("AWG-LCA"), l'autre ("AWG-KP") dans le cadre du Protocole, groupes de travail dont le mandat a été prolongé une première fois jusqu'à la réunion de Cancún en novembre-décembre 2010.

Après Copenhague, la Conférence de Cancún a, en 2010, donné "a new lease of life" au régime climat[7]. Sur le plan formel, cette réunion a donc marqué une étape en permettant la "c*onventionnalisation*" des éléments principaux de l'Accord de Copenhague, lesquels figurent désormais dans une décision de la Conférence des Parties adoptée par consensus. Mais sur le fond les objectifs en matière de réduction d'émissions et d'atténuation présentés par les États membres après Cancún ne suffiront pas à atteindre l'objectif à long terme de la Convention. Les groupes de travail ("AWG-LCA" et "AWG-KP") ont vu à nouveau leur mandat prolongé jusqu'à la conférence de Durban en novembre-décembre 2011, puis lors de la Conférence de Durban, jusqu'à celle de Doha. Le "agreed outcome" recherché depuis Bali devrait donc être adopté à cette occasion. Parallèlement, lors de la Conférence de Durban, le principe de la continuation du Protocole de Kyoto pour une seconde période d'engagement a été décidé, même si les détails opérationnels restent encore à fixer (durée, application provisoire en attendant l'entrée en vigueur du Protocole révisé, niveau d'ambition des engagements de réduction des émissions). Enfin, des négociations ont été lancées pour un futur accord qui devrait entrer en vigueur en 2020 au plus tard et regrouper l'ensemble des gros émetteurs ; un nouveau forum de négociation va être mis en place à cet effet. La forme juridique (obligatoire ou incitatif) et le contenu de ce nouvel accord (approche *"bottom up pledges and review"* ou "top dow command and control"*),* ainsi que le niveau d'ambition qu'il marquera, sont encore largement incertains.

Sur le fond, les décisions adoptées lors de la Conférence de Durban mettent en lumière une situation d'urgence et soulignent la nécessité d'accroître singulièrement le niveau d'ambition des promesses de réduction des émissions de GES afin d'atteindre l'objectif de limiter l'augmentation de la température globale à 2°C. Le principe d'une **continuation du Protocole de Kyoto** pour une deuxième période d'engagement est acté, même si toutes les questions délicates que soulève cette continuation n'ont pas été réglées. De nouvelles négociations sont lancées en faveur d'un **accord plus global, associant l'ensemble des émetteurs, à l'horizon 2020**. La forme juridique – sera-t-il obligatoire ou purement incitatif pour les États ? – de ce nouvel accord reste à déterminer, tout comme son contenu – jusqu'où s'inspirera-t-il du Protocole de Kyoto ou bien de l'approche *"pledges and review"* beaucoup plus souple que reflètent l'Accord de Copenhague et les Accords de Cancun ?

2. Principe des responsabilités communes mais différenciées

Le **principe des responsabilités communes mais différenciées** a joué un rôle majeur dans les négociations du post-2012 et va demeurer structurant dans les négociations du post-2020. La Convention-cadre de 1992 et le Protocole de Kyoto de 1997 ont représenté un compromis sur ce qu'impliquait alors concrètement le principe en termes d'engagements des pays développés et en développement. La montée en puissance des pays émergents a conduit à la remise en cause de ce compromis initial. Or, jusqu'à présent, le point d'équilibre entre les prétentions contradictoires des États n'a pas été retrouvé. Paradoxalement, le principe des responsabilités communes mais différenciées qui a permis de trouver un accord sur un régime international du climat dans les années 90, a contribué au grippage des négociations du post-2012. De ce point de vue, force est de constater que la plateforme de Durban pour les négociations du post-2020 ne se réfère plus au principe, ce qui laisse entrevoir un assouplissement des lignes.

3. Approches sectorielles

Dans ce contexte très évolutif, le modèle classique de l'action publique visant principalement à contraindre les acteurs économiques à prendre des mesures pour contribuer à la réalisation d'un objectif chiffré de réduction des émissions nationales (approche "par les normes") révèle ses limites. Les **entreprises** doivent être impliquées et s'impliquer elles-mêmes davantage dans la lutte contre le changement climatique : d'abord pour contribuer effectivement à la réduction de leurs émissions de GES à la hauteur des enjeux et en fonction de leurs responsabilités et capacités respectives ; ensuite parce qu'elles sont les acteurs de leur propre transformation vers des modes de production durable qui s'intégreront à l'avenir dans des économies faiblement carbonées, et ce dans un contexte mondialisé de plus en plus concurrentiel. Responsabilité sociale de l'entreprise (RSE), normalisation et certification, compensation volontaire et finance carbone, accords volontaires, approches sectorielles à l'échelle internationale : l'implication des entreprises se concrétise par le recours à une grande diversité d'outils. De ce point de vue, certains outils, comme les **approches sectorielles**, sont vraiment innovants au regard du droit international classique. Elles cachent elles-mêmes une grande variété d'instruments.

7 RAJAMANI, *op. cit.* note 117, p.519.

4. Climat et droit du commerce international

La question de l'articulation voire de la complémentarité entre le droit du commerce international et le droit international des changements climatiques se pose avec une grande acuité. Le principe d'un soutien mutuel, fondé sur la nécessaire cohérence entre les instruments juridiques internationaux, est envisagé comme un principe fondamental qui doit lui-même être articulé avec les principes de développement durable, d'évaluation des risques, du traitement différencié et de non-discrimination. L'établissement de "passerelles" normatives, telle la normalisation technique, est envisagé. Il s'avère toutefois impérieux de mener un travail de définition sur les conditions de fabrication des normes internationales, encore très peu encadrées.

5. Contrôle de la mise en œuvre et sanction du non-respect

La question du contrôle de la mise en œuvre et des sanctions pour non-respect soulève également d'importants enjeux. Le mécanisme élaboré et relativement intrusif de l'observance, mise en place dans le cadre du Protocole de Kyoto, devrait être poursuivi durant la deuxième période d'engagement. Mais il ne concerne plus potentiellement que 35 Parties – dont l'UE. Pour l'ensemble des 195 Parties, en attendant l'entrée en vigueur du futur accord, un mécanisme de contrôle plus souple dit "MRV" est en cours d'élaboration et d'expérimentation. De nombreuses inconnues demeurent et il est difficile d'affirmer s'il permettra réellement de garantir la transparence et la comparabilité des *"pledges"* des Parties. Quant au post-2020, il serait souhaitable que le nouvel accord fasse fond sur les "acquis" du Protocole de Kyoto.

II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

La dimension juridique est particulièrement déterminante dans les négociations du "post-2012". Elle était pourtant très peu abordée jusqu'alors dans les travaux académiques, en particulier francophones.

Innovante à ce niveau, la collaboration entre un laboratoire de recherche, le CERIC, dont les qualités des travaux en droit international de l'environnement est largement reconnue en France comme à l'étranger, et un *think tank* tel que l'IDDRI, dont plusieurs membres sont impliqués à un titre ou un autre dans les négociations, a garanti à la fois la pertinence des questions de recherche et la réalité du transfert des résultats aux "décideurs".

Cette collaboration, qui a connu plusieurs temps forts lors des séminaires organisés et notamment lors du séminaire final de restitution à Paris, auquel ont participé plusieurs négociateurs français, a ouvert les voies d'une recherche-action particulièrement dynamique et fructueuse.

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

Organisation de conférences et colloques

Séminaire CERIC-Iddri Aix-en-Provence *Comment impliquer davantage les entreprises dans les politiques climatiques ? Entre autorégulation et corégulation* (3-4 mai 2010).

Conférence-débat de Lavanya Rajamani, Professeur au Centre for Policy Research à New Delhi, *The Making and Unmaking of the Copenhagen Accord* (9 juillet 2010).

Conférence-débat, *Le Mécanisme d'inclusion carbone (MIC) à la lumière des règles de l'Organisation mondiale du commerce*, Sc. Po. Paris (7 octobre 2010).

Conférence-débat de Amy Dahan-Dalmedico, Directrice de recherche CNRS, *Les arènes climatiques et la gouvernance internationale*, Aix-en-Provence, 21 octobre 2010.

Colloque de restitution, *Les enjeux des négociations du futur régime international du climat*, Paris, Sciences Po Paris (26-27 janvier 2012).

Publications

Boisson de Charzournes L., Mbengue M., 2011. "A Footnote as a Principle. Mutual Supportiveness in an Era of Fragmentation", *In* Holger P. Hestermeyer et *al*. (eds.), Coexistence, Cooperation and Solidarity – Liber Amicorum Rüdiger Wolfrum, vol. II, Springer, pp. 1615-1638.

Boisson de Chazournes L., 2011. "Features and Trends in International Environmental Law", *In* The Transformation of International Environmental Law, Y. Kerbrat et S. Maljean-Dubois (eds.), Pedone & Hart, Paris et Londres, pp. 9-20.

Boisson de Chazournes L., 2010. "La protection du climat en droit international – Éléments d'un régime juridique en émergence", Revue Suisse de droit international et européen, 3/2010, pp. 339-360.

Boisson de Chazournes L., 2010. "La protection internationale du climat – état des lieux et enjeux", *In* Droit de l'environnement dans la pratique, Association pour le droit de l'environnement, 8/2010, Zurich, pp. 795-809.

Kerbrat Y, Maljean-Dubois S. (dir.), 2010. Le droit international face aux enjeux environnementaux, Actes du colloque de la Société française pour le droit international, S. Maljean-Dubois et Y. Kerbrat (collab.), Aix-en-Provence, Pedone, Paris, 489 p.

Kerbrat Y., Maljean-Dubois S. (dir.), 2011. The transformation of international environmental law, S. Maljean-Dubois, Y. Kerbrat (dir.), Hart Publishing, Pedone, 304 p.

Lanfranchi M.-P., 2010. "Le statut des pays en développement dans le régime climat : le principe de la dualité des normes revisité ?, *In :* Société française pour le droit international : "Le droit international face aux enjeux environnementaux", Colloque d'Aix-en-Provence, juin 2009, Pedone, juin 2010, pp. 277-295.

Lanfranchi M.-P., “The Status of Developing Countries in the Climate Regime: The Principle of the Duality of Norms Revisited ?”, *In* S. Maljean-dubois et Y. Kerbrat (ed.), International Law faced with Environmental Challenges, Pedone / Hart publishing, 2010.

Maljean-Dubois S., Richard V.,“The Drafting of the Future International Climate Regime: From the Copenhagen Accord to the Cancún Accords”, *In* J.-B. Saulnier, M. Varella (dir.), Global change, Energy Issues & Regulation Policies, Springer, 2012.

Maljean-Dubois S., “An Outlook for the Non-Compliance Mechanism of the Kyoto Protocol on Climate Change”, Amsterdam Law Forum, n°2/2010, pp. 77-80, [en ligne]: http://ojs.ubvu.vu.nl/alf/article/view/133/255.

Maljean-Dubois S., “L’observance du Protocole de Kyoto sur les changements climatiques : les enjeux du contrôle international du respect des engagements”, *In* M. Falque, H. Lamotte (dir.), Changement climatique et pollution de l’air. Droits de propriété, économie et environnement, Bruylant, 2010, pp. 221-230.

Maljean-Dubois S., Rajamani L. (dir.), La mise en oeuvre du droit international de l’environnement / Implementation of International Environmental Law, S. Maljean-Dubois, L. Rajamani (dir.), (écriture de la préface et du rapport introductif en collaboration avec Lavanya Rajamani (bilingue, anglais et français)), Académie de droit international de La Haye, Martinus Nijhoff Publisher, 2011, 812 p.

Maljean-Dubois S., Roger A. (dir.), L’implication des entreprises dans les politiques climatiques. Entre corégulation et autorégulation, S. Maljean-Dubois, A. Roger (dir), la Documentation française, 2011, 212 p.

Maljean-Dubois S., Tabau A.S., “From the Kyoto Protocol Compliance System to MRVs: What is at Stake for the European Union ?”, *In* J. Brunnée, M. Doelle, L. Rajamani (dir.), A Compliance System for the Post-2012 Climate Change Regime, *Cambridge University Press, 2011*.

Maljean-Dubois S., Tabau A.S., “Non-compliance Mechanisms: Interaction between the Kyoto Protocol System and the European Union”, European Journal of International Law, 2010, vol. 21, pp. 749-763.

Maljean-Dubois S., Wemaere M., “L’Accord de Copenhague : quelles perspectives pour le régime international du climat ?”, Revue du droit de l’Union Européenne, n°1/2010, pp. 5-40.

Maljean-Dubois S., Wemaere M., La diplomatie climatique : les enjeux des négociations internationales (Prix Claude Berthault, Académie des sciences morales et politiques, Institut de France), Pedone, Paris, 2010, 378 p.

Sindico F., “Climate and Trade in a Divided World: Can Measures Adopted in the North End Up Shaping Climate Legislative Frameworks in the South?”, *In* Y. Le Bouthillier, H. McLeod-Kilmurray, B. Richardson and S. Wood (Eds.), Cheltenham, Edward Elgar, 2009, pp. 361-385.

Sindico F., “Post 2012 Compliance and Carbon Markets”, *In* J. Brunnée, M. Doelle and L. Rajamani (dir.), A Compliance System for the Post-2012 Climate Change Regime, Cambridge University Press, Cambridge.

Sindico F., “The Copenhagen Accord and the future of the international climate change regime”, 1.1 Revista Catalana de Dret Ambiental (2010), pp. 1-24 ([en ligne] http://www.rcda.cat/index.php/rcda/article/viewFile/35/138).

Sindico F., “Why comply when others are not bound? Emissions Trading, Carbon Leakage and Trade Measures”, *In* L. Rajamani and S. Maljean Dubois (Eds.), The Implementation of Environmental Law, The Hague, The Hague Academy of International Law, 2011.

Sindico F., "Post 2012 CDM and Like Products: A Climate and Trade Perspective (title TBC)" to be submitted to one of the following journals: Climate Law, Transnational Environmental Law or a trade journal (World Trade Review, Journal of World Trade or Journal of International Economic Law) in February 2012.

Sindico F., Mehdi A., "Post 2012 Climate and Trade Governance (title TBC)" to be submitted to Climate Policy in February 2012.

Tabau A.-S., “L’observance du Protocole de Kyoto : nouvelle figure de l’expertise”, *In* E. Truilhé- Marengo (dir.), La relation juge-expert dans les contentieux sanitaires et environnementaux, La Documentation française, 2011, pp. 177-198.

Tabau A.-S., “Certainties, Omens and Grey areas of the European Union Emissions Trading Scheme (EU-ETS) after 2012”, *In* C. Fabregoule and M. Cygler (ed.), Companies on Climate Change, (*à paraître en 2012*).

Tabau A.-S., “Les perspectives ouvertes par le contrôle du respect des engagements en matière climatique”, in Société française pour le droit international (SFDI), Le droit international face aux enjeux environnementaux, Pedone, Paris, 2010, pp. 297-316.

Tabau A.-S., “New Perspectives from the Climate Regime for Compliance Control in Environmental Matters”, *In* Y. Kerbrat and S. Maljean-Dubois (eds.), The Transformation of International Environmental Law, Oxford-Paris, Pedone-Hart, 2011, pp. 305-320.

Tabau A.-S., “Prospects offered by the compliance control system of the climate change regime”, *In* S. Maljean-Dubois and Y. Kerbrat (ed.), International Law and Environmental Challenges, French Society of International Law, Pedone/Hart, 2011.

Tabau A.-S., *La mise en oeuvre du Protocole de Kyoto en Europe, interactions des contrôles international et communautaire*, Bruxelles, Bruylant, 2011, 519 p.

Wemaere M., "Current Developments" Carbon&Climate Law, CCLR, coll. Leonardo Massai 01/2010, 10 p. (collab. Leonardo Massai, Megan Ceronsky).

Wemaere M., “Post-2012 Climate Change Agreement: Why MRV is important”, Idées pour le débat N° 07/2009, Iddri, 2009.

Wyatt J., “Using GATT Flexibilities to Produce a WTO-

Consistent Shift Toward More Climate-Friendly Consumption Patterns: An Analysis of GATT Article III from the Perspective of Greenhouse Gas Consumption Taxes" (*à paraître 2012*), disponible sur http://ssrn.com/paper=1959367, 44p.

Wyatt J., "Mitigating Failed Attempts at Mitigation: Using Unilateral Consumption-Based Measures to Remedy the UNFCCC / Kyoto System's Failure to Stabilise Global Greenhouse Gas Emissions"", (*à paraître 2012*), disponible sur http://ssrn.com/paper=1965249, 25p.

Wyatt J., "Trade and the environment: The WTO's efforts to balance economic and sustainable development", *In* Economie, Environnement Ethique, de la responsabilité sociale et sociétale, R.T. Trindade, P. Henry and C. Bovet (éd.), Liber Amicorum Anne Petitpierre-Sauvain, Zurich/Bâle/Genève, Schulthess, 2009, pp. 225-235. (collab. G. Marceau.

ECONOMIE INDUSTRIELLE DES ACCORDS SECTORIELS

PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Date d'engagement : 1er septembre 2009

Montant du budget : 105 000 € HT dont 52 500 € HT de subvention de l'ONERC du ministère en charge du développement durable.

Coordinateurs :

Matthieu Glachant

Cerna, MINES ParisTech, 60, boulevard Saint Michel, 75006 Paris

Mail : matthieu.glachant@mines-paristech.fr

Noms et organismes des autres partenaires scientifiques bénéficiaires :

Yann Ménière, Philippe Jacquet : CERNA, MINES ParisTech

Mots clés :

Climat, négociations climatiques, protocole de Kyoto, mécanisme de développement propre, accords sectoriels, transfert international de technologie, concurrence.

Objectifs des recherches :

L'objectif de ce projet d'économie industrielle des accords sectoriels est triple. Il s'agit de :

- Recenser, évaluer et comparer les différents scénarios d'accords sectoriels possibles;
- Étudier, à partir d'analyses théoriques et d'études empiriques, comment la prise en compte des questions d'innovation et de diffusion de technologie dans les accords sectoriels peut affecter leur attractivité et leur efficacité;
- Tirer des enseignements et des recommandations sur le "design" d'accords sectoriels.

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

Introduction

L'architecture proposée par le protocole de Kyoto à la fin des années 1990 ne servira a priori pas de modèle pour le futur régime international de lutte contre le changement climatique. Elle n'est en effet pas acceptée par les pays émergents comme la Chine ou l'Inde et les États-Unis. Cette approche consistant à fixer des objectifs nationaux de réduction des émissions est aussi critiquée pour le manque de solutions concrètes qu'elle propose pour évaluer les potentiels de réduction. Enfin, la question du transfert de technologie est peu abordée, si ce n'est à travers la mise en place du Mécanisme de développement propre (MDP), pour lequel le transfert et le déploiement de technologies propres n'est qu'un objectif secondaire. Or une large diffusion de technologies sobres en carbone est un facteur décisif pour atteindre à un coût raisonnable des objectifs ambitieux de limitation des émissions, notamment dans les pays émergents.

Le concept d'approche sectorielle a émergé depuis quelques années, avec pour but de remédier à certains de ces défauts. Il s'appuie sur l'idée selon laquelle les pays n'ayant pas souscrit d'engagement dans le cadre du protocole de Kyoto seraient plus enclins à accepter un accord à l'échelle d'un secteur plutôt qu'un engagement national. Le périmètre sectoriel semble également bien adapté pour traiter les questions de concurrence internationale entre pays réglementés et pays non réglementés, et pour faciliter le transfert et le déploiement de technologies.

L'objectif de cette étude est de développer une analyse d'économie industrielle des accords sectoriels susceptibles d'être conclus dans la période post-2012. Un accord sectoriel est défini très simplement comme un dispositif reposant sur l'accord entre les parties qui visent à limiter les émissions de gaz à effet de serre dans un secteur d'activités particulier (par exemple, la sidérurgie, le secteur électrique, le transport aérien). Au-delà de cette définition très générale, les accords sectoriels peuvent prendre des formes très variées en termes de périmètre géographique (national, régional, mondial), de parties prenantes à l'accord (des États ou des entreprises) et de contenu (recherche et développement (R&D) coopérative, partage de technologies, mécanismes de "*trading*", objectifs quantitatifs de réduction des émissions, *etc*.). Leur contenu et leur fonctionnement étant encore imprécis et sujets à débat, ce projet de recherche a donc une dimension essentiellement prospective et spéculative.

Le projet se concentre plus particulièrement sur l'effet potentiel des accords sectoriels sur l'innovation et la diffusion de technologies. Dans cette perspective, il traite ainsi les questions suivantes : quels sont les différents types d'accords sectoriels possibles ? Sur quels mécanismes incitatifs reposent-ils ? Comment affectent-ils l'innovation et la diffusion de technologies propres ? Quelles sont les incitations des industriels du Nord et du Sud à y participer ? Quels résultats en attendre en termes d'innovation et d'atténuation ?

L'étude comporte deux modules :

- Module 1 : Typologie des accords sectoriels ;
- Module 2 : Analyse théorique des projets sectoriels.

Module 1 : Typologie des accords sectoriels, méthodes et résultats

L'objectif du module 1 est d'analyser les mécanismes et variables économiques sur la base desquels sont structurés les accords sectoriels, pour proposer ensuite une typologie de ces accords. Cette démarche s'appuie sur une analyse des différents types d'accords sectoriels existants ou en projet, ainsi que sur une revue de la littérature sur ce sujet, qui s'est considérablement étendue au cours des dernières années dans le sillage des négociations climat. La formulation d'une typologie – appuyée autant que possible sur une analyse du contenu et des motivations des accords sectoriels à la lumière de la théorie économique – doit permettre d'identifier le potentiel, mais aussi les limites de ce type d'outils du point de vue des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Nous analysons dans un premier temps les mécanismes économiques pouvant justifier une approche sectorielle des politiques de réduction des émissions de GES. Nous considérons tout d'abord les relations concurrentielles et technologiques unissant les firmes d'un même secteur, et les besoins de coordination supplémentaires qu'elles peuvent engendrer. Nous discutons ensuite de l'opportunité de mettre en place à l'échelle sectorielle des mécanismes incitatifs tels que des permis négociables ou des systèmes de crédits carbone.

À la lumière de cette analyse, nous développons ensuite une typologie distinguant deux modèles d'accords très différents. Le premier modèle correspond à des initiatives de coopération transnationales entre industriels. Ce type d'accord peut être observé dans des secteurs globalisés et concentrés tels que le ciment, l'acier ou l'aluminium. Ils sont principalement axés sur le *benchmarking* et la collecte de données, dans une démarche d'anticipation et d'orientation des futures réglementations environnementales. À l'inverse, le second modèle correspond à des accords passés entre pays en voie de développement (PVD) et pays développés dans le cadre des négociations. Il vise à définir et implémenter des stratégies d'abattement adaptées à certaines industries dans les PVD, lorsque celles-ci sont marquées par un écart trop important vis-à-vis des *benchmarks* internationaux.

Nous montrons que ces deux types d'accord s'adressent à des industries et contextes de développement très différents, et sont en cela complémentaires. Si aucun de ces accords ne s'appuie directement sur des mécanismes de marché carbone, tous deux ont en revanche pour effets soit de préparer, soit de compléter la mise en place de tels mécanismes. Nous développons enfin, à partir d'une série d'indicateurs, une méthodologie visant à évaluer le potentiel de ces accords en termes de réduction des émissions de GES (voir section II, tableaux 2 et 3).

Module 2: Analyse théorique des projets sectoriels, méthodes et résultats

Ce second module du projet de recherche est consacré à des travaux de modélisation théorique de différents types d'accords sectoriels. Il vise à éclairer les interactions entre firmes dans le cadre de ces accords et leurs effets sur le développement et la diffusion de technologies. Il cherche à caractériser les résultats qui peuvent en être attendus en matière d'atténuation et les mesures de politique économique pouvant les accompagner. Plus spécifiquement, nous avons développé deux modèles.

Le premier modèle ("Environmental or R&D cooperation in transnational sectoral agreements") compare l'efficacité économique de deux types d'accords sectoriels transnationaux : un accord définissant des objectifs de réduction des émissions et un accord de coopération en R&D visant la création de nouvelles technologies de lutte contre le changement climatique.

	Transfert de technologie	**Systèmes Cap & Trade ou No-Lose**	**Mécanismes de développement propre (MDP)**
Efficacité économique	++ si une taxe ou un marché de carbone domestique. + si une norme domestique. 0 si une norme domestique et une collusion des entreprises sur la technologie.		
Effets distributifs	1) Défavorables aux pays développés si concurrence internationale, sinon neutre. 2) Difficilement ajustable.	1) Dépendent de la "*baseline*" ou de l'allocation initiale de permis. 2) Très facilement ajustable sans effet sur l'efficacité.	1) Très favorable aux PVD. 2) Non ajustable.

Tableau 1. Comparaison des propriétés économiques du transfert de technologie, de la connexion à un marché Cap and Trade international ou à un dispositif no-lose et du MDP

Nous montrons tout d'abord que la coopération en R&D est préférable à l'accord de réduction si (et seulement si) le bénéfice marginal de l'externalité d'apprentissage (*knowledge spillover*) est supérieur au dommage marginal de l'externalité environnementale. L'hétérogénéité entre pays a pour effet de réduire le bien-être quand elle concerne les préférences environnementales des pays, mais elle est neutre lorsqu'elle concerne leurs capacités de R&D. Cela suggère donc que la coopération technologique est mieux adaptée dans un contexte réel d'hétérogénéité entre pays.

Le second modèle (Comment compenser les efforts d'abattement d'un pays en développement : avec du transfert de technologie ou de l'argent ?) porte sur les accords sectoriels du type NAMAs ("Nationally Appropriate Mitigation Actions") et analyse les différents mécanismes permettant de récompenser des efforts de réduction des émissions par les PED. Plus spécifiquement, sont comparées les propriétés économiques de quatre mécanismes : un transfert de technologie, la connexion du PED (pays en développement) à un marché Cap and Trade (avec une allocation initiale de permis généreuse), la mise en place de dispositifs de *crediting* du type MDP et *no-lose*. Nous montrons que toutes les approches améliorent l'efficacité économique de la lutte contre le changement climatique, mais selon des modalités variées (voir Tableau 1).

II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Cette étude a principalement une visée prospective en vue d'éclairer les choix de politiques économiques dans le cadre des négociations en matière de lutte contre le changement climatique. Dans cette perspective, un premier acquis en matière de transfert a été de nourrir la réflexion des responsables des marchés carbone à la direction générale de l'environnement et du climat (DGEC), qui ont suivi l'ensemble de notre travail.

Le développement d'une typologie des accords sectoriels et

les analyses théoriques réalisées dans le cadre de l'étude nous ont notamment conduit à établir une grille d'évaluation de l'impact des différents accords sectoriels recensés dans notre typologie, notamment en matière d'atténuation des émissions de GES. Cette grille s'appuie sur la liste de six critères établis par l'OCDE pour évaluer les politiques environnementales, et peut être étendue à de nouvelles formes d'accords :

- Efficacité environnementale (1) : ambition environnementale.
- Efficacité environnementale (2) : atteinte des objectifs environnementaux.
- Minimisation des coûts d'abattement et efficacité allocative.
- Incitations à l'innovation et au partage de technologies.
- Efficacité sur le plan administratif.
- Aspects politiques.

Chaque critère est renseigné dans les tableaux 2 et 3, afin d'évaluer l'efficacité des deux modèles d'accords sectoriels en matière de réduction des émissions de GES.

Critère d'évaluation	Applications aux initiatives existantes (Worldsteel, CSI, IAI, Partenariat Asie-Pacifique)
Efficacité environnementale (1) : – Ambition environnementale.	Engager les secteurs sur un sentier de croissance durable.
Efficacité environnementale (2) : – Implémentation des objectifs environnementaux.	Réductions d'émissions effectives limitées aux abattements "sans regret".
Minimisation des coûts d'abattement et efficacité allocative.	Faible effet direct à travers le partage des bonnes pratiques et le *benchmarking* technologique.
Incitations à l'innovation et au partage de technologies.	Faibles : démarche purement coopérative, sans dispositif spécifique d'incitation à la coopération.
Efficacité sur le plan administratif.	Le *benchmarking* des systèmes de mesures peut faciliter la mise en place de mécanismes de marché carbone transnationaux.
Aspects politiques.	Implication des industriels des PVD en amont de l'implémentation de politiques environnementales.

Tableau 2. Évaluation des initiatives transnationales des industriels

Le tableau 2 applique ces critères aux initiatives transnationales des industriels. Malgré l'ambition affichée d'engager les secteurs concernés sur un sentier de développement durable, il ressort tout d'abord que les retombées de ces initiatives en matière de réduction d'émissions de GES sont faibles. En l'absence de dispositifs incitatifs (taxe, subventions ou mécanismes de marché carbone), les accords entre industriels n'ont pas donné lieu à des efforts d'abattements supplémentaires significatifs. Les réductions d'émission sont ainsi limitées aux abattements "sans regret" réalisables à travers l'échange de bonnes pratiques. Pour les mêmes raisons, la coopération en matière de technologie semble se limiter pour l'essentiel à la promotion des meilleures technologies génériques, ou à la production d'information sur les technologies d'abattement existantes.

Dans ce contexte, les incitations des industriels à coopérer tiennent principalement à la possibilité d'influencer le futur design des réglementations sectorielles mais aussi, en partageant des informations sur les systèmes de mesures et les technologies disponibles, d'inciter les firmes des PVD à s'impliquer dans ce processus. Si ce travail de production d'outils de mesures et de collecte de données ne peut pas se substituer à celui des États, il peut le compléter utilement. Dans la mesure où il implique la construction d'un consensus entre industriels, il peut notamment faciliter la mise en place de réglementations ou de mécanismes de marché transnationaux, et contribuer ainsi à l'élimination des distorsions de concurrence.

Le tableau 3 propose une évaluation avec les mêmes critères des initiatives sectorielles des PVD (NAMAs). Ce type d'accord étant aujourd'hui en discussion, il n'est pas possible de juger sur pièce leur ambition environnementale. Celle-ci dépendra de l'issue éventuelle des négociations climat, et du niveau d'effort que chaque PVD sera prêt à consentir. La possibilité de décider au cas par cas de la

nature de leurs engagements dans une logique bottom-up, et l'obtention en contrepartie d'un soutien financier ou technologique axé sur les actions engagées, sont des facteurs favorisant l'engagement des PVD sur des objectifs plus ambitieux.

Critère d'évaluation	Applications aux NAMAs
Efficacité environnementale (1) : – Ambition environnementale.	Objectifs d'abattement déterminés contractuellement et au cas par cas dans le cadre des négociations internationales.
Efficacité environnementale (2) : – Implémentation des objectifs environnementaux.	Engagement des PVD sur des objectifs quantifiés. Cela dépend en dernier ressort de la volonté des États à respecter leurs engagements.
Minimisation des coûts d'abattement et efficacité allocative.	Politiques sectorielles nationales isolées, dans un logique de transition vers des mécanismes transnationaux. Limitation des effets redistributifs potentiels des mécanismes de marché carbone. Prise en compte des besoins spécifiques de *capacity building* au niveau de chaque secteur.
Incitations à l'innovation et au partage de technologies.	Contributions ex-ante des pays développés aux politiques sectorielles d'abattement dans les PVD, sous forme de transfert de technologie.
Efficacité sur le plan administratif.	Définition d'objectifs et d'indicateurs adaptés aux contraintes locales en matière de mesure des émissions et de collecte d'information.
Aspects politiques.	L'approche bottom-up rend plus acceptable pour les PVD le fait de s'engager sur des objectifs quantifiés.

Tableau 3. Initiatives sectorielles des PVD (NAMAs)

Si des accords de ce type sont effectivement conclus, et en l'absence de mécanismes de sanctions crédibles entre États, leur implémentation dépendra également en dernier ressort de la volonté des États concernés. Dans cette perspective, le fait que les engagements contractés par les PVD portent sur des objectifs quantifiés, et qu'ils aient pour contrepartie des contributions financières et technologiques des pays développés dans le cadre des actions entreprises, sont néanmoins des facteurs favorisant une implémentation effective des objectifs.

S'agissant du contenu des actions entreprises, la mise en œuvre d'actions sectorielles unilatérales ou soutenues dans des secteurs spécifiques ne va pas, à court terme, dans le sens d'une harmonisation internationale des réglementations environnementales. De ce fait, elles n'impliquent pas une allocation efficace des coûts d'abattement. À plus long terme, ces actions s'inscrivent toutefois dans une logique de transition des industries concernées vers les standards internationaux d'efficacité environnementale – en intégrant les problèmes de mesure des émissions et de capacity building qu'une telle transition implique. Elles pourraient donc à terme aboutir à l'intégration de ces secteurs à des mécanismes de marché transnationaux – comme l'illustre la troisième catégorie de NAMAs reposant sur des mécanismes de flexibilité.

Cette stratégie de rattrapage présente de plus l'avantage de limiter les effets redistributifs des mécanismes de marché transnationaux, en les réservant aux secteurs des PVD dont les coûts marginaux d'abattement sont comparables à ceux des pays développés. Elle se prête également bien à des transferts de technologies bien définis et ciblés – auxquels

s'engagent les pays développés – dans une logique de rattrapage technologique. Enfin, elle permet d'ajuster le cadre réglementaire et la formulation des objectifs aux contraintes locales en matière de mesure, reporting et vérification des émissions – ce qui va dans le sens d'une meilleure efficacité administrative.

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

Articles scientifiques

Glachant M., Nicolai J.-P.: "Innovation and abatement commitments in climate treaties". In Conference of Environmental Economics, 3 octobre 2012, Paris, Collège de France.

Glachant M, Jacquet P.: "Environmental or R&D cooperation in transnational sectoral agreements". In Conférence Mondiale de l'Economie de l'Environnement, Montréal, 28 juin au 2 juillet 2010. Environmental and Resource Economics.

Livres de vulgarisation

Crifo P., Glachant M., Hallegatte S., Laurent E., Raphaël G., 2012. "Pour une politique industrielle et d'innovation technologique", pp 43-57. In L'économie verte contre la crise : 30 propositions pour une France plus soutenable". Presses Universitaires de France, Paris, 170 p.

Rapport de fin d'étude

Jacquet P., 2009. "Les approches sectorielles", mémoire de master EDDEE, université de Paris 10-Nanterre, 65 pages. Paris.

Expertises

Participation en 2011 de Matthieu Glachant au "comité Trajectoires 2020 – 2050 : vers une économie sobre en carbone" (présidé par Christian de Perthuis). Matthieu Glachant était en charge de la réflexion sur le transfert international des technologies à bas carbone.

Enseignements

Matthieu Glachant, création en 2011 d'un Cours d'économie de l'environnement à MINES ParisTech (Cycle Ingénieurs Civils).

Communication dans les médias

Pour un vrai printemps de l'économie verte ! Tribune publiée dans Libération, 10 juin 2012, Patricia Crifo, Matthieu Glachant, Stéphane Hallegatte, Eloi Laurent. Elle milite entre autres pour des accords sectoriels pour développer des politiques industrielles coopératives au niveau international.

ETEM-AR, MODÉLISER L'ATTÉNUATION ET L'ADAPTATION DU SYSTÈME ÉNERGÉTIQUE DANS UN PLAN CLIMAT LOCAL

PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Date d'engagement : 1er octobre 2010

Montant du budget : 181 828 € HT du ministère en charge du développement durable

Coordinateurs :

Haurie Alain Dr.

Prof. Honoraire Université de Genève, Directeur ORDECSYS, Place de l'Étrier 4, Chêne-Bougeries, 1224 Suisse.

mél : ahaurie@ordecsys.com

Noms et organismes des autres partenaires scientifiques bénéficiaires :

Babonneau Frédéric, Tarel Guillaume, Thénié Julien, Vial Jean-Philippe, Sté ORDECSYS.

Labriet Maryse Dr. ENERIS Environment Energy Consultants, société KANLO.

Lavaud Julien, ARPE, Maison de l'environnement.

Loulou Richard, Sté KANLO.

Riey Bénédicte Observatoire Régional de l'Energie MIdi-Pyrénées (OREMIP).

Mots clés :

Système énergétique régional, changements climatiques, coûts d'adaptation, politiques robustes, gestion du risque.

Objectifs des recherches

Dans le but d'appuyer les décideurs régionaux à identifier les mesures d'atténuation et d'adaptation appropriées dans le secteur de l'énergie, le présent projet visait à développer une démarche originale de modélisation du secteur de l'énergie à partir du modèle ETEM (Energie-Technologie-Environnement-Modèle) en y intégrant la vulnérabilité climatique (adaptation) et en tenant compte des incertitudes (robustesse) caractéristiques de la problématique des changements climatiques futurs. Une mise en œuvre pilote dans la région Midi-Pyrénées est proposée.

Les objectifs spécifiques sont :

- Identifier les choix technologiques, énergétiques et les investissements appropriés dans le secteur énergétique pour à la fois atténuer les émissions de gaz à effet de serre et adapter le système énergétique aux changements climatiques futurs.
- Réaliser une analyse coût/efficacité des mesures d'un plan climat local liées au secteur énergétique (production et transformation d'énergie, transport, habitat, bureaux, agriculture, gestion forestière) en élargissant le champ du modèle ETEM (*energy-technology-environment-model*).
- Explorer l'usage des techniques de modélisations stochastique et robuste qui tendent à recommander un portefeuille diversifié de mesures de précaution (*hedging*).

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

1. Introduction

La production et la consommation d'énergie occupent une place centrale dans les politiques d'atténuation face aux changements climatiques, étant donné leur contribution aux émissions. Le secteur de l'énergie occupe une place de plus en plus importante également dans les stratégies d'adaptation aux changements climatiques, compte tenu à la fois des impacts potentiels des changements climatiques et des interrelations entre atténuation et adaptation dans ce secteur : certaines mesures d'adaptation peuvent contribuer à l'accroissement des émissions (augmentation de la climatisation par exemple), tandis que des mesures d'atténuation peuvent augmenter la vulnérabilité climatique du système énergétique augmentation de l'hydroélectricité par exemple).

Le présent projet, appuyé par l'ADEME dans le cadre du programme GICC, s'inscrit dans ce contexte : aider les décideurs régionaux à identifier les mesures d'atténuation et d'adaptation appropriées dans le secteur de l'énergie (production et transformation d'énergie, transport, habitat, bureaux, industrie, agriculture). Pour cela une démarche originale de modélisation du secteur de l'énergie est proposée à partir du modèle ETEM en y intégrant la vulnérabilité climatique (adaptation) et en tenant compte des incertitudes (robustesse), caractéristiques de la problématique des changements climatiques. L'analyse vise à identifier les choix technologiques, énergétiques et les investissements appropriés dans le secteur énergétique pour à la fois atténuer les émissions de gaz à effet de serre et adapter le système énergétique face aux changements climatiques futurs.

2. Matériels et méthodes

Pour aider les collectivités à établir leurs plans climat, nous avons développé l'outil d'analyse d'activité ETEM-AR (modèle "bottom-up") permettant de conduire des analyses coût/efficacité en prenant en compte de manière explicite les activités d'atténuation et celles d'adaptation appliquées au système énergétique complet (incluant production/transformation d'énergie, habitat, transport, industrie, agriculture) et en cherchant à identifier des politiques robustes face à l'incertitude des impacts du changement climatique. Les développements méthodologiques qui ont conduit à l'outil ETEM-AR sont de plusieurs ordres.

La première étape consiste à recenser les impacts du changement climatique sur les demandes utiles (par exemple en produisant une croissance de la demande de climatisation) et sur les coefficients techniques des technologies de production (par exemple en modifiant la disponibilité des centrales nucléaires sous l'effet de l'augmentation de la température de l'eau requise pour le refroidissement, la disponibilité saisonnière des centrales hydroélectriques, etc.). L'étude de l'adaptation se fait alors en comparant des scénarios qui reflètent différents impacts possibles.

De manière complémentaire à une analyse par scénario, les choix énergétiques et technologiques peuvent aussi être évalués par une application de la programmation stochastique, représentant les impacts incertains du changement climatique sous forme d'arbre d'événements. Cette méthode a été utilisée avec succès dans la mise en œuvre réalisée pour la région Midi-Pyrénées.

Une deuxième étape consiste à introduire dans le modèle des indicateurs permettant de fournir une évaluation du degré de vulnérabilité de technologies et d'activités reliées au système de production, distribution et consommation de l'énergie. Les indicateurs ainsi construits peuvent alors intervenir dans une approche d'optimisation multicritère qui induit un effet de précaution dans l'élaboration de plans énergétiques. Cette approche a aussi été utilisée avec succès dans le cas de la région Midi-Pyrénées.

Une troisième étape consiste à construire des modules additionnels pour analyser de façon marginale les adaptations induites dans des secteurs connexes à celui de l'énergie. Dans le cadre d'ETEM-AR, nous avons détaillé un tel module, permettant de décrire l'adaptation du secteur agricole à l'introduction forcée d'une production de biomasse en vue de la production de biocarburant. Cette analyse marginale reste compatible avec la logique économique du modèle d'analyse d'activité pour le secteur énergétique. Elle permet donc de comparer les coûts d'opportunité de différentes options, en y incluant les nécessaires adaptations du secteur agricole. Une approche similaire pourrait être développée pour le secteur des forêts. Cette approche a été utilisée avec succès par l'équipe d'ORDECSYS dans un projet concernant une analyse de "cycle de vie conséquentiel" impliquant l'utilisation des sols dans le Duché de Luxembourg en vue de la production de biocarburant. Dans l'analyse du cas Midi Pyrénées, nous n'avons pas eu l'opportunité d'étendre l'analyse aux impacts de l'adaptation du système énergétique sur le secteur agricole et sur la sylviculture. Cependant l'outil d'analyse est disponible.

Enfin **le dernier développement** méthodologique concerne la mise en application de techniques de programmation stochastique et d'optimisation robuste dans ETEM-AR.

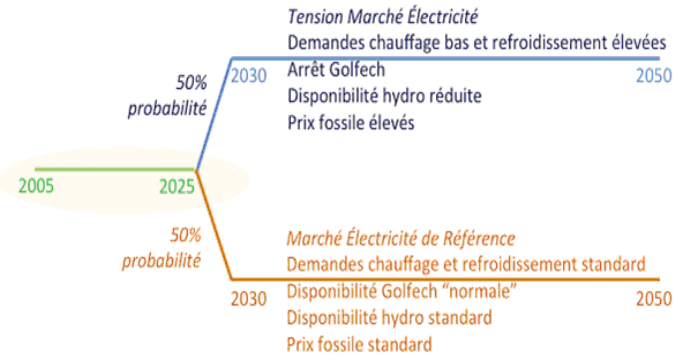


Figure 1 : Exemple de scénarios étudiés en programmation stochastique.

Les impacts du changement climatique sont largement incertains et de nombreux paramètres différents peuvent prendre des valeurs que l'on ne peut prédire totalement. L'optimisation robuste permet de trouver des politiques qui resteront quasi-optimales pour de larges ensembles de valeurs possibles pour ces paramètres. Ces recommandations "robustes" auront beaucoup plus d'attrait pour le décideur que celles qui ne reposent que sur l'analyse d'un seul scénario ou arbre d'événements à quelques branches. Nous pensons que les méthodes d'optimisation robuste devraient être systématiquement utilisées dans l'analyse des impacts du changement climatique sur le système énergétique d'une région. Cette approche a été appliquée avec succès à la région Midi Pyrénées.

3. Résultats

Une mise en œuvre pilote dans la région Midi-Pyrénées a été réalisée dans laquelle l'accent a été mis sur les changements possibles de demandes de chauffage et climatisation, ainsi que sur la vulnérabilité climatique de la production d'électricité. Cette région, l'une des plus grandes de France, est dotée, à travers l'observatoire régional de l'énergie (OREMIP), d'un système d'informations énergétiques détaillées, qui permet aux instances dirigeantes d'avoir une vision précise du secteur énergétique. Ces informations sont une condition nécessaire à l'élaboration d'un modèle énergétique. Ainsi, la collaboration avec la région Midi-Pyrénées s'est avérée particulièrement satisfaisante pour développer le système de référence énergétique de la région, nécessaire à l'application d'ETEM à la région, puis pour appliquer le modèle à différents scénarios. Outre les aspects " collecte de données", le choix de la région Midi-Pyrénées s'explique par le fait qu'au travers des compétences et des travaux de l'OREMIP, les différents acteurs locaux étaient suffisamment préparés pour entamer une réflexion globale sur l'avenir énergétique de leur région. L'existence d'un interlocuteur tel l'OREMIP s'avère être un élément essentiel pour réaliser une telle étude.

L'application de la modélisation ETEM-AR à la région Midi-Pyrénées met en lumière les étapes et les enjeux de l'implantation opérationnelle du modèle ETEM. Par exemple, nous pouvons mentionner i) la délicate collecte de données énergétiques nécessaires à la calibration du modèle, ii) la modélisation des systèmes énergétiques de leurs vulnérabilités, iii) l'identification des politiques d'adaptation et d'atténuation et finalement iv) la dissémination des résultats aux décideurs locaux. Cette application a également permis d'identifier les enseignements potentiels visant à appuyer les décideurs locaux dans l'atteinte d'objectifs d'atténuation des émissions tout en prenant en compte l'adaptation du secteur face aux impacts des changements climatiques, et les incertitudes s'y rapportant.

Par exemple, l'étude de cas pilote en Midi-Pyrénées montre comment l'augmentation de la demande en climatisation due aux changements climatiques peut résulter en une réorganisation du système énergétique (adaptation) au-delà du seul secteur résidentiel. Ainsi, l'augmentation de la température tend à augmenter la demande en électricité pour le refroidissement, qui peut résulter en des impacts induits dans l'industrie, notamment la substitution de l'électricité par du gaz.

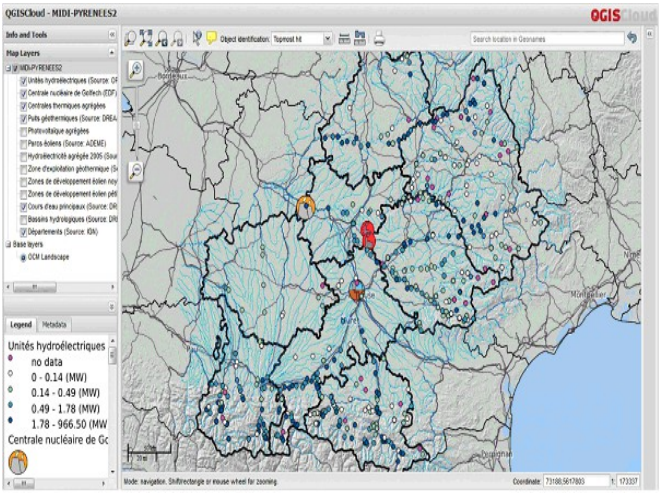


Figure 2 : Guichet cartographique interactif indiquant les différentes unités de production en Midi-Pyrénées.

De même, les transports peuvent être amenés à devoir contribuer plus largement aux réductions d'émissions pour compenser deux phénomènes annoncés : i) le cas de disponibilité réduite ou coûteuse de l'électricité, sous l'effet des changements climatiques et ii) la fermeture éventuelle de la centrale de Golfech. Plus précisément, la réduction des débits combinée à l'augmentation de la température des cours d'eau impactera à la baisse les rendements des centrales hydro et nucléaires, et par conséquent, se traduira par une augmentation du prix de l'électricité. Ce prix sera également influencé à la hausse par l'évolution des prix des énergies fossiles sur les marchés internationaux eux mêmes impactés par le changement climatique. Enfin, concernant les décisions sur le futur de la centrale, elles affecteront à la fois la région Midi-Pyrénées et la France entière puisque d'autres sources devront alors prendre le relais.

Finalement, le rôle du gaz naturel est mis en évidence pour réduire la vulnérabilité climatique du système énergétique ainsi que pour promouvoir une plus grande robustesse du système énergétique ; une atténuation renforcée des émissions dans le secteur des transports est alors nécessaire pour compenser l'augmentation d'émissions de gaz à effet de serre due à un usage croissant du gaz. Les premières analyses robustes réalisées dans cette étude ont donné des conclusions intéressantes. Premièrement et comme attendu, la prise en compte des incertitudes sur les technologies futures permet une plus grande diversification dans les investissements et par conséquent d'atténuer les effets bang-bang propres à la programmation linéaire[1]. Le décideur peut alors évaluer l'impact et la robustesse de ces décisions présentes sur une évolution du système énergétique plus réaliste et intégrant les incertitudes. Outre cette propriété de diversification, on observe une tendance à réduire la vulnérabilité globale du système énergétique en Midi-Pyrénées et à éviter les productions dites incertaines, notamment les énergies renouvelables (éolien et solaire).

1 L'effet bang-bang est le fait pour un modèle d'optimisation de changer radicalement les décisions pour de faibles variations des paramètres d'entrées.

L'incertitude entraîne une baisse attendue d'attractivité des énergies renouvelables et induit indirectement des effets néfastes sur les émissions de CO_2 dans les scénarios sans contrainte sur les émissions. Enfin, les analyses montrent que les surcoûts liés à la robustesse sont très limités et ce, quel que soit le scénario étudié.

4. Conclusions et perspectives

Reposant sur des outils libres et gratuits, l'approche méthodologique développée peut être répliquée à toute autre région, ensemble de régions, voire pays, sous condition de la disponibilité de données énergétiques et climatiques pour ces régions. Le mode opératoire pourrait être étendu à d'autres secteurs, tels que l'agriculture et les forêts, offrant la possibilité de mieux intégrer les usages concurrentiels de l'eau.



Un site internet[2] a été développé, incluant le mode opératoire complet et les analyses effectuées sur la région Midi-Pyrénées.

II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Un des résultats observés pour la région Midi-Pyrénées illustre particulièrement bien l'importance, pour les politiques publiques, de traiter de manière intégrée les enjeux d'adaptation et d'atténuation du secteur énergétique dans un plan climat local. En particulier, les analyses montrent le rôle important du gaz naturel pour réduire la vulnérabilité climatique du système énergétique ainsi que pour promouvoir une plus grande robustesse du système énergétique. Elles montrent également qu'une atténuation renforcée des émissions dans le secteur des transports est alors nécessaire pour compenser l'augmentation d'émissions de gaz à effet de serre due à un usage croissant du gaz naturel.

À l'issue du projet, l'OREMIP se montre intéressé à poursuivre la collaboration, sous réserve de financement, en vue d'évaluer les mesures mises en œuvre dans le cadre du SRCAE et de réviser ce dernier. La poursuite de la collaboration permettrait aussi d'approfondir certains aspects de la base de données, telles que la valorisation des déchets, certains usages énergétiques (irrigation, piscines), voire l'implantation des systèmes intelligents.

Par ailleurs, un site internet est maintenu par la société ORDECSYS. Il présente la genèse et la réalisation du projet, ainsi que les résultats obtenus. Une description opérationnelle des étapes à franchir pour réaliser une modélisation similaire dans une autre région est incluse dans le plan du site. Le modèle est facilement adaptable à de nouvelles régions et les sociétés KANLO et ORDECSYS vont le maintenir et l'exploiter (cf. expertises). Le modèle est proposé par différents consortiums en réponse à des appels d'offre concernant la mise en place d'un plan énergie-climat territorial dans des grandes régions de France.

En conclusion, ce projet a démontré qu'il était possible de mettre en œuvre un modèle de planification de l'adaptation à l'échelle du territoire qui permette la considération simultanée d'un ensemble de conditions climatiques futures, qui soit robuste, dans le sens où les politiques recommandées sont flexibles et ajustables, qui inclue les actions "sans regret" et les co-bénéfices liés à l'adaptation, qui soit intégré avec la planification de l'atténuation des émissions et du développement durable, qui prenne en compte les capacités d'adaptation offertes par les choix technologiques et qui se prête à une évaluation à l'aide de multiples critères. ETEM-AR n'est pas une "boîte noire" qui indique la "bonne politique", un fois que les bons paramètres sont fournis. Il s'agit plutôt d'un cadre méthodologique pour un processus qui, entrepris en étroite collaboration avec les parties prenantes lors de l'élaboration d'un plan climat territorial, permettra de faire apparaître et d'évaluer les arbitrages qui devront être effectués pour trouver une politique d'adaptation économique et efficace.

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

Articles scientifiques publiés, sous presse, soumis et en préparation

F. Babonneau, A. Haurie and J. Thénie, Assessing the Future of Smart Grid Technologies in Regional Energy Systems. Swiss Journal of Economics and Statistics.Vol. 148, Issue (Month): II (June). Pages: 229-273, 2012.

Ian Vázquez-Rowea, Antonino Marvugliaa, Julien Thénieb, Alain Haurie, Sameer Regea, Enrico Benettoa. Application of three independent consequential LCA approaches to the agricultural sector in Luxembourg, The International Journal of Life Cycle Assessment. (2013) 18 :1593-1604.

C. Andrey, F. Babonneau, A. Haurie, M. Labriet, (2014). Modélisation stochastique et robuste de l'atténuation et de l'adaptation dans un système Midi-Pyrénées ; article soumis à la revue Natures Sciences Sociétés.

2 http://etem-ar.ordecsys.com

Participations aux colloques nationaux ou internationaux (communication orale et poster)

Séminaire INCERTITUDES ET ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE, organisé par le GIS Climat-Environnement-Société, l'Association NSS Dialogues et le Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (programme GICC), 13 et 14 juin 2012 – 9h00-17h00. Espace Isadora Duncan, CNRS Délégation Nord et Ouest, Meudon.

EURO-XXV Vilnius Assises de l'énergie, Grenoble, 29-31 janvier 2013.

Participation à l'événement parallèle "Resilient Energy Policies", COP18, Doha, Qatar, Déc. 2012.

Expertises

ETEM-SG, contrat Office fédéral de l'énergie, Suisse, avec ORDECSYS. Développement d'une modélisation énergétique régionale avec focalisation sur le développement des réseaux intelligents comme instrument d'adaptation. Les modèles réalisés pour l'Arc Lémanique (ETEM-AL) et pour le canton de Berne (ETEM-BE) ont profité de la synergie créée par ETEM-MIP.

ERMITAGE (2010-2013), projet EU-FP7. ORDECSYS et KANLO font partie du consortium de ce projet européen. Ils ont contribué, en particulier à un workpackage consistant à réaliser une réduction d'échelle depuis un modèle intégré, énergie-climat, TIAM-WORLD, vers un modèle d'énergie national, ETEM-CH, puis un modèle d'énergie régional, ETEM-Arc-Lémanique. Cette réalisation s'inscrit aussi dans une synergie créée par ETEM-MIP.

LUCAS (2011-2013), projet du Centre de recherche publique TUDOR, Luxembourg, dans lequel ORDECSYS intervenait comme expert en modélisation technico-économique. Développement d'une modélisation de l'adaptation du secteur agricole, lors de l'introduction d'une production de bio-carburant. Forte synergie avec ETEM-AR

TIPEE (2010-2012). Projet de renforcement des capacités en matière de politiques énergétiques résilientes aux changements climatiques au Cameroun et au Togo (collaboration de Maryse Labriet avec HELIO International). Thématiques similaires à l'application en Midi-Pyrénées.

Enseignements

Utilisation des acquis du projet dans les enseignements fournis au sein du *International Master of Sustainable Development* (EOI, Madrid, module sur les changements climatiques) par Maryse Labriet.

II
Services climatiques en support à la décision

Philippe Dandin, directeur adjoint scientifique du centre national de recherches météorologiques, Météo-France
Membre du conseil scientifique du programme

La question de l'action face au changement climatique a considérablement crû au cours des années 2000. Aux attentes d'une partie du public, des réponses institutionnelles ont été conçues sous l'égide du Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, jalonnées par le Plan climat national (2004), la Stratégie nationale d'adaptation (2007), les Grenelle de l'environnement I & II (2009, 10), le Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC 2011), l'obligation de PCET (plan climat-énergie territorial) pour fin 2012, l'instauration de SRCAE (schéma régional du climat, de l'air et de l'énergie) … Le rapport du GIEC et l'attribution du Prix Nobel en 2007 n'avaient fait que favoriser l'engouement. Sur les territoires, en entreprise, partout, l'obligation climatique s'est imposée.

C'est dans ce contexte qu'ont été menées plusieurs actions visant à développer les services en matière de climat. La mise en place du service Drias[les futurs du climat] grâce au projet GICC DRIAS a été emblématique d'une volonté d'apporter des éléments utiles à la communauté nationale. Les laboratoires producteurs de scénarios, CERFACS, CNRM, IPSL, se sont associés à Météo-France pour offrir l'accès aux scénarios régionalisés sur la France : données numériques, cartes interactives d'indices climatiques, et accompagnement (documents, FAQ, *hotline*) sur les bonnes pratiques et l'utilisation de ces informations.

En libéralisant l'accès aux projections climatiques – matériau qui demeure des plus complexes à utiliser – cette mesure du PNACC a voulu provoquer l'action. Elle a renforcé la nécessité d'un dialogue rapproché entre climatologues et utilisateurs. Les scientifiques se sont engagés au travers de projets ciblés avec des industriels, en direct ou avec des tiers médiateurs. Le GICC a logiquement soutenu de tels exercices, délicats mais utiles et instructifs. Les projets SECIF ou INVULNERABLE 1 et 2 ont permis cette confrontation directe entre la paillasse et le terrain. Au contact d'univers professionnels différents, scientifiques-producteurs et industriels-utilisateurs ont mesuré l'imperfection de leurs connaissances. Tous ont sûrement progressé et apprécient différemment les défis qui attendent notre société.

Il est intéressant d'évaluer les progrès réalisés de projet en projet par ces acteurs, allant les uns vers les autres, souvent grâce à une médiation, parfois en devant réinventer ce qui aurait pu être déjà connu. Il convient d'apprécier ce cheminement. Il faut aussi réaliser combien les échanges sur le climat révèlent des préoccupations du présent et traitent, en fait, beaucoup de météorologie. Passé, présent, futurs, des plus proches aux plus lointains, ceux des scénarios séculaires, doivent être mobilisés pour stimuler la prise de conscience, décrire les dépendances, imaginer des indicateurs et des approches de gestion à toutes les échéances. Pour les utilisateurs, gestionnaires, décideurs, météorologie et climat ne font qu'un, et ce sont leurs effets sur l'activité qui priment. La prise en compte du climat suppose une analyse des vulnérabilités, des enjeux, de la valeur, à différentes constantes de temps pertinentes, celles du temps qu'il fait et celles, plus imperceptibles, du climat.

Ce dialogue est fructueux pour tous. Il invite d'une part les climatologues à parfaire leurs outils de modélisation pour mieux décrire des événements et les effets du climat que réclament les utilisateurs ; il enseigne aussi combien la seule modélisation numérique ne saurait suffire. DRIAS la rend accessible, préhensible ; cela ne suffit pas : comment être compréhensible ? L'échange est nécessaire, qui éclaire les partenaires et fournit des pistes d'action, même ténues. Les climatologues doivent enrichir leurs modélisations d'autres éléments. Les industriels – voyons au travers d'eux toutes les composantes de notre société – sont invités à réfléchir à leurs vulnérabilités projetées dans les futurs décrits aux différents horizons temporels disponibles… et déjà à penser un présent plus résilient. Se projeter dans le futur est un banc test des plus exigeants pour les uns et les autres. À tous la rencontre est vertueuse et déjà gage d'un succès précieux : celui de la conscience et de la mise en éveil.

Pour le développement futur des services « climatiques », il faut s'interroger sur toutes ces dimensions. Il est toujours bon que scientifiques et citoyens se rencontrent ; il leur faut sûrement des tiers, des médiateurs, des passeurs et des aides. Il est impératif de raisonner en termes d'impacts et d'enjeux, dans le « dessein » de l'utilisateur. Il faut enfin penser simultanément climat et météorologie, et offrir à chacun la palette temporelle disponible, couvrant passé, présent et futurs. Sans nul doute, il convient de développer des services « météo-climatiques » !

INVULNERABLE 2
Vulnérabilité des entreprises, Phase 2

PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Date d'engagement : 23 décembre 2010

Montant du budget : 135 000 €

Cofinancements obtenus : projet ANR SECIF (mars 2011-décembre 2014)

Coordinateurs :

Pascale Braconnot

IPSL/laboratoire des sciences du climat et de l'environnement (IPSL/LSCE)

Unité mixte CEA-CNRS-UVSQ, Bât. 712, Orme des Merisiers, 91191 Gif sur Yvette Cedex.

Tél : 01 69 08 77 21

pascale.braconnot@lsce.ipsl.fr

Partenaires Scientifiques :

Serge Planton, Meteo-France

Michel Colombier, IDDRI

Julien Cattiaux, Hervé Douville, Gaëlle Ouzeau, Yannick Peings CNRM-GAME

Céline Déandreis, Benjamin Quesada, Robert Vautard, Youssouph Sané, IPSL / LSCE

Paul Poncet ENGIE

Sylvie Parey EDF R&D

Julien Malandain, Nicolas Drut Veolia Eau

Mots clés :

Vulnérabilité industrielle, changement climatique, vague de froid, pluies intenses, indicateurs climatiques.

Objectifs des recherches

Se plaçant dans la continuité du projet INVULNERABLE 1 mené entre 2007 et 2010, le projet INVULNERABLE 2 a pour objectif l'approfondissement de cette première étude.

Il s'agit notamment de traiter les questions scientifiques ressortant d'INVULNERABLE 1 (analyse des projections, développement d'outils d'analyse spécifiques) ; de quantifier les incertitudes et d'identifier les biais des modèles sur les cas d'intérêt identifiés (régimes de précipitation ; vague de froid…) ; et enfin de formaliser et d'affiner la demande industrielle pour ce type de services.

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

Introduction

Le projet INVULNERABLE2 s'intéresse à la vulnérabilité des entreprises au changement climatique. Une première phase de réflexion, initiée par l'IDDRI, a montré que les entreprises restent peu concernées par la question du changement climatique bien que de nombreuses difficultés puissent les affecter concernant leurs installations, les facteurs qui commandent la demande de biens ou de services, la gestion de l'outil industriel, ou l'occurrence des "incidents climatiques" industriels. L'émergence de quelques besoins concrets a néanmoins permis de démarrer la mise au point d'indicateurs climatiques dédiés pour les réseaux de chaleur ou le secteur du gaz, en concertation avec les industriels. La réponse à ces besoins industriels à partir des données climatiques n'est pas triviale. Les demandes se situent rapidement à la limite des compétences et savoir-faire. Pour certains aspects, elles renvoient à des questions de recherche plus ou moins abouties, à cheval sur différents domaines de compétence.

Dans ce contexte, le deuxième volet du projet INVULNERABLE a eu comme objectif d'approfondir deux études de cas ayant donné lieu à des interactions entre industriels et climatologues et pour lesquels des indicateurs ou pistes de travail avaient été définis. Il s'agit d'un cas de vague de froid en lien avec ENGIE et EDF pour le secteur de l'énergie et d'un cas de débordement/déversement d'une station d'épuration en lien avec Veolia eau. Le projet s'est construit autour de la partie scientifique menée par les climatologues, les industriels étant associés en tant qu'utilisateurs et impliqués dans les étapes de réflexion.

Afin de renforcer le dialogue avec les entreprises, des fiches présentant les études de cas sont venues renforcer un premier lot de fiches plus génériques sur les changements climatiques issues de la première phase du projet. En complément, un colloque intitulé "Services climatiques et industrie" à destination des industriels a été organisé le 10 janvier 2012. Ces différentes activités ont été réalisées en forte synergie avec la première année du projet ANR SECIF (2010-2014) qui couvre un champ scientifique plus large et comprend une réflexion approfondie sur la notion de services climatiques et sur les formes à donner à ces services.

Matériels et méthodes

La méthode retenue pour construire des indicateurs climatiques pertinents pour le secteur industriel considéré a consisté à faire émerger au travers de dialogues des cas d'aléas climatiques ayant causé des dommages aux industriels. À partir de ces cas une analyse des situations météorologiques et leur mise en perspective par rapport à d'autres événements du même type ont permis de dégager des critères caractérisant l'aléa météorologique. En parallèle une analyse critique de la littérature scientifique et des autres projets (GICC, ANR, Européens, etc.) traitant de ce type d'événements dans le climat actuel ou de leur devenir en climat futur a servi de référence pour identifier les besoins d'analyse ou reprendre lorsque c'était possible des résultats antérieurs. Les analyses spécifiques ont été réalisées en considérant les jeux de données d'observation de Météo-France, ou du projet européen ENSEMBLE pour la période actuelle. Enfin, le devenir de ces indicateurs avec le changement climatique a été abordé à l'aide des simulations du climat actuel et du climat futur réalisées à l'IPSL et à Météo-France afin d'obtenir une première ébauche des résultats incluant une notion d'incertitude liée à l'utilisation d'un modèle particulier.

Les questions abordées font appel à de nombreux outils et compétences techniques, qu'il n'est souvent pas facile de communiquer simplement aux utilisateurs. En effet, dans tous les cas un travail particulier a dû être réalisé sur les simulations pour évaluer la capacité des modèles à représenter le phénomène étudié et tenir compte des biais ou des limitations des modèles dans l'analyse des projections climatiques. Une réflexion sur la correction de biais pour pouvoir aborder les questions de seuil a aussi été menée. Ces questions concernent la descente d'échelle pour amener les résultats des modèles à une échelle spatio-temporelle adaptée au cas d'étude, les générateurs de précipitations pour définir les caractéristiques d'événements pluvieux, la méthode de correction CDFt (pour Cumulative Distribution Function – Transform)[1] (Michelangeli et al. 2009, Vrac et al. 2012) pour corriger les biais des modèles. Les contraintes liées à ces activités de recherche et développement ne sont pas compatibles avec les temps de réponse rapides souhaités d'un industriel, mais doivent être prises en compte dans la mise en place de services climatiques si l'on souhaite produire des résultats ou une méthodologie pertinente pour la question posée.

Résultats

Étude des vagues de froid pour le secteur du Gaz

Introduction

Les activités d'un opérateur d'énergie comme ENGIE sont climato-sensibles. Ainsi, la vague de froid de janvier 2010, caractérisée par des températures négatives pouvant descendre sous les -20°C dans le sud de l'Île-de-France et de -6°C en Bretagne, a entraîné une pointe record de consommation de gaz le 8 janvier (3 053 GWh). La vague de froid de février/mars 2005 ayant servi de référence pour ce projet a touché l'ensemble de l'Europe. Cette vague de froid dans sa globalité est considérée comme relativement faible d'un point de vue météorologique. Ce sont d'autres caractéristiques telles que sa durée (10 à 20 jours selon les définitions et archives de Météo-France), son arrivée tardive (point culminant le 4 mars), la fréquence des précipitations hivernales et la persistance des flux polaires (températures minimales égalant les records de 1997, mais de façon très ponctuelle) qui en font une période remarquable.

De façon générale, une définition météorologique de la

1 La méthode CDFt (Cumulative Distribution Function – Transform) est une méthode statistique développée pour générer des fonctions de distributions cumulatives locales à partir de champs à grande échelle.

notion de vague de froid ne permet pas d'appréhender ses impacts potentiels sur un secteur climato-sensible comme le secteur de l'énergie, du fait qu'elle n'est pas reliée aux *enjeux* de ce secteur. L'étude du cas 2005 a permis de montrer que des critères tels que la durée, l'extension géographique, les pics d'intensité ne peuvent être écartés a priori pour évaluer l'impact d'une vague de froid sur le secteur énergétique.

Analyse des données météorologiques

Nous nous sommes tout d'abord intéressés à la caractérisation de la vague de froid de février/mars 2005 : a-t-elle été exceptionnelle ? Si oui, de quel point de vue ? A-t-on connu à ce jour d'autres événements de même ampleur ? L'objectif à terme est de pouvoir définir si de tels événements continueront à avoir lieu dans le futur et à quelle fréquence afin de commencer l'effort d'adaptation.

Les dates de début et fin de la période de froid ont été définies par les données météorologiques de Météo-France. Ainsi des anomalies négatives de température ont persisté entre le 14 février 2005 et le 15 mars 2005 (Figure 1) soit 29 jours au total. Les caractéristiques qui se dégagent sont :

- son arrivée tardive (fin de l'hiver) ;
- la durée exceptionnelle de la période froide (29 jours consécutifs) ; la durée de la période froide précédant l'appel aux clauses d'interruption : 15 jours ;
- un maximum de la vague de froid atteint au 1er mars ;
- l'anomalie cumulée de température de -140°C sur toute la période et de -75°C avant l'appel aux clauses d'interruption ;
- l'anomalie moyenne d'environ -5°C/jour ;
- le maximum de l'anomalie de température ;
- le décalage de la crise dans le sud-ouest par rapport au reste de la France ;
- l'extension géographique de la vague de froid au territoire européen.

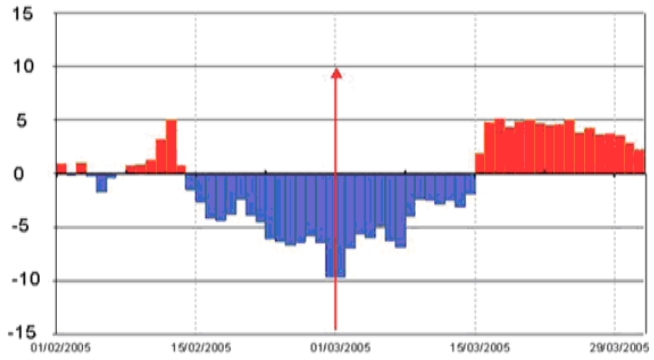


Figure 1 – Évolution des anomalies de température au cours des mois de février et mars 2005 en France. La flèche rouge correspond au 1er mars, date à laquelle ENGIE a dû faire jouer les clauses d'interruption des contrats de ses clients dits interruptibles.

En croisant ces indications sur la vague de froid et les particularités de la distribution du gaz, trois critères ont été retenus pour caractériser les vagues de froid et définir un indicateur de risque :

- Une durée d'au moins 15 jours consécutifs d'anomalie froide. Cette durée correspond à la période précédant les premiers appels aux clauses d'interruption des contrats.
- Une anomalie cumulée d'au moins -75°C. Cette valeur correspond à l'anomalie cumulée sur la durée des 15 premiers jours de la vague de froid.
- Une extension géographique forte sur l'Europe.

Nous avons sélectionné l'ensemble des vagues de froid répondant à au moins un de ces trois critères. Un total de 66 vagues de froid a été retenu (Figure 2). Parmi ces événements, 40 répondent uniquement à un des critères, 16 à deux des critères et 10 répondent aux trois critères simultanément. On constate que le critère le plus sélectif est celui de l'anomalie cumulée : il est atteint uniquement pour 19 vagues de froid (soit environ 29% des événements identifiés), suivi du critère d'extension géographique (33%). Le critère de durée est vérifié par plus de 80% des vagues de froid sélectionnées.

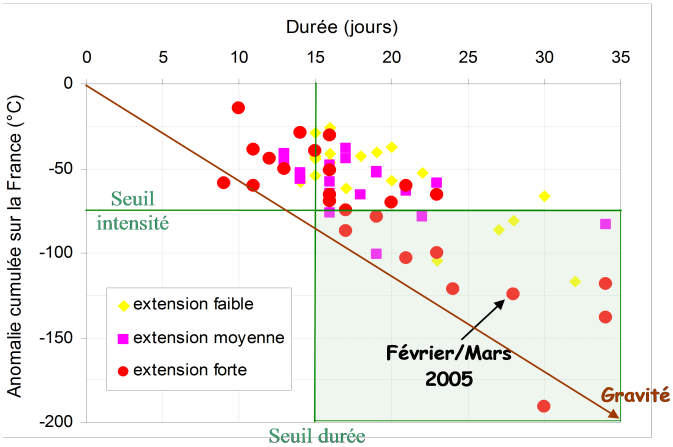


Figure 2 – Nuage de points des vagues de froid en fonction de leur durée (abscisse), de leur anomalie cumulée de température sur la France (ordonnée) et de leur extension géographique (rouge = fort; rose = moyen; jaune = faible). Les anomalies de température ont été calculées par rapport à la période de référence 1971-2000. Les vagues de froid ont été analysées pour les mois d'octobre à avril et pour la période 1971 à 2009. Ces résultats ont été obtenus à partir des ré-analyses ERA40 et ERA Interim du Centre Européen de Prévision à Moyen Terme. Les seuils critiques définis à partir de la vague de froid de février/mars 2005 sont indiqués par les droites vertes.

En termes de saisonnalité, 39% des vagues de froid de la période 1971-2009 ont eu lieu en fin d'hiver (après le 15

février) et peuvent être considérées comme tardives. La vague de froid de février/mars 2005 est tout à fait exceptionnelle en termes de durée et d'anomalie cumulée Seuls 10% des vagues de froid de la période 1971-2009 ont persisté plus de 29 jours et uniquement 3% l'ont égalée en termes d'anomalie cumulée. Elle est un peu moins exceptionnelle du point de vue de l'extension géographique. Le travail approfondi sur cette vague de froid fait l'objet d'une fiche de synthèse et a fourni des critères non intuitifs et dépendant du secteur d'activité, qui permettent de traiter le risque vis-à-vis de ces vagues de froid dans le futur de façon plus pertinente pour le secteur du gaz.

Étude des précipitations extrêmes avec Veolia Eau Valence

Introduction

La deuxième étude de cas s'appuie sur le questionnement de Veolia Valence à propos de l'existence d'un lien entre l'intensité des précipitations et les débordements sur le réseau d'eau de Romans-sur-Isère. L'analyse des données de la station d'épuration et les ré-analyses SAFRAN (Le Moigne, 2002), avaient permis de mettre en évidence le lien très fort entre le volume de débordement et le cumul journalier de précipitations. Ce premier volet du projet INVULNERABLE n'a pas permis de définir un indicateur simple pour traiter cette vulnérabilité. En effet le lien entre les précipitations et les débordements sur le réseau d'eau est fortement non linéaire. Il s'est rapidement avéré nécessaire de passer par un modèle hydrologique permettent de décrire pleinement la transformation des précipitations dans le bassin versant de Romans-sur-Isère. Une collaboration entre Veolia-Valence et l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon a été mise en place pour la mise au point d'un modèle basé sur le logiciel CANOE (Sogreah, Insavalor, 2005). Ce modèle nécessite en entrée des chroniques de précipitations horaires ou des profils Intensité-Durée-Fréquence. Nous avons donc réalisé une étude amont permettant d'acquérir une connaissance plus fine et actualisée des régimes de précipitations sur la région, d'évaluer leur représentation dans les modèles et d'identifier comment utiliser les résultats de simulations du climat futur pour répondre à la question initiale.

Analyse des précipitations sur la région de Romans-sur-Isère

Le travail a été guidé par les éléments de contexte sur le changement climatique et les précipitations intenses dans le sud de la France fournis par des projets PRUDENCE[2], CYPRIM[3], MedUP[4], HyMeX[5] qui ont été synthétisés dans une fiche à destination de Veolia. En préambule aux développements méthodologiques propres au projet les différentes méthodes de descente d'échelle ont également été passées en revue. La fiche de synthèse correspondante a servi de repère permettant d'expliquer les choix effectués et propose une chaîne de descente d'échelle pour désagréger les données de précipitations des modèles sur Romans-sur Isère.

L'analyse détaillée des événements pluvieux affectant la région de Romans-sur- Isère a consisté à caractériser les événements pluvieux de 18 séries de précipitations horaires fournies par Météo-France. Une classification de ces stations a été réalisée suivant le nombre, l'intensité et la durée des événements pluvieux à partir des méthodes du Kmeans (méthode de classification hiérarchique qui agrège les individus les plus proches). Deux méthodes ont permis de caractériser les événements pluvieux : la méthode du CEMAGREF (Arnaud et al., 2007) et une méthode classique de détermination d'événements pluvieux (Sane et al., 2011). Cette étude souligne l'hétérogénéité spatiale des stations et la synchronisation des événements pluvieux.

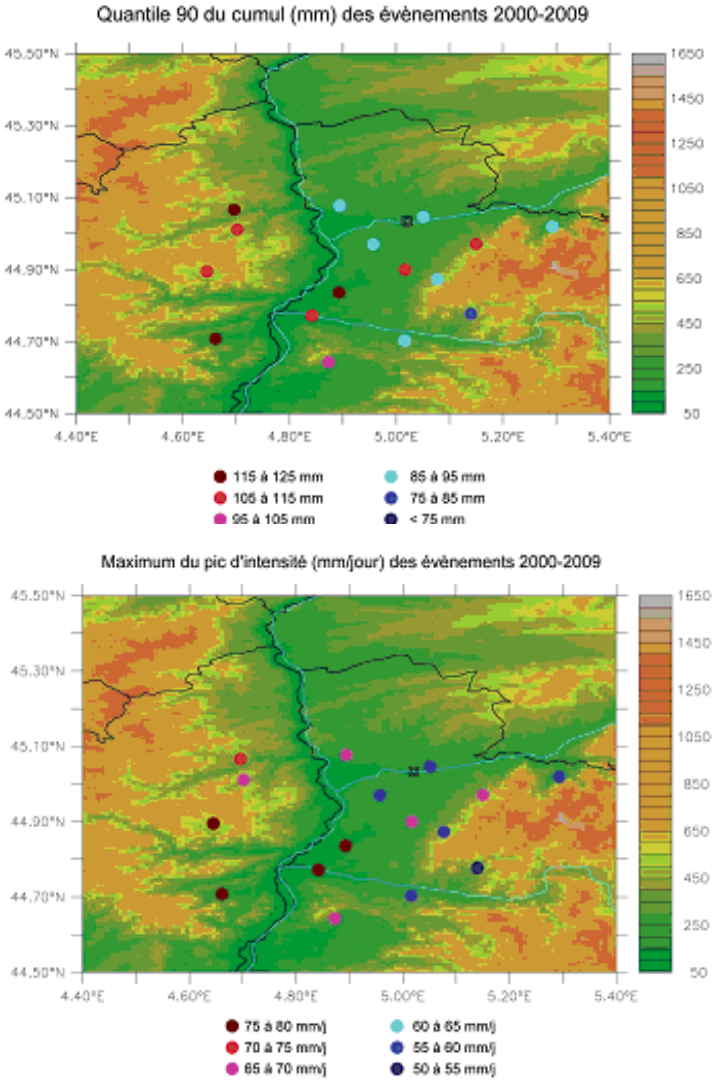


Figure 3 – Quantile 90 du cumul et du pic d'intensité des événements pluvieux enregistrés par les stations Météo-France (points de couleurs sur les cartes) au cours de la période 2000-2009 (définition CEMAGREF/IRSTEA).

2 Prediction of regional scenarios and uncertainties for Defining EuropeaN Climate change risks and Effects (http://prudence.dmi.dk/)

3 CYclogénèse et Précipitations Intenses en région Méditerranéenne www.cnrm.meteo.fr/cyprim

4 Forecast and projection in climate scenario of Mediterranean intense events : Uncertainties and Propagation on environment (http://www.cnrm.meteo.fr/spip.php?article167)

5 Hydrological cycle in Mediterranean Experiment (http://www.cnrm-game.fr/spip.php?article256)

L'étude du lien entre les événements pluvieux et les débordements en station montre que les débordements sont plus fortement corrélés à l'intensité totale de l'événement pluvieux qu'au maximum des intensités horaires enregistré durant la journée. Elle fait aussi apparaître qu'une large gamme de type d'événements précipitant conditionne les débordements et que les précipitations extrêmes ne sont que l'un des facteurs les plus contraignants.

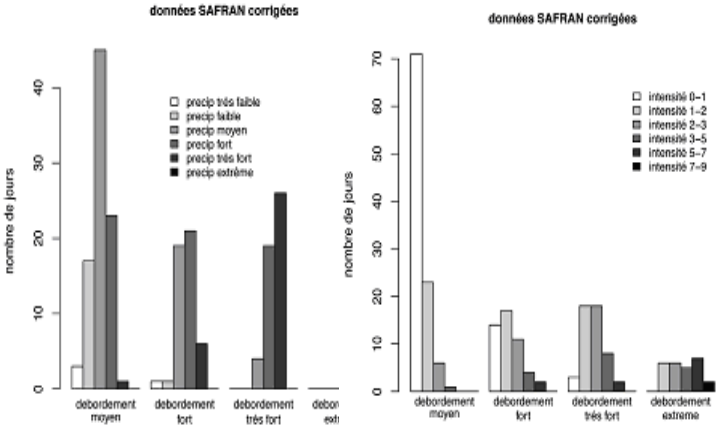


Figure 4. – Distribution des jours de débordement en fonction a) de leur classe de débordement et de leur classe de cumul journalier de pluie ; b) de leur classe de débordement et de l'intensité journalière de précipitation (en mm/h)

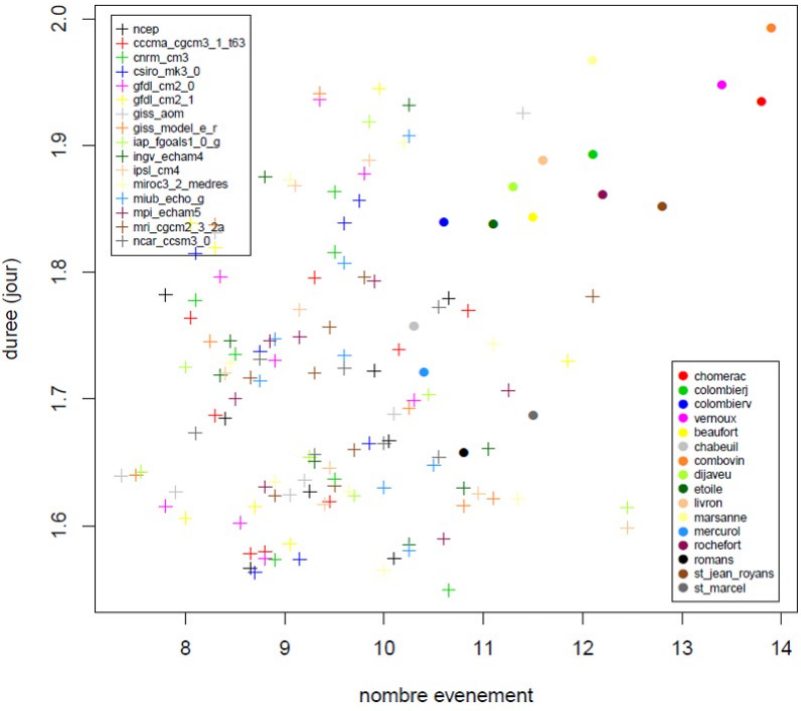


Figure 5 – Comparaison de la moyenne annuelle de la durée des événements pluvieux (définition CEMAGREF) et de leur nombre. Valeurs calculées à partir des 16 stations Météo-France sur la période 2000-2009 (cercles colorés) et des résultats de 16 modèles globaux dont les données ont été désagrégées sur la France (Pagé et Terray, 2010) sur la période 1981-2000 (croix colorées, 9 points de grille autour de Romans).

Caractéristiques des précipitations simulées et des changements projetés

Pour le projet les résultats avaient été produits en utilisant les modèles de l'IPSL et du CNRM. Depuis un ensemble d'analyses plus large a été produit dans le projet SECIF avec les résultats de 16 modèles dont les données ont été désagrégées sur la France (produit SCRATCH 10 du Cerfacs, Pagé et Terray, 2010). L'analyse des précipitations simulées pour la période actuelle sur la région montre que les modèles sous estiment l'intensité des pluies. En revanche la durée des pluies simulées est du même ordre que celle enregistrée en stations.

Il ressort de cette étude préliminaire le besoin de faire des corrections sur les maxima de précipitations pour pouvoir exploiter les projections climatiques. Les résultats du projet INVULNERABLE2 ont surtout permis de reconsidérer la façon d'aborder la question des projections climatiques en préconisant une approche permettant, d'une part, d'estimer ce que seraient les précipitations à la station météorologique la plus proche de Romans-sur-Isère et, d'autre part, d'isoler des événements typiques à l'aide de simulations régionales à haute résolution pour identifier les aspects régionaux pouvant affecter le bassin versant.

Enseignement du colloque "Services Climatiques et Industrie"

Le colloque "Services Climatiques et Industrie" s'est tenu le 10 janvier 2012 à la Maison de l'Amérique Latine à Paris. Une série de questions était au cœur de la journée :

- Quels sont les besoins des industriels en matière d'information sur le climat futur ?
- Comment est-il possible d'y répondre ?
- Comment organiser cette réponse ?
- Quelles difficultés est-il possible d'anticiper ?

Cette journée de conférences et de tables rondes a réuni des intervenants de différents pays ayant travaillé sur le sujet dans le but de faire part de leurs expériences et de leurs difficultés, des représentants du monde industriel qui ont présenté leur vision des services climatiques, des scientifiques ainsi que des représentants de la société civile.

Le compte rendu de la journée (Cauvin, 2012) fait apparaître que la notion de vulnérabilité au changement climatique et le besoin d'y répondre efficacement semblent être au cœur des préoccupations de tous les participants.

Les différentes interventions pointent sur le rôle d'intermédiaire que devraient jouer les services climatiques. Que ce soit les traducteurs du Met-Office (Royaume- Uni) ou l'équipe *impacts* d'OURANOS (Canada), ceux-ci permettent de créer des synergies essentielles entre le monde scientifique et les utilisateurs en faisant émerger les questions et besoins des uns, et en évaluant les capacités de réponse des autres. Ainsi la nécessité d'une approche ouverte aux questions posées est indispensable. Il ne s'agit pas de voir simplement comment un climatologue perçoit une question posée mais aussi de comprendre pourquoi un utilisateur la pose, quels peuvent être les impacts sur son activité ou encore quels sont les autres domaines touchés (aspect économique, sociologique, comportemental…).

Le besoin d'accéder à des données fiables et précises, tout en explicitant de manière compréhensible les incertitudes qui les entourent, semble aussi indispensable au bon fonctionnement de ces services. Cependant, un simple système de transfert d'informations n'est pas suffisant. Il s'agit plutôt de développer des compétences sur ce thème qui est à cheval entre la sphère scientifique et le monde industriel via une formation de qualité. Ceci permettrait d'engranger des processus d'accompagnement des utilisateurs afin de les aider dans leurs prises de décision. L'important pour l'utilisateur n'est pas seulement d'avoir des estimations des changements auxquels il devra faire face mais plutôt de comprendre comment ils vont influencer son activité. Le besoin d'adapter le service fourni à la demande exprimée est ainsi clairement apparu. La plupart des demandes formulées pour l'adaptation concernent des échelles régionales ou locales et il s'agit de déterminer dans quelles mesures on peut avoir des résultats sur le climat à de telles échelles.

De nombreuses questions ont émergé sur le type d'organisation de ces services. En effet les différents systèmes de services climatiques qui nous ont été présentés avaient tous un mode d'organisation différent. Dans certains cas, il s'agissait d'une structure financée par des fonds publics (Met Office Hadley Centre) et dans d'autres cas des structures privées au service d'autres organismes (CLIMPACT, ARIA…). Il pouvait s'agir d'organisations indépendantes fonctionnant grâce à des capitaux privés et publics (OURANOS) ou encore des services incorporés au sein même de grandes entreprises (département R&D d'EDF, service développement durable de la SNCF, …). Une grande diversité de modes d'organisation existe et il semble qu'en France c'est un modèle basé sur une approche diversifiée qui sera certainement le modèle à privilégier. La question de l'accès aux données climatiques ainsi qu'aux résultats fournis par les services climatiques fut aussi un sujet important de discussions : Doit-on permettre l'accès libre à ses données ou bien contrôler leur utilisation afin qu'elles ne soient pas mal utilisées ? Les résultats obtenus sont-ils transposables à d'autres situations ?

En dépit de toutes les questions soulevées, cette journée a permis de mettre en évidence l'émergence de la question de l'adaptation au changement climatique dans la société civile et des besoins croissants d'informations sur ce sujet.

Conclusions – Perspectives

Ce projet d'un an a permis d'affiner la définition d'indicateurs dédiés à l'aide d'échanges entre les climatologues et les industriels. Il s'est principalement focalisé sur le climat actuel et l'analyse des données issues des observations afin de vérifier la pertinence des indicateurs sur des aléas climatiques vécus par les industriels. Il a également permis de voir comment cette construction d'indicateurs sur mesure s'insérait dans le cadre plus large des services climatiques en confrontant les méthodologies développées dans les projets avec celles de services climatiques se mettant en place au niveau international. Le projet est riche en enseignements sur les travers à éviter et l'effort de co-construction nécessaire entre les acteurs pour mettre en place des services de qualité.

II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

La principale valeur ajoutée de ce projet porte sur la notion de ré-interrogation des questions posées et la mise en place de chaînes de traitement complexes dédiées. Le principal constat est que même pour des utilisateurs avertis et conscients de possibles risques liés au changement climatique, les industriels connaissent mal leur vulnérabilité. La notion de changement climatique est encore plus difficile à appréhender et nécessite des chaînes d'analyse assez techniques pour tirer parti des informations disponibles et des résultats des simulations. Cette chaîne d'expertise et de dialogue entre le producteur de données et l'utilisateur peut néanmoins être formalisée comme cela a été fait dans l'article de Déandréis et al. (2014). Les retombées de ce projet sont principalement sous formes de fiches et du compte rendu détaillé de la journée sur les services climatiques (cf. références ci-dessous).

La journée du 10 janvier 2012 appuyée sur l'expérience gagnée autour de cas concrets montre clairement que la notion même de service climatique pour les questions de vulnérabilité industrielle ne peut pas se résumer à une simple diffusion de résultats de simulations ou d'observations et que le service climatique le plus frustre doit contenir des intermédiaires et une construction flexible et adaptée au cas traité. Ce projet et sa poursuite dans le projet ANR SECIF ont apporté plusieurs réponses sur ce que devraient être les services climatiques et, de par les personnes impliquées, ont contribué aux mises en place concrètes qui se dessinent en France et sont discutées dans le groupe de réflexion dédié aux services climatiques de l'Allenvi[6]. Les travaux alimentent également les discussions au niveau européen et au niveau international avec la collaboration active de participants de ce projet dans les instances européennes ou les groupes de travail du programme mondial de recherche sur le climat.

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

La nature du projet et sa durée de 1 an n'ont pas directement conduit à des publications scientifiques. Les valorisations sont principalement sous forme de fiches techniques ou grand public, et la diffusion des résultats via la participation à des journées de réflexion, le montage d'autres projets ou la mise en place effective de service via le portail Drias[les futurs du climat] et plus récemment du développement du site SCE à l'IPSL, de façon concertée entre les acteurs concernés.

Les fiches synthétiques en français et en anglais éditées via l'IDDRI sont disponibles en versions électroniques à l'adresse suivante :

6 Alliance nationale de recherche pour l'environnement

http://secif.ipsl.fr/index.php/component/content/article?id=83

- Fiche faisant l'état de travaux de INVULNERABLE1.
- Fiche n°1 : Indicateur de vulnérabilité – définition et analyse.
- Fiche n°2 : Bibliographie sur l'amplitude diurne de température.
- Fiche n°3 : Traitement des incertitudes et correction des données simulées.
- Fiche spécifique au cas de la vague de froid pour le secteur du gaz.
- Fiche n°1 : Élaboration de critères climatiques de vulnérabilité aux vagues de froid.

Les actes du colloque service climatique sont disponibles sur le site du GICC :

http://www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/512

ou sur le site du projet ANR SECIF :

http://secif.ipsl.fr/index.php/component/content/article?id=111

Les articles les plus représentatifs des réflexions liées aux services climatiques sous-tendant les activités du projet INVULNERABLE sont :

Déandreis, C., Lémond, J., Dandin P. and P. Braconnot, 2013 : Actions récentes contribuant aux services climatiques en France Recent progress towards climate services in France A paraître dans une édition spéciale Climat de la revue "Pollution Atmosphérique", p120-128

Déandreis, C., Page, C., Braconnot, P., Barring, L., Bucchignani, E., de Cerff, W. S., Hutjes, R., Joussaume, S., Mares, C., Planton, S. and Plieger, M., 2014. Towards a dedicated impact portal to bridge the gap between the impact and climate communities: Lessons from use cases. *Climatic Change*. 125: 333-347

Bibliographie

Le Moigne, P., 2002: « Description de l'analyse des champs de surface sur la France par le système SAFRAN ». *Note de centre CNRM-GAME 77*

Michelangeli, P.-A., Vrac, M., Loukos, H, 2009. 'Probabilistic downscaling approaches: 'Application to wind cumulative distribution functions'. *Geophysical Research Letters*, 36, L11708, doi : 10.1029/2009GL038401.

Vrac, M., Drobinski, P., Merlo A., Herrmann M., Lavaysse C., Li L., S. Somot, 2012. Dynamical and statistical downscaling of the French Mediterranean climate: uncertainty assessment. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2769-2784, www.nat-hazards- earth-syst-sci.net/12/2769/2012/, doi: 10.5194/nhess-12-2769-2012 Sogreah, Insavalor, 2005. Manuel d'utilisation de CANOE, *Tech. Report*

Arnaud, P., Fine, J. A. and Lavabre, J. (2007). An hourly rainfall generation model applicable to all types of climate. Atmospheric Research. 85: 230-242.

Sane, Y., Bonazzola, M., Rio, C., Chambon, P., Fiolleau, T., Musat, I., Hourdin, F., Roca, R., Grandpeix, J. Y. and Diedhiou, A. 2012. An analysis of the diurnal cycle of precipitation over Dakar using local rain-gauge data and a general circulation model. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society.* 138: 2182-2195.

Cauvin F., 2012 : Rapport de mission de fin d'étude du M2 PAPDD de l'école des Ponts et AgroParisTech.

Déandreis, C., Page, C., Braconnot, P., Barring, L., Bucchignani, E., de Cerff, W. S., Hutjes, R., Joussaume, S., Mares, C., Planton, S. and Plieger, M., 2014. Towards a dedicated impact portal to bridge the gap between the impact and climate communities : Lessons from use cases. *Climatic Change*. 125: 333-347.

Pagé, C. et L. Terray, 2010: Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21e siècle : les scénarii SCRATCH2010. *Technical Report* TR/CMGC/10/58, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875CS, Toulouse, France.

DRIAS – Donner accès aux scénarios climatiques régionalisés français pour l'impact et l'adaptation de nos sociétés et environnements

PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Date d'engagement : 2 décembre 2009

Montant du budget : 822 000 € TTC dont **314 941** € TTC de subvention du service de la recherche du Ministère chargé du développement durable.

Cofinancements obtenus : Autofinancement des partenaires.

Coordinateurs :

Philippe Dandin, Météo-France, Direction de la Climatologie, 42, av. G. Coriolis, 31 057 Toulouse Cedex 01

Email : philippe.dandin@meteo.fr

Partenaires

Michel Déqué, Julien Lémond, Serge Planton – CNRM-GAME, URA1357, Météo-France, CNRS

Christian Pagé – Sciences de l'Univers au CERFACS, URA1875

Laurent Li, Thomas Noel, Robert Vautard – Institut Pierre-Simon Laplace, Université Pierre et Marie Curie

Philippe Dandin, Laurent Franchistéguy, Maryvonne Kerdoncuff, Jean-Pascal Atchama, Guillaume Baillon, Béatrice Cassaigne, Philippe Dos, Patrice Jardin, Didier Lacambre, Mékafi Tamar – Météo-France, direction de la climatologie, direction de la production

Mots clés :

Services climatiques, adaptation, projections climatiques, régionalisation, incertitudes.

Objectifs des recherches :

Développement d'un portail pour la mise à disposition d'informations climatiques régionalisées sur la France métropolitaine.

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

Introduction

Le changement climatique dû à l'augmentation des gaz à effet de serre est en cours et ses effets commencent à se manifester. Les scientifiques annoncent des évolutions significatives dans les prochaines décennies (hausse des températures, périodes de canicule plus fréquentes, sécheresses sévères, *etc*.), avec une vitesse et intensité de changement dépendant du scénario de développement global utilisé. Les pouvoirs publics locaux et de nombreux secteurs de l'économie ont besoin de références climatiques précises pour dimensionner leurs projets et investissements portant sur le long terme. La question de l'adaptation au changement climatique nécessite des informations très localisées spatialement et à différentes échelles de temps.

Une part de ces informations est aujourd'hui produite par les laboratoires de recherche sur le climat, sous forme de projections climatiques. Compte-tenu de leur technicité, elles sont encore difficilement accessibles et exploitables par les acteurs socio-économiques. En faciliter l'accès est essentiel. Le projet DRIAS avait vocation à répondre à cette nécessité en permettant à tous les acteurs concernés par l'adaptation aux changements climatiques (collectivités territoriales, services de l'État, bureaux d'études, entreprises…) de consulter et obtenir aisément les données et produits issus de plusieurs modèles numériques de simulation climatique, permettant d'apprécier l'incertitude de ces projections. La mise en place d'un portail d'accès était l'objectif du projet.

Matériels et méthodes

Le projet DRIAS est organisé autour d'une équipe composée d'une part des centres producteurs français de simulations climatiques (CNRM-GAME, CERFACS, IPSL-LMD et LSCE) et d'autre part de la direction de la climatologie de Météo-France qui porte et coordonne l'action.

La supervision générale du projet a été assurée par le porteur de projet, la coordination et la réalisation des développements par l'équipe Dclim/POC de Météo-France. L'ergonomie et le graphisme ont été réalisés par la direction de la production de Météo-France.

Les méthodes de gestion de projet pour des développements de services classiquement suivies à Météo-France ont été mises en œuvre par l'équipe projet ; les développements – y compris travaux d'ergonomie et graphisme – ont été assurés en interne, avec un recours à sous-traitance pour assistance à maîtrise d'ouvrage, pratique habituelle pour de pareilles actions. Des méthodes "agiles" de développement en informatique ont été employées.

Les itérations ont été nombreuses entre les parties prenantes du projet : équipe de développement au sein de Météo-France (direction de la climatologie, direction de la production, direction des systèmes d'information) et les partenaires des laboratoires, avec des jalons importants soumis aux utilisateurs à intervalles réguliers. Des décisions et arbitrages ont été proposés à un comité de pilotage présidé par le ministère chargé du développement durable.

Associé à l'équipe projet, un comité d'utilisateurs a été mis en place dès le début du projet : il constitue un échantillon représentatif des différentes communautés d'utilisateurs potentiels, contribue à exprimer les besoins, à valider les choix faits par l'équipe projet, à effectuer des tests, et ainsi à faciliter la communication entre producteurs et utilisateurs. Son apport est précieux. Sa mise en place a été souhaitée par le conseil scientifique du GICC et par le Commissariat général au développement durable du MEDDE qui tiennent à ce que tous les types d'utilisateurs soient satisfaits du portail : équipes de recherche, quelle que soit leur connaissance de la modélisation climatique, bureaux d'études, entreprises, associations, collectivités territoriales. Tous sont en effet confrontés à des études d'impact et à la définition de mesures d'adaptation au changement climatique.

Le comité des utilisateurs a été mis à contribution au cours de la première année du projet, principalement à travers la participation à une enquête. Cette dernière a permis de mieux cerner les besoins, les pratiques et les habitudes des utilisateurs. L'analyse a notamment mis en évidence l'émergence de trois grandes catégories d'utilisateurs :

- des chercheurs et ingénieurs habitués à la manipulation des simulations et des données complexes ;
- des décideurs et gestionnaires, plus néophytes en informations climatiques mais confrontés, notamment, à la problématique d'adaptation des territoires ;
- des représentants de communautés scientifiques moins aptes à manipuler les résultats de scénarios, eux aussi désormais confrontés aux impacts du changement climatique dans leur domaine.

Tous sont néanmoins désireux de disposer d'une information plus intégrée et d'un accompagnement important.

En parallèle à cette enquête "utilisateurs", d'autres travaux ont été menés visant à préciser les spécifications de l'ensemble du système à mettre en place, s'appuyant sur une analyse du paysage national et international et l'écoute-client en matière d'adaptation. Dans un premier temps, une analyse des services climatiques existants a montré que jusqu'à présent, peu d'entre eux mettent à disposition un spectre large d'informations, allant des données numériques jusqu'aux produits graphiques. D'autre part, ces informations sont souvent thématiques ou sectorielles (hydrologie, agronomie, écologie…). Le projet DRIAS s'est donc proposé de réunir sur un même portail les données provenant de différentes sources et souligner ainsi un aspect de l'incertitude inhérente à la projection climatique.

Cette diversité, source de richesse mais aussi de complexité, a justifié, dans une logique de clarification pour les utilisateurs la rédaction de différentes notes par l'équipe projet dont un glossaire réunissant les principales notions du projet.

Ces travaux préliminaires, nécessaires à la mise en place d'un système complexe devant rendre simple des notions ardues, ont servi de base pour les spécifications du futur portail. La réalisation a bénéficié de l'expérience de système de productions de produits climatologiques standards et de leur diffusion au moyen de portails web, acquise par Météo-France et notamment la direction de la climatologie. Elle a aussi bénéficié de l'infrastructure disponible dans l'Établissement (silos d'archivage, serveurs…) : ce principe de réutilisation des acquis et de l'expérience des partenaires a guidé l'équipe projet dans un souci d'efficacité des développements. La réalisation a imposé des choix sur les simulations disponibles dans les équipes françaises de modélisation, dont la mise à disposition avait été envisagée initialement, mais qu'il a fallu renoncer à intégrer tant elles étaient disparates : des trois jeux de données, issues des principales expériences réalisées par les partenaires (jeu n°1 : expériences Météo-France ; jeu n°2 : expériences SCRATCH du CERFACS ; jeu n°3 : expériences issues du projet SCAMPEI), seul le 3e, du fait de sa grande homogénéité, a été retenu pour présenter des produits uniformes. Un des enseignements de DRIAS est qu'il faut renforcer une plus grande cohérence des sorties de simulations (variables, unités, périodes…) qui seule permet d'offrir aux usagers des produits pouvant prendre en compte une part de l'incertitude liée à la modélisation ou aux scénarios. Enfin, le projet DRIAS a bénéficié d'une étroite coopération entre climatologues chercheurs et opérationnels, les uns plus experts en modélisation du système climatique, les autres plus habiles dans l'exploitation des informations du passé : les produits diffusés sont des données corrigées par une méthode qui mêle les informations du passé et du futur, et les uns et les autres se sont mutuellement enrichis. Les choix faits dans le système sont cohérents avec les choix et la démarche de la communauté scientifique, à l'instar du travail de synthèse réalisé pour les scénarios climatiques de référence du XXIe siècle dans le cadre du Programme National d'Adaptation au Changement Climatique[1], qui inspirent ceux du portail Drias[les futurs du climat].

Cette étroite coopération et cette cohérence entre scientifiques et opérationnels, souhaitée et promue par le Cadre Mondial pour les Services Climatiques, a été une importante clé de réussite du projet et devra impérativement être conservée dans la suite.

Résultats et discussion

Le projet GICC DRIAS a permis de construire un service articulé autour d'un portail : Drias[les futurs du climat] : http://www.drias-climat.fr/, qui offre un accès aisé aux modélisations climatiques régionalisées des équipes françaises.

Le portail DRIAS[les futurs du climat]

L'essentiel des résultats du projet est visible et constitue le portail, ses contenus et les données pouvant être obtenues par les utilisateurs. Tout utilisateur, qu'il se contente de lire quelques pages, ou de découvrir quelques indicateurs, ou a fortiori qu'il commande et reçoive des données et produits numériques, en prend la mesure. Une autre composante, perceptible des utilisateurs du service de données, est liée à la mise en place d'un "service", principalement sous forme de "hotline" pouvant répondre aux utilisateurs et faisant la liaison, si besoin, avec les experts scientifiques. Enfin, une troisième catégorie de résultats du projet DRIAS est propre aux partenaires: il s'agit de protocoles et recommandations qui contribuent à améliorer la cohérence des sorties de simulations et leur intégration future dans un service destiné aux utilisateurs.



À partir d'un inventaire des différents jeux de données disponibles, et en s'appuyant sur les attentes des utilisateurs, ainsi que sur l'expérience primordiale des centres producteurs, le projet a conduit à une définition des contenus, avec un effort commun de standardisation mené par les laboratoires (grille, liste des variables, *etc.*). Le portail Drias[les futurs du climat] permet ainsi de mettre à disposition une information climatique provenant de différents scénarios économiques de développement, de différents modèles de climat, et de différentes méthodes de descente d'échelle, avec une infrastructure évolutive qui permettra l'accueil de futures projections climatiques. Chacun des principaux laboratoires français de modélisation climatique, CNRM-GAME, CERFACS et IPSL a contribué au portail en y apportant d'une part des jeux de données mais également en participant à la réflexion sur les services à mettre en place.

Le portail web Drias[les futurs du climat] est à l'interface entre le monde de la recherche et les utilisateurs et a l'objectif de mettre à disposition une information complexe de façon simple et didactique. Il comporte ainsi trois espaces :

- un espace "Accompagnement" permet de disposer par le biais de textes explicatifs, d'une foire aux questions, et d'un centre d'accompagnement, des

1 http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Le-climat-de-la-France-au-XXIe-.html

informations nécessaires pour une bonne utilisation des services proposés par Drias[les futurs du climat] ;

- un espace “Découverte” propose des cartes interactives représentant différents indicateurs climatiques. Cet espace permet à la fois une analyse immédiate, et d’appréhender les jeux de données et produits accessibles sur le portail ;

- un espace “Accès données et produits” permettant, après une étape d’identification, de commander et de télécharger les projections climatiques régionalisées sous format numérique (brutes ou corrigées par rapport à l’observation). Cet espace est principalement destiné aux utilisateurs avertis qui exploiteront par exemple ces informations pour des études d’impact.

Un service associé au portail a été parallèlement mis en place : une “hot-line” coordonnée par Météo-France accompagne les utilisateurs en cas d’interrogation technique ou scientifique. Les partenaires du projet contribuent aussi à cette “hot-line” pour les questions d’ordre scientifique. Une large gamme de futurs possibles pour le climat de la France au XXIe siècle est à présent accessible à travers le portail Drias[les futurs du climat].

Un aperçu des incertitudes

Afin de donner à voir l’incertitude qui entoure les prévisions climatiques, le portail présente les simulations fournies sur la base de différents scénarios du GIEC[2], par différents modèles, pour différents variables et indices et selon différentes références climatiques et horizons temporels.

Différents scénarios

L’évolution du climat est incertaine en raison entre autre de l’évolution de la concentration des gaz à effet de serre dans l'atmosphère. Pour cette raison, les projections climatiques tiennent compte de différents scénarios d’émission. Drias[les futurs du climat] présente des projections qui s’appuient sur les scénarios utilisés par le GIEC : A1B (intermédiaire), A2 (pessimiste), B1 (optimiste).

Différents modèles

Les modèles numériques de modélisation globale et les calculs effectués pour affiner les projections climatiques fournissent des résultats cohérents mais présentant des écarts : cette part d’incertitude doit également être considérée. Elle est illustrée par la comparaison de plusieurs simulations. Ainsi, la robustesse d’une analyse peut être évaluée à la concordance des résultats produits par différents modèles. Actuellement les données accessibles dans Drias[les futurs du climat] sont principalement issues des modèles français, mais aussi canadien, allemand ou encore américains, analysés par les équipes françaises.

Différentes variables et indices

24 variables et indices climatiques standards sont accessibles sur la base des projections de températures et des précipitations : température minimale, température maximale, température moyenne, nombre de jours de température élevée, nombre de jours de gel, nombre de jours de fortes précipitations, cumul de précipitations, précipitations quotidiennes, *etc*. Leurs valeurs sont présentées par mois, saison et année. La résolution spatiale de la grille de représentation la plus fine est de 8 km : c’est une limite dictée par la méthode de régionalisation utilisée dans les simulations proposées, déjà très élevée pour des projections climatiques qu’il faut se garder d’interpréter à trop fine échelle.

Différents horizons temporels

La période de référence du climat passé n’est pas identique pour toutes les simulations (1961/1980, 1961/1990 ou 1961/2000) mais est toujours signalée sur les cartes afin de faciliter l’interprétation. De même, les projections climatiques ne sont pas toutes réalisées sur l’ensemble du XXIe siècle.

Aussi, Drias[les futurs du climat] regroupe les échéances de projections futures en horizons : proche (2035), moyen (2055) et lointain (2085) du XXIe siècle.

Drias[les futurs du climat] offre ainsi un accès libre aux dernières avancées de la modélisation régionale et des services climatiques.

Conclusions et perspectives

Le projet DRIAS a permis le développement du portail Drias[les futurs du climat] qui apporte une réponse à plusieurs catégories d’utilisateurs allant du grand public aux experts des impacts du changement climatique. Bâti sur une infrastructure solide et évolutive (permettant l’extension à l’outre-mer et l’accueil de futures simulations) qui tire parti des systèmes et des savoirs des équipes françaises de climatologie, ce portail est avant tout le fruit d’une dynamique renforcée et d’un effort conjoint entre les laboratoires français de modélisation climatique et le service météorologique. Il faudra entretenir cette cohérence entre actions de recherche et fourniture de services, et la relation entre les partenaires qui a permis de marquer une étape importante dans la mise en place des Services Climatiques français au cœur de la stratégie nationale d’adaptation au changement climatique. Si le projet D a donné comme résultat principal un portail, il reste à construire un service, à l’enrichir : c’est l’objet des actions portées par les partenaires du projet dans les mois qui suivront l’ouverture. Enfin, il faut également signaler d’autres bénéfices du projet : réalisation de simulations complémentaires, travaux sur la représentation des incertitudes, affichage auprès des utilisateurs d’une volonté de service commune aux chercheurs et ingénieurs climatologues, construction d’un service destiné à durer et à évoluer pour répondre aux attentes.

2 Groupe d’experts intergouvernemental sur l’évolution du climat, Special Report on Emissions Scenarios – 2000.

Passerelle entre les chercheurs et les utilisateurs, le portail Drias[les futurs du climat] aboutit en effet à un service pérenne, améliorant encore la démarche d'adaptation, notamment en développant des produits innovants, en intégrant des contenus intégrés plus proches des problématiques des utilisateurs, et en ajoutant de l'information sur le passé et le présent. Météo-France s'est engagé à porter le service, soutenu par le ministère en charge du développement durable, et en forte cohérence avec les actions de la communauté de recherche française : les choix de simulations et produits, le rythme des mises à jour, l'accompagnement des utilisateurs seront déterminés par les partenaires, prenant note des travaux concertés des chercheurs, des attentes des utilisateurs et de la capacité de service offerte par le système porté par la direction de la climatologie de Météo-France. Les prochaines étapes verront l'élargissement du portail à l'Outre-mer et l'introduction des résultats d'une étude d'impact sur la ressource en eau, d'intérêt général. Au-delà de 2013, d'autres fonctionnalités et produits seront intégrés. Le mode de gouvernance approprié à cette action inter-organismes, servant les intérêts du pays, associant la recherche et les opérations, associera étroitement les parties prenantes du système, à l'instar de ce qui s'est déroulé lors du projet DRIAS…

II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Le projet DRIAS avait initialement deux objectifs principaux en termes de transfert :

- contribuer à renforcer la liaison et la cohérence des réalisations entre les principaux laboratoires de modélisation climatique français pour valoriser et améliorer encore leurs travaux de recherche et de ce fait les possibilités d'apporter les connaissances consolidées aux utilisateurs ;
- mettre en place une interface entre le monde de la recherche et les utilisateurs pour faciliter l'accès aux informations disponibles sur cette thématique.

Ces deux objectifs ont été globalement largement atteints même si des axes de progression sont d'ores et déjà identifiés.

Collaboration entre les laboratoires

La collaboration entre les différents laboratoires contribuant au projet DRIAS existait avant le lancement du projet. Elle portait principalement sur les travaux de modélisation climatique, de réalisation de simulations coordonnées et d'analyses communes des résultats de ces simulations.

L'objectif du projet concernant cette collaboration était différent : il s'agissait de valoriser les travaux menés au sein des différents laboratoires par une mise en commun des résultats obtenus et un accès facilité à l'ensemble des données et ce, indépendamment de l'origine des données. La mutualisation de l'information issue des différents laboratoires s'est faite en plusieurs étapes dont le recensement des différentes simulations disponibles au sein des laboratoires, la définition des niveaux de référence pour les jeux disponibles (brut-1, corrigé-2, indices-3) et des listes de variables et indices communs aux équipes, des spécifications sur les formats, les unités, les calendriers. Cet objectif de mutualisation et de normalisation a été largement atteint : un utilisateur via le portail Drias[les futurs du climat] peut accéder indifféremment aux sorties des modèles de simulation climatique des laboratoires impliqués dans DRIAS et ainsi mener les inter-comparaisons de modèle de son choix, les données étant même disponibles sur une grille commune. Du côté des producteurs de simulations, il est aujourd'hui, du fait de l'existence de Drias[les futurs du climat], encore plus évident que les travaux doivent être très cohérents (sorties des modèles, choix des expériences, …).

Il reste évidemment des axes d'amélioration possibles concernant la méthodologie suivie. Le premier axe concerne l'harmonisation des formats utilisés au sein des laboratoires. L'harmonisation de ces formats permettrait de diminuer les coûts de développement pour l'intégration des sorties de modèle au sein de la base de données DRIAS, la multiplication de ces formats impliquant des filières de traitement différentes et donc des coûts et délais pour la prise en compte de ces données. Un effort au sein de la communauté recherche a été mené ces dernières années pour les simulations globales intégrant l'exercice CMIP5 (mise en œuvre des Earth System Grid Datanode). Une approche similaire pourrait être menée pour les simulations régionalisées françaises.

Le second axe concerne la préparation de données et produits prêts à être intégrés dans le portail Drias[les futurs du climat]; il comprend notamment le calcul des indices climatiques associés ainsi que le contrôle des données issues des simulations. L'intégration des filières de contrôle et de calcul d'indices climatiques au sein des modèles eux-mêmes assurerait une meilleure prise en compte future de ces données au sein du référentiel DRIAS. DRIAS invite à poursuivre la réflexion menée en commun entre climatologues modélisateurs et opérationnels pour parfaire l'interface entre la modélisation et la diffusion de produits : l'enjeu est de faciliter une intégration (à rythme approprié) des principaux travaux concertés de la recherche française dans ce système de diffusion au bénéfice de tous. Des projets tels qu'INVULNERABLE ou SECIF destinés à proposer des produits adaptés à des industriels, ou des projets visant des secteurs thématiques, tels CLIMATOR ou CLIMSEC, peuvent fournir des prototypes pour de futurs produits qui intégreraient le portail Drias[les futurs du climat]. L'appel d'offres GICC 2012 a reçu de nombreuses propositions qui ont cité la perspective de transfert de certains résultats vers Drias[les futurs du climat].

La dynamique mise en œuvre pendant le projet devra être entretenue sous une forme encore à définir à ce jour, cette dynamique étant un élément clé pour garantir que le portail Drias[les futurs du climat] continuera à jouer son rôle de valorisation des travaux de recherche des laboratoires.

Interface entre le monde de la recherche et les utilisateurs

La mise en œuvre du portail Drias[les futurs du climat] constituait le livrable principal du projet. Ce portail ouvert en juillet 2012 permet d'assurer l'interface entre le monde de la recherche et les utilisateurs, ces derniers s'adressant auparavant directement aux équipes de recherche.

Ce portail va donc permettre dorénavant de soulager les équipes de recherche sur ce volet et la plateforme Drias[les futurs du climat] va constituer à présent un socle sur lequel les équipes de recherche vont pouvoir s'appuyer pour valoriser leurs futurs travaux.

Le recensement du besoin des utilisateurs a été opéré pendant la durée du projet via le comité des utilisateurs. Il faudra à présent conserver cette dynamique et poursuivre le dialogue établi avec des modalités encore à préciser.

Le service Drias[les futurs du climat] qui est d'ores et déjà en place ("hot-line", formation) contribuera aussi à cette action de recensement des besoins utilisateurs. Les premiers mois de service semblent confirmer les appréciations très positives des utilisateurs : les inscriptions pour commander des données sont nombreuses, des questions pertinentes sont posées, qui montrent combien l'accompagnement mis en place est essentiel – et à développer. L'existence de Drias[les futurs du climat] va certainement contribuer à faire émerger une strate nouvelle d'acteurs intermédiaires, qui solliciteront de façon plus affûtée la recherche climatique et inversement seront mieux en mesure de répondre aux attentes des élus et des citoyens sur la question complexe de l'adaptation. Les perspectives dressées par la recherche, pour répondre au développement des services climatiques, telles qu'exposées au niveau européen dans les prospectives de la JPI Climate ou d'Horizon 2020, seront confortées par les retours du terrain, et peut-être précisées pour les territoires français par l'expression d'attentes particulières.

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

Articles scientifiques publiés, sous presse, soumis et en préparation

Publié

Lémond J., Dandin Ph., Moisselin J.M., Franchistéguy L., Kerdoncuff M., 2010. DRIAS : une composante des services climatiques français, 23e colloque AIC – Risque et Changement Climatique, 1-4 septembre 2010, Rennes, 337-342.

Lémond J., Pagé C., Déqué M., 2011. Le climat futur des régions méditerranéennes françaises : quelles tendances ? *Forêt Méditerranéenne*, XXXII (2), 205-213.

Lémond J., Dandin Ph., Planton S., Vautard R., Pagé C., Déqué M., Franchistéguy L., Geindre S., Kerdoncuff M., Li L., Moisselin J. M., Noël T., and Tourre Y. M., 2011. DRIAS: a step toward Climate Services in France, *Advances in Science and Research*, 6, 179-186, doi:10.5194/asr-6-179-2011, http://www.adv-sci-res.net/6/179/2011/asr-6-179-2011.html.

Soumis

Vautard R., Noël T., Li L., Vrac M., Martin E., Dandin Ph., Cattiaux J., Joussaume S., *en révision*. Climate variability and trends in downscaled highresolution simulations and projections over Metropolitan France. *Climate Dynamics*.

En préparation

Lémond J., Planton S., Ha-Duong M., Dandin Ph. Interpretation of climate change in Europe using maps of analogues.

Articles de vulgarisation

Dandin, P., 2009. DRIAS. In : *Études françaises sur l'adaptation au changement climatique, dossier préparé pour l'événement parallèle du 11 décembre 2009. Conférence des Nations Unies sur le Changement Climatique*, 7-18 décembre 2009, Copenhague, AFPCN (Association Française de Prévention des Catastrophes Naturelles), 55. Versions Fr et UK.

Article DRIAS newsletter GICC n°6, juillet 2010, consultable via le lien http://www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/370#drias.

Article DRIAS newsletter GICC n°8, mai 2011, consultable via le lien http:// www.gip-ecofor.org/gicc/?q=node/366#drias.

Référencement du projet DRIAS au 6e Forum Mondial de l'Eau, Marseille, 12-17 mars 2012, http://www.solutionsforwater.org/solutions/drias-a-steptoward-climate-services-in-France.

Participations aux colloques nationaux ou internationaux

Communications orales

Pagé C., Dandin Ph., Kerdoncuff M., Delecluse P. *Séminaire européen "Climate Services". KNMI*, 11 septembre 2009, De Bilt, Pays-Bas.

Lémond J., Dandin Ph., Moisselin J.M., Franchistéguy L., Kerdoncuff M., Le projet DRIAS : une composante des services climatiques français. *Colloque AIC*, 1-3 septembre 2010, Rennes, France.

Lémond J., Dandin Ph., Moisselin J.M., Franchistéguy L., Kerdoncuff M., Pagé C., Vautard R., Déqué M., Planton S. DRIAS project: A componant of French Climate Services, *10th EMS – 8th ECAC*, ETH, 13-17 September 2010, Zurich, Swiss.

Lémond J., Pagé C., Déqué M. Le climat futur des régions méditerranéennes françaises : quelles tendances ? *Colloque Observer et s'adapter au changement climatique en forêt méditerranéenne*, Hôtel de

Région, 30 Novembre-1er décembre 2010, Marseille.

Lémond J., Dandin Ph., Planton S., Pagé C., Vautard R., Franchistéguy L., Déqué M., Kerdoncuff M., Li L..DRIAS Project: providing Regional Climate Informations over France. *11th EMS – 10th ECAM*, 12-16 September 2011, Berlin, Germany.

Lémond J., Planton S., Ha-Duong M., Dandin Ph. Interpretation of climate change in France using city analogues in the DRIAS climate services project. *11th EMS – 10th ECAM*, 12-16 September 2011, Berlin, Germany.

Lémond J., Dandin P., Planton S., Vautard R., Pagé C., Déqué M., Franchistéguy L., Kerdoncuff M., Li L., Noel T. Le portail DRIAS : Mise à disposition d'informations climatiques régionalisées pour les études d'adaptation et d'impact du changement climatique sur le territoire français. *Colloque de l'AIC 2012*, 5-8 septembre 2012, Grenoble.

Dandin P., Lémond J., Planton S., Vautard R., Pagé C., Déqué M., Franchistéguy L., Kerdoncuff M., Li L., Noel T.. Drias Climat service: Providing regionalised climate informations for impact studies and adaptation in France, *EMS/ECAC 2012*, 10-14 septembre 2012, Lodz.

Poster

Pagé C.,Lémond J.,Geindre S.,Dandin P.,Franchistéguy L.,Kerdoncuff M., Som de Cerff W.J.,Plieger M.,Deandreis C., 2001. Initiatives toward Climate Services in France and in the European Community, *In: WCRP Conference*, 24-28 octobre 2011, Denver, USA.

Communications dans les médias

Conférence de presse

Conférence de presse lancement officiel du portail Drias[les futurs du climat], Météo-France, Saint-Mandé, 24/07/12 (14 journalistes). Information diffusée sur le portail du MEDDE (25/07) : <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Ouverture-du-portail-Drias-les.html> et sur le Portail du Gouvernement (27/07) : <http://www.gouvernement.fr/gouvernement/drias-desprevisions-climatiques-regionales-a-long-terme-a-disposition-sur-internet>.

Radio

France Info, 24/07/12, "Météo-France met en place un outil de modélisation du climat". *France Inter* (07h), 25/07/12, "Le site drias-climat.fr".

RFI (07h), 25/07/12, "Drias ou les prévisions climatiques sur 50 ans". *France Inter "On verra ça demain"*, 08/08/12.

Télévision

France 2, émission Télématin, 25/07/12, "Le futur du climat".

BFM TV, 25/07/12, "Des canicules de plus en plus fréquentes".

France 2, JT 13h, 25/07/12, "Prédire la météo du futur".

France 3 Midi-Pyrénées, 25/07/12, "Quel climat en 2035 ou 2055 ?".

France 3 Franche-Comté, 27/07/12, "La Franche-Comté sera assommée par la chaleur !".

Internet

lemoniteur.fr, 24/07/12, "Intégrer le changement climatique dans les projets de construction".

lafranceagricole.fr, 24/07/12, "Des prévisions régionales à très long terme sur internet".

20minutes.fr, 25/07/12, "Quel temps fera-t-il en 2035, 2055 ou 2085 ?".

desaunay.com, 25/07/12, "Le changement climatique près de chez vous".

france3.fr, 29/07/12, "Les climatologues anticipent la météo".

La TV du web, 01/08/12, "Le changement climatique – Drias : un portail dédié au changement climatique".

Presse papier

Le Parisien, 25/07/12, "Quel temps fera-t-il en 2035 ?".

Le Figaro, 25/07/12, "Connaître le climat de sa région en 2035".

Courrier de l'Ouest, 26/07/12, "On connaît déjà le temps qu'il fera en 2085".

Le Midi Libre, 28/07/12, "Prévisions sur le très long terme : il va falloir agir !".

Le Journal de l'Île de La Réunion, 31/07/12, "Le futur du climat étendu à l'outre-mer à partir de 2013".

Sud-Ouest, 05/08/12, "D'un simple clic, tous sur les climats futurs".

L'Usine à GES, N°88, page 2, juillet 2012.

AFP, 24/07/12, "Des prévisions climatiques régionales à long terme à disposition sur le net".

Agra Fil, 25/07/12, "Météo-France met en ligne les données sur le changement climatique".

III

Adaptation au changement climatique au service du territoire

Didier Richard, ingénieur en chef des ponts, des eaux et des forêts, Irstea Grenoble
Membre du conseil scientifique du programme

L'adaptation au changement climatique va largement se jouer au niveau des territoires et des acteurs de ces territoires. Pour reprendre un slogan devenu célèbre largement employé en matière de développement durable, il s'agit là aussi de « penser global, agir local ». Ce serait cependant une erreur de penser que parce qu'il s'agit d'agir localement, c'est plus simple. Les systèmes territoriaux sont des systèmes éminemment complexes, où interagissent des espaces, des milieux, des espèces, des acteurs, des activités, des ressources, des usages, et la liste serait encore longue…, le tout interagissant également bien sûr avec des forçages et des influences climatiques.

Le programme GICC soutient des projets qui se confrontent à cette complexité ou à tout le moins à une partie de cette complexité, dont quelques exemples sont présentés ci-après.

Le projet R^2D^2 2050, par exemple, coordonné par Eric Sauquet (Irstea), aborde la question de la gestion de l'eau dans le bassin de la Durance. Ce territoire, très contrasté en termes hydrologiques et climatiques, présente en outre une grande diversité des usages de l'eau, traditionnels et émergents, dont les modifications, combinées aux évolutions climatiques, sont susceptibles d'impacter la disponibilité en eau et les conditions de répartition entre ses usages. Des scénarios prospectifs de territoire ont été construits avec les acteurs impliqués dans la gestion de l'eau sur cette région, et déclinés en scénarios de demandes en eau. Ces derniers ont ensuite été traduits en valeurs quantifiées des paramètres permettant de lancer des simulations par plusieurs combinaisons de modèles construites en parallèle, pour rendre compte de l'hydrologie, des besoins pour l'irrigation, l'alimentation en eau potable et la gestion des ouvrages hydroélectriques, et représenter aussi fidèlement que possible le fonctionnement de ce grand bassin versant.
Le projet C3E2 quant à lui, coordonné par Pierre Le Hir (Ifremer), s'intéresse tout particulièrement aux systèmes estuariens, dont la dynamique de la morphologie et de la couverture sédimentaire peut être modifiée sous l'influence du changement climatique et de contrôles anthropiques éventuels. Ces modifications peuvent à leur tour contraindre certains usages, la capacité d'adaptation de l'activité agricole en particulier en dépend largement. Le projet se concentre sur l'utilisation d'un modèle hydrosédimentaire adapté, rendant compte des interactions entre hydrodynamique, transport sédimentaire et évolutions morphologiques, pour la détermination de scénarios des réponses possibles de différentes configurations schématiques d'estuaires. Ce modèle a ensuite été appliqué à l'estuaire de la Loire, où des mesures hydro-sédimentaires étaient réalisées en parallèle, pour 4 scénarios d'évolutions climatiques, permettant d'imaginer les évolutions associées de la végétation et leurs impacts éventuels sur les usages liés à l'agriculture et à la chasse.
Coordonné par M. Hervé Quesnol (Université Rennes 2), le projet TERADCLIM s'adresse à la filière viticole et porte sur l'étude des impacts du changement climatique à l'échelle des terroirs, dont la mise en valeur représente un outil de commercialisation important. Une modélisation climatique à cette échelle s'appuie sur des observations climatiques et agronomiques in situ. Une modélisation systémique multi-agents permet ensuite de modéliser les activités viticoles en prenant en compte l'impact des variations climatiques sur la dynamique de la vigne, et d'analyser l'évolution (et l'adaptation) des stratégies de production dans un contexte de changement climatique intégrant les scénarios du GIEC.

Ces projets sont autant d'illustrations des questions que pose l'adaptation aux changements climatiques sur un territoire pour la gestion d'une ressource, les usages d'un milieu, ou une filière professionnelle. Ils démontrent également avec force la nécessité de disposer de données et d'observations adaptées, à la bonne échelle.
Ils illustrent enfin, chacun dans son domaine et à sa façon l'ampleur du challenge pour appréhender la dynamique d'un territoire dans toutes ses dimensions, intégrant les différents espaces, les différents secteurs et filières d'activité, les différentes ressources, etc …, ainsi que leurs multiples relations et interactions.

C'est un challenge que d'autres projets doivent continuer d'essayer de relever.

R²D² 2050 : Risque, Ressource en eau et gestion Durable de la Durance en 2050

PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Date d'engagement : 23 décembre 2010

Montant du budget : 1 410 519 € TTC dont 421 920,68 € TTC de subvention du service de la recherche du ministère chargé du développement durable.

Coordinateurs :

Eric Sauquet

Irstea, centre de Lyon-Villeurbanne

Unité de recherche hydrologie-hydraulique,

5 rue de la Doua CS70077, 69626 Villeurbanne cedex, France

eric.sauquet@irstea.fr

Partenaires Scientifiques :

Irstea, centres de Lyon-Villeurbanne et d'Antony

EDF, R&D LNHE Chatou, DTG Grenoble

UMR METIS, UPMC Paris

LTHE Grenoble

SCP Le Tholonet

ACTeon antennes de Colmar et de Grenoble

Mots clés :

Durance, évolution climatique, ressource en eau, prospective, usages, impacts socio-économiques.

Objectifs des recherches :

L'objectif du projet R²D² 2050 est d'analyser l'impact hydrologique et socio-économique du changement climatique dans le bassin de la Durance à l'horizon 2050. Il met à jour pour partie les résultats du projet GICC-Rhône[1], en se concentrant sur un des affluents majeurs du Rhône et complète l'étude "Explore 2070" réalisée à l'échelle nationale[2]. Les verrous scientifiques ont porté principalement sur la construction d'une représentation fidèle du fonctionnement actuel de ce grand bassin versant très contrasté en termes de régime hydrologique et de climat, fortement anthropisé et sujet à de nombreux transferts d'eau vers l'extérieur, sur l'élaboration d'une vision prospective quantifiée du devenir de la gestion de l'eau, impliquant les acteurs du territoire et sur la quantification des incertitudes permettant de hiérarchiser la part relative des différentes sources à l'origine de ces incertitudes.

1 Leblois E., 2002. Evaluation des possibles impacts du changement climatique par modélisation distribuée (projets Gewex-Rhône et GICC-Rhône). *La Houille Blanche*, 8, 78-83, doi:10.1051/lhb/2002112.

2 Chauveau M., Chazot S., Perrin C., Bourgin P.-Y., Sauquet E., Vidal J.-P., Rouchy N., Martin E., David J., Norotte T., Maugis P., de Lacaze X., 2013. Quels impacts des changements climatiques sur les eaux de surface en France à l'horizon 2070 ? *La Houille Blanche*, 4, 5-15, doi:10.1051/lhb/2013027.

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

Introduction

Le bassin versant de la Durance, cours d'eau majeur du sud-est de la France, se caractérise par une grande diversité des usages traditionnels de l'eau tels que l'agriculture irriguée, l'hydroélectricité, l'alimentation en eau potable et l'industrie, mais aussi par des demandes sociétales récentes (loisirs liés à l'eau, préservation de la qualité des milieux). Ces usages sont des activités importantes pour le développement du territoire qui vont au-delà des limites naturelles des bassins versants de la Durance et du Verdon.

L'évolution démographique, la montée en puissance des préoccupations environnementales (notamment au travers de l'application de la directive cadre sur l'eau) et le développement économique devraient continuer d'influencer les usages établis (alimentation en eau potable, énergie, irrigation) et ceux émergents (service écologique, tourisme). S'ajouterait, aux évolutions socio-économiques et démographiques du territoire, l'impact du changement climatique. Les effets combinés de demandes en eau modifiées et d'évolution du climat devraient avoir, semble-t-il, une incidence sur la disponibilité en eau et la clef de répartition entre les usages de l'eau.

Le projet R²D² 2050, soutenu financièrement par le programme GICC et par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, a eu pour objectif principal d'évaluer les impacts des évolutions anthropiques et climatiques sur la gestion de l'eau à l'échelle de la Durance en se focalisant sur l'équilibre offre-demande en eau des territoires sécurisés par les grandes réserves hydrauliques de la Durance et du Verdon, à l'horizon 2050.

Matériels et méthodes

Une chaîne de modélisation numérique a été développée et mise en place sur le territoire (Figure 1), incluant des représentations actuelles et futures : du climat, de la ressource naturelle, des demandes et prélèvements en eau pour l'agriculture, l'industrie et l'alimentation en eau potable et du fonctionnement des grandes réserves hydrauliques. L'approche multi-modèle et multi-scénario permet d'appréhender pour partie les incertitudes liées à l'exercice.

Les résultats sont fournis en différents points du bassin versant de la Durance en amont de Mallemort (Figure 2). Les principaux points de restitution sont des stations hydrométriques actuellement en fonctionnement : la Durance à Serre-Ponçon, à l'Escale, à Cadarache et à Mallemort, le Buech à Serres, le Verdon à Sainte-Croix et à Castillon.

Le climat actuel est décrit par deux ré-analyses préexistantes : SPAZM[3] et SAFRAN[4] et une nouvelle archive "Durance météO" DuO[5], créée pour les besoins du projet. DuO, fruit de l'hybridation des deux ré-analyses cherche à tirer parti des qualités de SPAZM (résolution spatiale 1 km) et de SAFRAN (disponibilité au pas de temps horaire). L'évapotranspiration de référence est calculée selon la formule de Penman Monteith[6] afin de s'approcher au mieux du référentiel des agronomes.

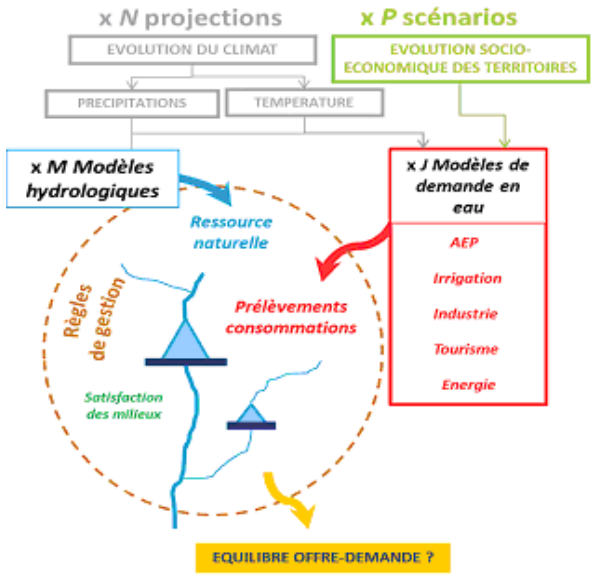


Figure 1 – Différentes composantes de la chaîne de modélisation

Les projections climatiques ont été générées par trois méthodes de descente d'échelle statistiques appliquées à une sélection de sorties de modèles de grande échelle (GCMs), toutes basées sur l'approche par analogie et déjà éprouvées dans le cadre du projet ANR RIWER2030[7]. Pour satisfaire aux exigences des modèles d'impact, la grille de restitution des méthodes de descente d'échelle est définie par le maillage 8x8 km de SAFRAN.

Sept modèles hydrologiques de structures différentes, et *a priori* à la sensibilité différente sous climat modifié ont été retenus pour simuler les évolutions passées de la ressource naturelle. Six d'entre eux ont été forcés par des climats futurs. Un protocole commun de test de ces modèles a été mis en place afin d'évaluer leur capacité à reproduire le comportement hydrologique des bassins versants dans les conditions naturelles actuelles.

3 Gottardi F., Obled C., Gailhard J., Paquet E., 2012. Statistical reanalysis of precipitation fields based on ground network data and weather patterns: Application over French mountains. *Journal of Hydrology*, 432–433, 154-167.

4 Vidal J.-P., Martin E., Franchisteguy L., Baillon M., Soubeyroux, J.M., 2010. A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *International Journal of Climatology*, 30, 11, 1627-1644, doi: 10.1002/joc.2003.

5 Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Gascoin S., 2013. Introducing hysteresis in snowdepletion curves to improve the water budget of a land surface model in an alpine catchment. *Journal of Hydrometeorology*, doi:10.1175/JHM-D-13-091.1.

6 Allen R. G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. Crop Evaporation – Guidelines for computing crop water requirements, Irrigation and drainage paper 56, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma.

7 Hingray B., Hendrickx F., Bourqui M., Creutin J.D., François B., Gailhard J., Lafaysse M., Le Moine N., Mathevet T., Mezghani A., Monteil C., 2013. RIWER2030: Climats Régionaux et Incertitudes, Ressource en Eau et Gestion associée de 1860 à 2100. Projet ANR VMCS 2009-2012. Rapport final, 60 p.

Trois modèles de complexité variée estimant les besoins en irrigation (FIVE CoRE, SiSPAT et MODIC) ont été appliqués sur neuf cultures emblématiques du bassin de la Durance[8]. Seul l'un d'entre eux, MODIC, a pu être généralisé à l'ensemble du territoire.

Un modèle statistique sur la base d'une fonction économétrique[9] a été développé pour représenter la demande en eau potable (AEP).

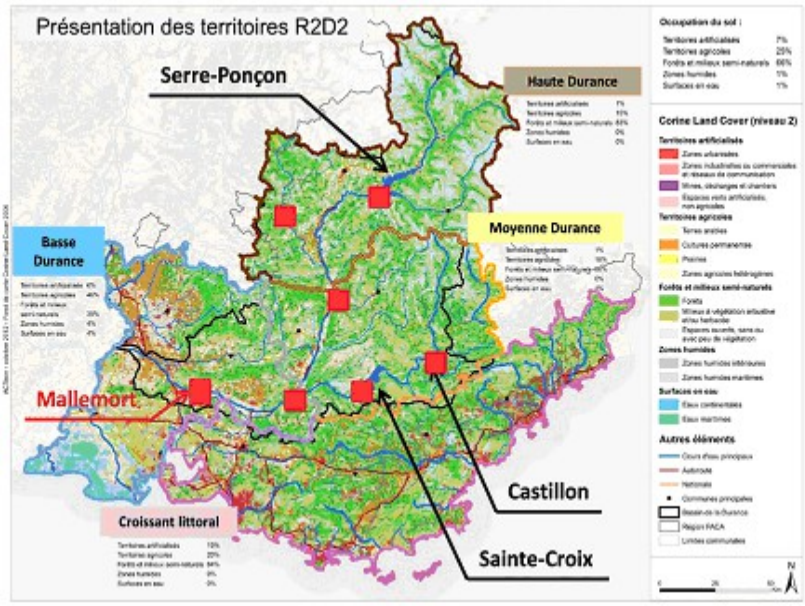


Figure 2 – Territoires d'étude, ouvrages hydrauliques d'intérêt, occupation du sol et points d'analyse des modélisations (■).

Enfin, un outil de simulation des grands ouvrages hydrauliques (Serre-Ponçon, Castillon, Sainte-Croix), baptisé MORGLite, inspiré de la pratique opérationnelle d'EDF et dans la continuité de premiers travaux sur la simulation de la gestion des ouvrages hydroélectriques[10], a été élaboré pour représenter le lien entre leurs gestions, les sollicitations du système Durance-Verdon et les objectifs de remplissage des réserves, de respect des débits réservés et de cotes touristiques.

Les simulations en temps futur ont volontairement été menées en conservant les règles de gestion actuelles, sans limiter la sollicitation des réserves en eau à leur valeur contractuelle et sans modifier les objectifs de remplissage, afin de faire émerger le nouveau champ de contraintes auquel chaque usage pourrait être exposé en absence de mesures d'adaptation.

Cet ensemble de modèles a permis de reproduire de manière satisfaisante le fonctionnement actuel des composantes naturelles et anthropiques de l'hydrosystème prenant en compte les principaux processus, leurs interactions et leur spatialisation.

Un exercice de prospective a été mené avec le soutien d'acteurs impliqués dans la gestion de l'eau pour construire quatre scénarios de développement socioéconomique des secteurs connectés au système Durance-Verdon. Ces scénarios "littéraires" ont fait l'objet d'une quantification[11,12], *i.e.* un conditionnement des valeurs assignées aux paramètres des modèles de besoin en eau (par ex. évolution des assolements, évolution démographique…).

La sensibilité des milieux au changement climatique a été examinée sur l'Asse, cours d'eau intermittent caractéristique des Préalpes du sud. Cette étude a mis en œuvre deux des modèles hydrologiques, une procédure de reconstitution d'assecs le long du linéaire, exploitant des campagnes de jaugeage et des relations empiriques établies à partir d'échantillons prélevés *in situ* entre richesse biologique et intermittence[13].

Résultats

Connaissance et représentation de la Durance dans le contexte actuel

Le travail conséquent d'analyse des prélèvements, des transferts d'eau et des usages a permis de connaître les pressions actuelles pesant sur le système Durance-Verdon, de comprendre les principaux facteurs explicatifs des évolutions récentes et, *in fine*, de reconstituer des chroniques de débits naturalisés sur la partie aval du territoire au pas de temps journalier. Les séries de prélèvements issues des redevances de l'agence de l'eau et des débits observés et naturalisés disponibles sur la période 1980-2009 ont constitué la référence pour qualifier la pertinence des modèles d'impact en temps présent.

8 Braud I., Tilmant F., Samie R., Le Goff I., 2013. Assessment of the SiSPAT SVAT model for irrigation estimation in south-east France. *In : International Conference on Monitoring and Modeling Soil-Plant-Atmosphere Processes*, 19-20 juin 2013, Naples, Italie, Procedia Environmental Sciences, 19, 747-756. doi: 10.1016/j.proenv.2013.06.083.

9 García-Valiñas M.A., Nauges C., Reynaud A., 2009. How much water do residential users really need? An estimation of minimum water requirements for French households. *In: Proceedings of the 17th Annual Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists*, 24-27 June 2009, Amsterdam, The Netherlands, 18 p.

10 Hendrickx F., Sauquet E., 2013. Impact of warming climate on water management for the Ariège river basin (France). Hydrological Sciences Journal, doi: 10.1080/02626667.2013.788790.

11 Samie R., Arama Y., Bouscasse H., Sauquet E., Hendrickx F., 2014. La prospective, un outil de réflexion stratégique sur la gestion future de la ressource en eau à l'échelle d'un territoire : l'exemple du bassin de la Durance (France). *In : FRIEND-Water 2014, Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, February 2014, Hanoi, Vietnam (IAHS Publ. 364, 2014), 221-227.

12 Bouscasse H., 2013. Renforcer l'interface entre chercheurs et acteurs de l'eau: mais que nous offrent les exercices de prospectives territoriales ? *In : Entretien Jacques Cartier, Colloque 8 : Gestion des risques face aux changements climatiques*, 25-26 nov. 2013, Lyon, France.

13 Cipriani T., Tilmant F., Branger F., Sauquet E., Datry T., 2014. Impact of climate change on aquatic ecosystems along the Asse River Network. *In : FRIEND-Water 2014, Hydrology in a Changing World: Environmental and Human Dimensions*, February 2014, Hanoi, Vietnam (IAHS Publ. 364, 2014), 463-468.

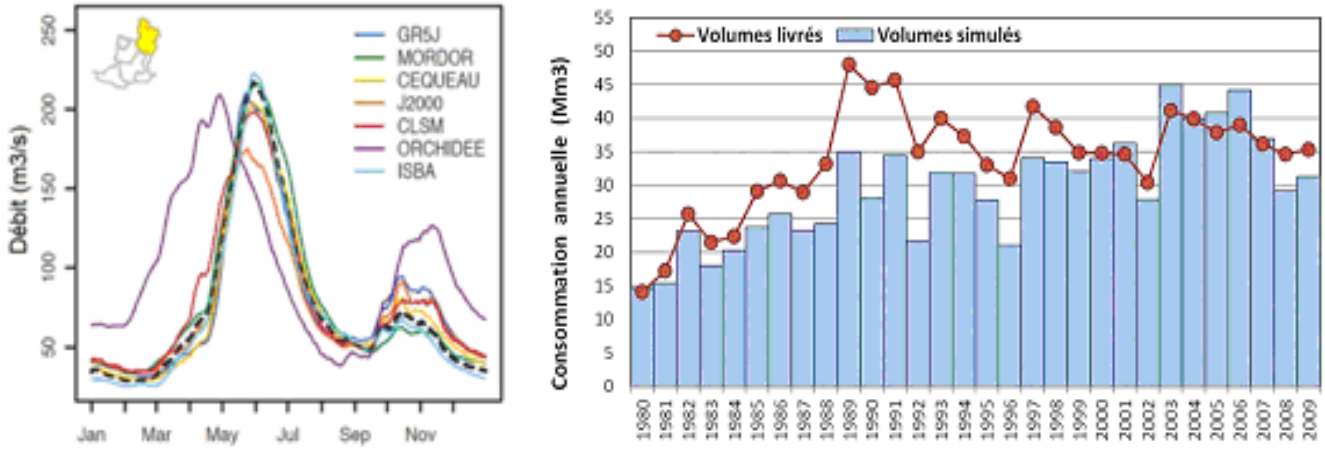


Figure 3 – Résultats de simulation des outils mobilisés dans R²D² 2050, en haut les débits décadaires moyens interannuels observés et simulés pour la Durance à Serre-Ponçon, en bas les consommations annuelles en eau d'irrigation simulées par le modèle FIVE-CoRe et livrées sur le périmètre desservi par la SCP

L'analyse des séries de débits simulés par les modèles hydrologiques montre l'existence de différences notables entre modèles sur près de 25 bassins étudiés. Les origines de ces écarts sont partiellement expliquées en examinant les variables internes et les modalités choisies pour l'application des modèles. Aucun des modèles ne semble meilleur que les autres sur l'ensemble des critères ou des stations (Figure 3, gauche), ce qui rejoint les conclusions de précédents exercices de comparaison. Le projet a mis en lumière des similitudes inattendues entre modèles aux structures pourtant fondamentalement distinctes.

Evolution de l'hydro-climatologie du bassin de la Durance à l'horizon 2050

Un ensemble de projections a été élaboré à partir de onze simulations globales réalisées par quatre GCMs différents issus du projet européen ENSEMBLES[14]. Les méthodes de descente d'échelle considérées intègrent une composante stochastique, chaque simulation a pu ainsi être déclinée en 100 réalisations possibles (d'où un total de 3300 projections disponibles). Cependant, la quantité de projections élaborées s'est révélée au-delà des capacités de calcul associées aux différents modèles d'impact. Une méthodologie[15] à base d'échantillonnage par hypercubes latins a été mise en place afin de réduire le nombre de projections utilisées en entrée des modèles d'impact en préservant la diversité des sources d'incertitudes et les caractéristiques statistiques, en termes de changements entre le présent et le futur, présentes dans l'ensemble initial.

Le changement climatique envisagé sur la période 2036-2065 et ses effets sur la ressource naturelle, mesuré sur la base des 330 projections, par rapport à la période 1980-2009 (Figure 4) se traduit par les évolutions suivantes :

- une augmentation des températures moyennes de l'ordre de 1.5°C, et pouvant aller jusqu'à 3°C, plus importante l'été ;
- une forte incertitude sur l'évolution des précipitations ;
- une réduction de la ressource en eau estivale (par ex. -20 m3/s pour le débit d'étiage moyen d'août à Cadarache) ;
- une diminution des stocks de neige et une fonte avancée dans l'année qui induisent une réduction des débits au printemps ;
- une évolution de la ressource annuelle (par ex. autour de -20 m3/s avec un intervalle entre -70 et +40 m3/s à Cadarache) ;
- des évolutions incertaines des débits hivernaux, du fait notamment de la forte variabilité dans les projections sur les pluies.

Evolution des usages sur le bassin de la Durance à l'horizon 2050

Une manière d'appréhender l'incertitude de l'avenir socio-économique est de s'appuyer sur un faisceau de scénarios plausibles contrastés. Deux options s'offraient : faire des scénarios de demande en eau future ou faire des scénarios de territoire et en déduire une demande en eau. C'est la seconde option qui a été choisie. Il convient de rappeler les précautions de lecture et d'interprétation de ces scénarios :

(1) à l'instar du futur climatique, le devenir socio-économique du territoire n'est certainement pas parmi les scénarios élaborés, qui ne sont que des conjectures n'ayant de valeur qu'au regard de ce qu'elles essayent de tester,

(2) d'autres scénarios auraient pu expliquer un même "niveau" de demande en eau,

(3) les scénarios ont été construits indépendamment de l'évolution du climat.

14 Van der Linden P., Mitchell J.F.B., 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Summary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre.

15 Vidal J.-P., Hingray B., 2013. Sub-sampling ensembles of downscaled climate projections. *In: 12th International Meeting on Statistical Climatology, Program & abstract*, 24 juin 2013, Jeju, Corée du Sud, 126-127.

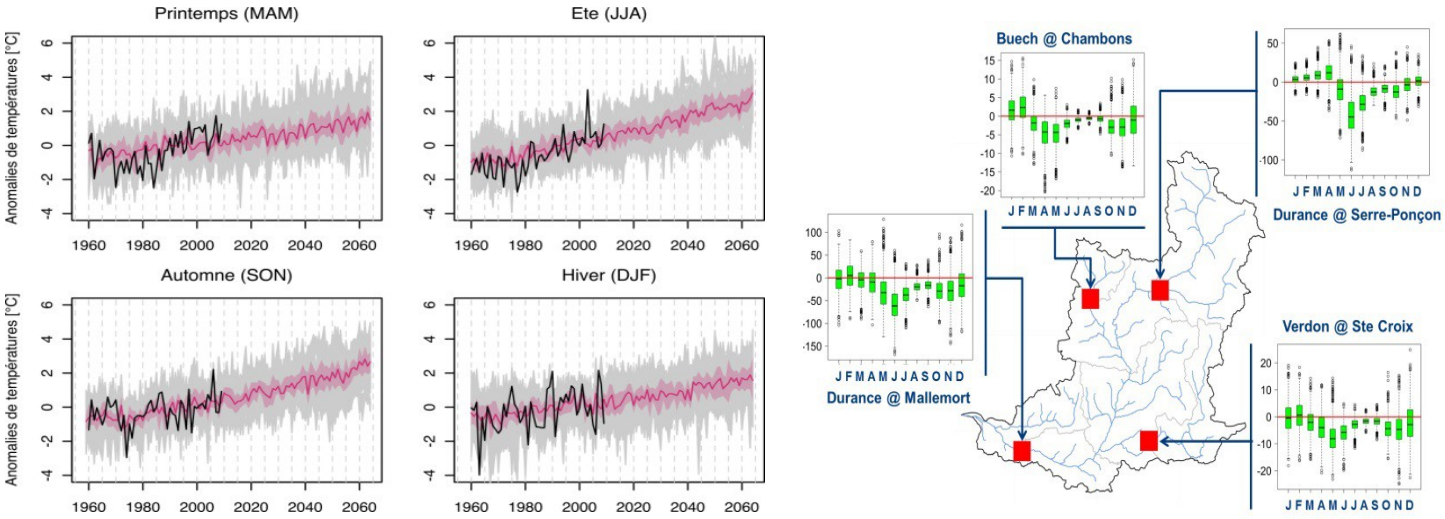


Figure 4 : Evolution des anomalies de températures saisonnières moyennes du bassin de la Durance à sa confluence avec le Rhône (en haut; les anomalies des 330 projections climatiques sont tracées en gris, la médiane est en rose foncé et l'enveloppe rose est l'intervalle entre les premier et troisième quartiles; les forçages DuO sont représentés en noir) et changements de débits mensuels exprimées en m3/s (en bas) sur la période 2036-2065, par rapport à la période de référence 1980-2009 (les boites sont définies par les premiers et troisièmes quartiles).

L'approche envisagée a l'avantage d'ancrer quatre scénarios dans un contexte territorial avec les cohérences internes (ex. compétition entre usages) imposées à l'heure actuelle ou émergentes dans le futur. L'exercice de prospective a mobilisé l'expertise des acteurs du territoire sur le bassin de la Durance dans le cadre de trois réunions, organisées en octobre 2012. Le résultat est quatre scénarios prospectifs pour le territoire (*investissement, spécialisation, écologie, crise*, voir Figure 5).

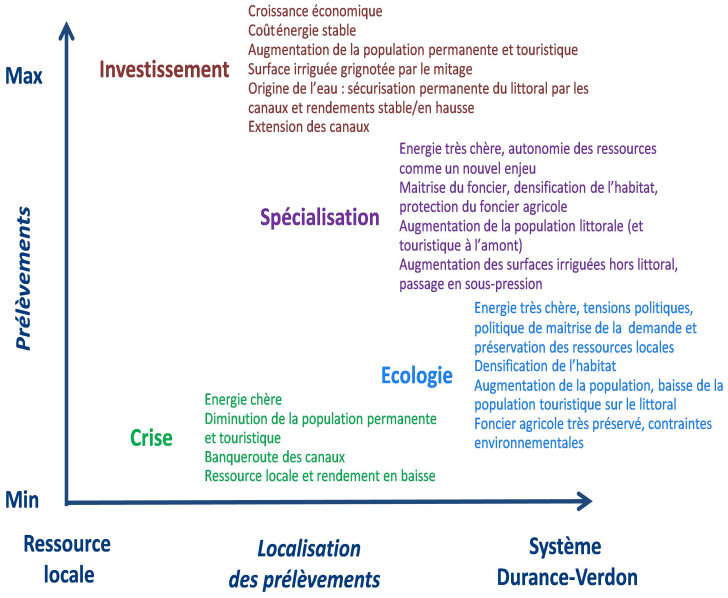


Figure 5 – Principales caractéristiques des quatre scénarios prospectifs pour le territoire

S'y ajoutent les scénarios *tendanciel* et *business-as-usual*, ce dernier, baptisé *Niv2010*, est calqué sur une photographie du territoire en 2010. Au total, six scénarios ont été proposés.

L'interprétation chiffrée des scénarios socio-économiques conduit à deux futurs avec des surfaces irriguées en augmentation et deux en diminution (Figure 6, en haut). Le scénario *tendanciel* propose une réduction en cohérence avec les évolutions récentes observées sur le territoire.

Ces futurs se traduisent, à l'échelle du territoire, par des demandes en eau contrastées (total des prélèvements hors alimentation des canaux), avec une hausse sensible pour le scénario *investissement* et une baisse prononcée pour le scénario *crise*, et par des prélèvements réduits par rapport à la période 1980-2009 (Figure 6, en bas). La demande en eau potable est très dépendante de la démographie et de l'exploitation ou non des ressources locales et conduit dans certains scénarios à des transferts accrus. La combinaison des hypothèses conduit à des baisses sensibles allant de 19% pour le scénario *spécialisation* (amélioration des rendements des canaux) à 30% pour le scénario *crise* (agriculture irriguée et AEP en berne).

L'examen de la dispersion des résultats semble indiquer que les évolutions des prélèvements sont plus sensibles aux facteurs socio-économiques qu'au facteur climat.

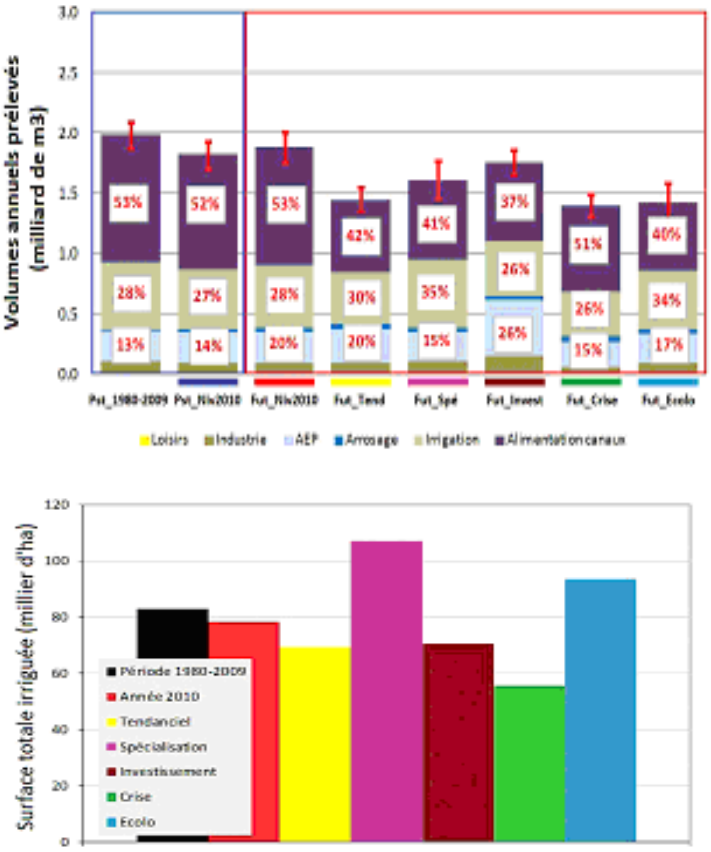


Figure 6 – Evolution de la surface totale irriguée considérée dans MODIC (en haut) et prélèvements par usage avec MODIC, modalité Cycle Fixe (en bas) selon les six scénarios socio-économiques sous les climats temps présent (Pst) et 2050 (Fut) issus de la sélection de dix projections climatiques régionalisées, à l'échelle du système Durance-Verdon. Les segments en rouge représentent la dispersion des résultats induite par les dix climats modélisés

La Figure 7 illustre les sorties de MORGLite obtenues sur la base d'une gestion inchangée. Sont représentées les valeurs moyennes de consommation des tranches d'eau réservées sur la Durance à Serre-Ponçon, ainsi que le nombre et l'intensité des consommations annuelles dépassant la valeur contractuelle de 200 Mm3. Sur la Durance, un territoire avec des pratiques maintenues au niveau 2010, verrait fortement augmenter la consommation moyenne (+100 %) avec de nombreux dépassements annuels de 200 Mm3. En revanche, sur les cinq autres devenirs envisagés, grâce notamment au maintien ou à l'amélioration des rendements des canaux d'irrigation, le recours à la tranche d'eau serait soit stable, soit légèrement à la baisse, du fait d'une réduction de la sollicitation par rapport à la situation en temps présent. Le constat est différent sur le Verdon.

Les devenirs du territoire conduiraient à une hausse de la consommation moyenne conséquence d'une demande accrue en AEP et trois d'entre eux pourraient occasionner des dépassements fréquents de la valeur 85 Mm3, équivalent de la tranche d'eau mobilisable de Castillon, sans pour autant dépasser le cumul des tranches d'eau des deux retenues Sainte-Croix et de Castillon (225 Mm3).

Incertitudes sur le diagnostic à l'horizon 2050

La richesse des approches et disciplines abordées dans le projet a permis d'engager une réflexion sur les incertitudes sur le devenir de la gestion de l'eau du système Durance. De nombreuses sources d'incertitude ont été identifiées, mais pas toutes quantifiées. C'est le cas des incertitudes relatives aux données de base (climat, hydrologie et usages).

L'examen des simulations des besoins en eau des plantes en temps présent sur neuf cultures montre une grande variabilité des estimations entre les différents modèles testés. Ces différences s'estompent dès lors que les anomalies entre présent et futur sont exploitées pour caractériser l'impact du changement climatique. La prise en compte ou non de l'évolution de la phénologie des cultures induite par le changement climatique est également une source d'incertitude partiellement examinée dans le projet. Ici sa prise en compte a révélé que la phénologie influence peu les usages énergétiques et touristiques des réservoirs.

Les débits naturels futurs ont fait l'objet d'un examen détaillé des incertitudes associées grâce à l'approche multi-modèles. Il est apparu que la majeure partie des incertitudes sur les débits moyens annuels provient de la modélisation climatique globale, qui intervient via la quantité de précipitations projetée.

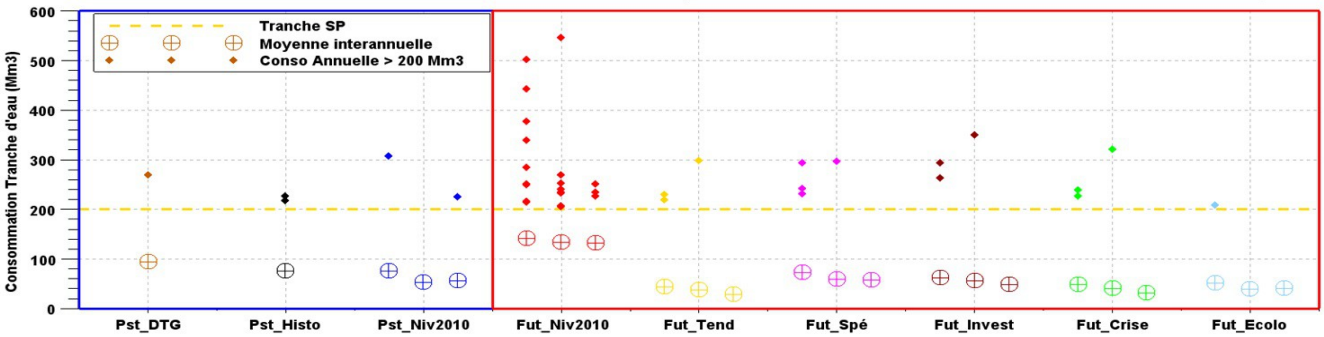


Figure 7 – Consommations annuelles moyennes et supérieures au seuil 200 Mm3 (tranche Serre Ponçon) sur la ressource disponible à Serre-Ponçon (SP), estimée par les outils opérationnels (DTG) et reconstituée par les outils de R²D² 2050 (Histo) et simulée en temps présent (Pst) et à l'horizon 2050 (Fut) selon les six scénarios socio-économiques et les trois projections climatiques régionalisées

Cette dernière est fortement incertaine du fait de la variabilité naturelle chaotique du climat[16]. Pour des variables plus intimement liées aux processus de surface, comme l'évapotranspiration ou les débits d'étiages estivaux, la part d'incertitude liée à la modélisation hydrologique s'avère loin d'être négligeable et augmente avec l'échéance des projections.

Au-delà de l'analyse de l'incertitude structurelle des modèles hydrologiques, les modalités de calage des paramètres peuvent influencer la réponse des modèles. Cependant les choix de calage semblent de second ordre sur l'évolution des débits annuels face à l'incertitude provenant des forçages[17].

Conclusions – Perspectives

Le projet R²D² 2050 a contribué à améliorer la connaissance du fonctionnement du bassin versant de la Durance et des territoires connectés via les transferts d'eau, par le recueil de données d'origines physique, biologique et socio-économique. Cette base de connaissance a permis la mise en place et le développement d'outils dédiés à la modélisation de la gestion de l'eau et des interactions entre ressources en eau locales et volumes stockés en amont dans les grandes réserves. Une réelle difficulté est apparue lors de l'interprétation des données relatives aux usages. Des scénarios pour le futur ont été construits, non sans difficulté, avec les acteurs, réinterprétés dans les modèles et finalement combinés avec les évolutions climatiques pour fournir une vision quantifiée des besoins en eau du territoire en 2050.

Les modifications du climat engendrent une baisse notable de la ressource naturelle à l'horizon 2050. Les évolutions du territoire induisent des demandes en eau très contrastées.

À territoire inchangé, la sollicitation de la réserve de Serre-Ponçon devrait augmenter du fait de la baisse de la ressource locale. La tranche d'eau réservée serait plus fréquemment insuffisante. Les cinq devenirs envisagés du territoire incluant la poursuite de programmes d'économies d'eau proposent une vision opposée avec une baisse de la sollicitation qui permet de contenir plus aisément l'utilisation de la réserve agricole. La vision sur le système Verdon est différente : à usage maintenu au niveau 2010, les sollicitations aval des ouvrages sont légèrement sensibles au climat affichant une faible augmentation. Seuls trois scénarios du territoire (*spécialisation, investissement, tendanciel*) conduisent à une augmentation de la sollicitation des réservoirs du Verdon pouvant dépasser la tranche de Sainte-Croix mais sans jamais épuiser l'ensemble des réserves allouées.

La production d'énergie est directement impactée par la baisse de la ressource naturelle. La baisse probable des apports de fonte conduit à contraindre davantage la remontée de cote avant l'été avec un objectif de remplissage lié aux cotes touristiques inchangé. La réserve énergétique saisonnière est dans ces conditions fortement réduite, quels que soient les devenirs des territoires, notamment sur le Verdon.

Si l'usage touristique de Serre-Ponçon semble pouvoir être sensiblement préservé sous réserve d'une évolution du territoire fondée sur une économie d'eau substantielle, celui de Sainte-Croix et Castillon semble plus délicat à garantir dans la configuration actuelle.

Sur la base des hypothèses retenues dans le projet R²D² 2050, l'effet du changement global sur la Durance semble pouvoir être contenu sur les secteurs sécurisés par le système Durance-Verdon sous réserve que l'avenir du territoire se développe à l'intérieur du faisceau des scénarios choisis ici. Des sensibilités différentes sur la sollicitation des réserves de la Durance et du Verdon ont pu s'exprimer.

Elles nécessiteront de repenser l'équilibre entre les usages et de faire évoluer les règles de gestion de la ressource en eau… Sur les territoires dépendants de la seule ressource locale (non sécurisés), la situation pourrait être critique avec des sécheresses plus fréquentes et des arrêtés de limitation des usages qui pourraient fort bien réduire la capacité à prélever. Dans tous les cas, il sera nécessaire de mettre en œuvre des mesures d'adaptation.

Les perspectives sont forcément nombreuses. Du point de vue méthodologique, les modèles, globalement satisfaisants sont tous améliorables… sous réserve de l'existence d'observations adaptées. Le projet R²D² 2050 a été l'occasion d'améliorer la représentation des processus de constitution et de fonte de la neige dans les modèles hydrologiques, mais son implémentation requiert des mesures du manteau neigeux.

Seules trois projections hydro-climatiques ont présenté des qualités suffisantes pour être exploitées par le modèle de gestion des réserves, du fait de biais présents dans les simulations de débit en temps présent. La représentation fine de l'anthroposystème a en effet fait émerger un niveau d'exigence plus élevé sur la performance des modèles hydrologiques.

Tout le potentiel des outils développés aurait mérité d'être exploité plus en avant. Ainsi, la question d'un nouveau mode de gestion n'a pu être abordée. L'adaptation sur le territoire est présente implicitement au travers de la poursuite de mesures d'économie d'eau introduites dans les scénarios. D'autres stratégies restent à construire avec les acteurs.

16 Hingray B., Saïd M., 2014. Partitioning internal variability and model uncertainty components n a multimodel multireplicate ensemble of climate projections. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLID- 3-00629.1.

17 Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Brigode P., 2014. Sensitivity to the calibration period and ransferability of the Catchment Land Surface Model parameters under changing climate: a case study n the Durance watershed, France. *Hydrological Sciences Journal*, accepté.

II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Le projet R²D² 2050 a répondu pour partie aux questions sur le caractère durable du système Durance-Verdon dans sa configuration actuelle. C'est une contribution aux fiches-actions "eau" et "recherche" du plan national d'adaptation au changement climatique PNACC[18,19] encourageant l'amélioration des connaissances sur les impacts du changement climatique sur les ressources en eau et de différents scénarios possibles d'adaptation. Les résultats des modèles hydrologiques confirment une réduction de la ressource naturelle en milieu de siècle. Il est à noter que le nombre de modèles exploités pour représenter le climat et l'hydrologie et donc de trajectoires futures esquissées est beaucoup plus important que dans l'étude "Explore 2070" (en ce sens, le projet R²D² 2050 est certainement, à ce jour, l'exercice le plus riche réalisé en France). Le caractère régional confère plus de confiance aux conclusions établies du projet R²D² 2050 sur le secteur Durance-Verdon, par rapport aux autres études à portée nationale.

En comparaison avec les analyses prospectives réalisées dans "Explore 2070" ou dans l'étude prospective réalisée à l'échelle du bassin de la Garonne[20], et du fait des réserves à usage multiple constituées sur la Durance et le Verdon et des modalités de partage et d'anticipation qui se sont mises en place progressivement, le système Durance-Verdon apparaît comme étant relativement robuste aux changements climatiques en comparaison avec les bassins versants des régions voisines du Sud de la France. Le traitement du changement global sur ce secteur a été particulièrement difficile du fait de la complexité naturelle du bassin versant et des interactions multiples avec les activités économiques. L'exercice, même incomplet puisque l'effet sur le milieu n'a pas pu être traité, a nécessité plus de trois ans d'effort soutenu de collecte de données et de mise en cohérence de ces données au travers notamment de modèles numériques. Il reste à progresser sur la mise à disposition de données relatives à la gestion de l'eau. En absence d'information quantifiée, il sera délicat de construire des outils intégrés qui représentent les actions actuelles de prélèvements nets sur les cours d'eau et qui, alimentés par des projections climatiques, permettront d'anticiper objectivement le futur. En termes de hiérarchie des incertitudes pesant sur les usages, le facteur climat apparaît secondaire devant les trajectoires socio-économiques possibles suivies par le territoire. La durabilité du système Durance-Verdon dépend de ce qu'on veut faire des activités sur les secteurs sécurisés par cet ensemble d'ouvrages.

Ceci justifie le soutien d'actions favorisant le dialogue entre communautés de recherche pour progresser dans les études d'impact et visant le développement d'outils représentant tous les déterminants (physiques, biologiques et socio-économiques) de l'anthroposystème avec le même degré de finesse.

La question d'adaptations locales spécifiques au système Durance-Verdon n'a pas été abordée en profondeur. Néanmoins les scénarios socio-économiques intègrent de façon plus ou moins marquée des mesures d'économie d'eau faisant écho à la fiche-action "eau" (mesure n°3 "Développer les économies d'eau et assurer une meilleure efficience de l'utilisation de l'eau"). Les mesures insérées dans ces scénarios sont plutôt d'ordre structurel (maintien ou amélioration des rendements des canaux d'irrigation et des réseaux de distribution d'AEP, sauf pour le scénario *crise*). Elles s'inscrivent dans une dynamique d'économie d'eau sur le territoire qu'il s'agirait de prolonger en étroite collaboration avec les acteurs à la lumière des hypothèses et résultats du projet R²D² 2050. *In fine* elles contribueront à réduire l'impact négatif du changement climatique (ressource naturelle disponible diminuée) sous réserve de leur poursuite et de leur extension, ou d'adaptation à la marge (modification de gestion, volumes prélevables, requalification d'infrastructures, amélioration plus importante de l'efficience hydraulique…).

Les résultats du projet ont déjà été exploités par différents acteurs du territoire (agence de l'eau, syndicat mixte d'aménagement et de développement de Serre-Ponçon, Syndicat Mixte d'Aménagement de la vallée de la Durance) dans le cadre d'études prospectives sur la ressource en eau. Les données produites éclairent ainsi la décision publique.

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

Articles scientifiques

Hendrickx F., Sauquet E., 2013. Impact of warming climate on water management for the Ariège river basin (France). *Hydrological Sciences Journal*, doi: 10.1080/02626667.2013.788790.

Hingray B., Saïd M., 2014. Partitioning internal variability and model uncertainty components in a multimodel multireplicate ensemble of climate projections. *Journal of Climate*, doi: 10.1175/JCLI-D-13-00629.1.

Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Brigode P., 2014. Sensitivity to the calibration period and transferability of the Catchment Land Surface Model parameters under changing climate: a case study in the Durance watershed, France. Hydrological Sciences Journal, accepté.

Magand C., Ducharne A., Le Moine N., Gascoin S., 2014. Introducing hysteresis in snow depletion curves to improve the water budget of a land surface model in an alpine catchment. Journal of Hydrometeorology, doi:10.1175/JHM-D-13-091.1.

Braud I., Samie R., Tilmant F., Vidal J.-P., Chérel J., 2014. Quantifying climate change impact on irrigation

18 MEDDE, 2013. Évaluation à mi-parcours du Plan national d'adaptation au changement climatique (PNACC). Ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, décembre 2013, 50 p.

19 MEDTL, 2011. Plan national d'adaptation de la France aux effets du changement climatique. Ministère de l'Écologie, du Développement Durable, des Transports et du Logement, juillet 2011, 187 p.

20 Agence de l'Eau Adour-Garonne, 2014. GARONNE 2050, Etude prospective sur les besoins et les ressources en eau, à l'échelle du bassin de la Garonne, Rapport final, 68 p.

requirements in south-east France: intercomparison of four models on nine typical crops. *Agricultural Water Management*, in prep.

Hingray, B., *et al*., 2015. Partitioning internal variability and model uncertainty in a multimodel ensemble of climate projections: influence of model replicate number. *Geophysical Research Letters*, in prep.

Magand C., Tilmant F., Ducharne A., Chauveau M., Vidal J.-P., Le Moine N., Mathevet T., Sauquet E., Perrin C., Oudin L., 2015. Construction par hybridation d'analyses atmosphériques adaptées aux zones de montagne : exemple de l'archive météorologique DuO dans le bassin de la Durance. *La Houille Blanche*, in prep.

Perrin, C., *et al.,* 2015. Are similar hydrological simulations produced by models with similar internal behavior? Comparative evaluation on the Durance River basin under contrasted conditions. *X*, in prep.

Vidal, J.-P., *et al*. (2015) Selecting downscaled climate projections for impact and adaptation studies. *Climatic Change*, in prep.

Autres

Participation d'E. Sauquet au film "Eau et changement climatique : paroles d'acteurs de la Durance", réalisé par J. Bengel et France Nature Environnement PACA, http://vimeo.com/8494283

C3E2 Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires

PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Date d'engagement : 20 avril 2011

Montant du budget : 469 619 € dont 287 372 € de subvention du service de la recherche du ministère chargé du développement durable.

Cofinancements obtenus : 182 247 € (Ifremer + UBO + ARTELIA)

Coordinateurs :

Pierre Le Hir

Ifremer, laboratoire DYNECO/PHYSED

Z.I. de la Pointe du Diable, CS 10070, 29280 Plouzané

Mail : plehir@ifremer.fr

Partenaires scientifiques :

Régis Walther, ARTELIA Eau & Environnement

Frédéric Bioret, UBO/Institut de Géo-architecture

Bernard Prud'homme Lacroix, GIP Loire Estuaire

Mots clés :

Estuaire, couplage morphodynamique, marais maritime, montée du niveau de la mer, apports fluviaux, changement climatique, salinité, turbidité, sédimentation, végétation.

Objectifs des recherches :

L'objet du projet C3E2 est de développer une capacité de réponse à la question du devenir probable des systèmes estuariens, en termes de morphologie et de couverture sédimentaire (caractérisation des biotopes) sous l'effet des changements climatiques, et en fonction de contrôles anthropiques éventuels.

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

Introduction

En dehors de l'élévation de la température qui peut avoir des impacts sur la faune et la flore des secteurs estuariens comme sur celles des régions qui les entourent, l'influence du changement climatique sur les estuaires se manifeste surtout par un changement des forçages aval et amont :

- en aval, le niveau moyen de la mer et le régime des tempêtes au large qui se décline par des fréquences de retour d'événements extrêmes qui peuvent être modifiées ;
- en amont, les apports liquides et les apports solides (sables et vases), dont les évolutions temporelles ne sont pas nécessairement semblables : s'ajoutant à une possible dérive des apports annuels moyens, les variations saisonnières sont susceptibles de changer, et surtout les évolutions des apports solides peuvent ne pas suivre les mêmes tendances que les apports fluides.

Ces manifestations du changement climatique qui constituent autant de pressions sur les systèmes estuariens méritent d'être mises en regard avec les pressions d'origine anthropique (Figure 1). Ainsi, les usages du bassin versant et du lit majeur du fleuve en amont de l'estuaire sont susceptibles de modifier les apports amont (liquides et solides).

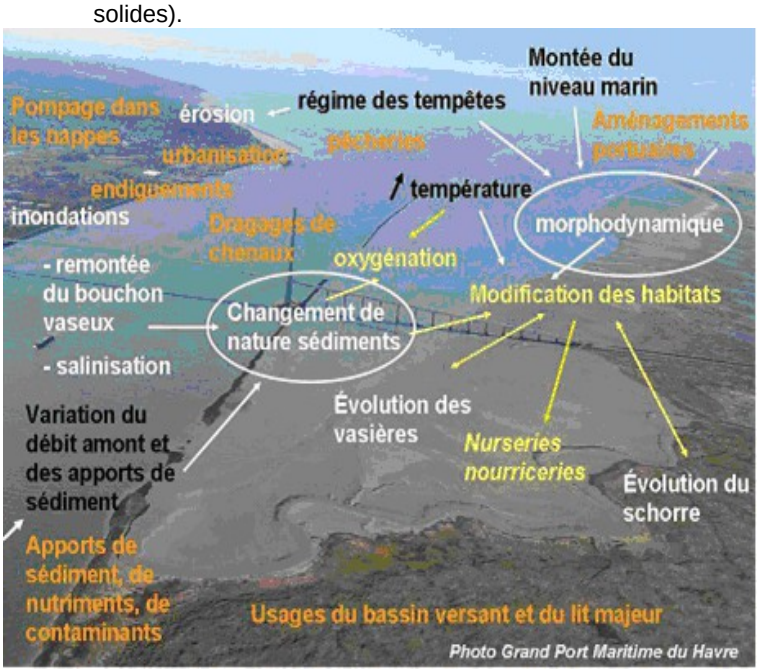


Figure 1 – Manifestations et impacts du changement climatique et des usages anthropiques dans les estuaires. En noir les manifestations du changement climatique, en brun clair les contributions des actions anthropiques, en blanc les conséquences sur les processus morphosédimentaires et en jaune les impacts écologiques.

Les principaux types d'impacts attendus concernent l'augmentation des risques d'inondation, une pénétration accrue des eaux salées, un déplacement amont des secteurs à forte turbidité ("bouchon vaseux") et une évolution morphologique et sédimentaire du système estuarien dont l'échelle de temps est du même ordre que celle qui caractérise le changement climatique (le siècle).

Une majorité d'estuaires sont caractérisés par un lit mineur où transite l'essentiel des flux fluides et particulaires, incisé dans une plaine alluviale dont l'altitude est proche du niveau de marée haute. La probabilité d'inondation de la plaine alluviale peut donc très fortement varier avec un changement du niveau moyen de la mer, ou une variation des débits de crue.

L'objectif du projet C3E2 est de développer notre capacité de réponse à la question du devenir probable des systèmes estuariens, en termes de morphologie et de couverture sédimentaire (caractérisation des biotopes) sous l'effet des changements climatiques, et en fonction de contrôles anthropiques éventuels. En particulier, il s'agit de répondre à des questions communes telles que :

- en cas de montée du niveau marin, les submersions (durées, fréquence…) vont-elles augmenter selon la topographie, ou bien la morphologie du lit majeur va-t-elle s'adapter, et le cas échéant cette adaptation se fera-t-elle au rythme du phénomène de montée de la mer ou avec un certain retard ?
- quelle est la dépendance de ce processus d'évolution morphologique en fonction des apports sédimentaires (nature et quantité) ?
- comment sont susceptibles d'évoluer les structures salines et turbides (bouchon vaseux) ? seront-elles simplement translatées vers l'amont, ou bien l'ensemble du système estuarien va-t-il s'élever (par sédimentation) en accompagnant l'élévation du niveau de la mer ?
- quelles seront les conséquences de ces évolutions sur l'organisation de la végétation des berges et de la plaine alluviale, et cette végétation est-elle susceptible d'influencer la morphodynamique ?

Matériels et méthodes

Stratégie d'étude et structuration du projet

L'étude repose sur l'utilisation de la modélisation numérique, seule approche capable de rendre compte simultanément des processus hydrodynamiques, sédimentaires et biologiques, de mécanismes de couplages entre ces processus, et enfin de rendre possibles des projections sur l'avenir. Un modèle hydrosédimentaire existant (modèle SEDI-MARS3D) a été adapté et appliqué à différentes configurations schématiques d'estuaire, de façon à obtenir un éventail assez large des réponses possibles des systèmes naturels. Les configurations se distinguent par la morphologie initiale, la nature des sédiments, le régime de marée, le régime fluvial et les apports solides amont. Le modèle restitue de façon simplifiée le comportement des sables et de la vase, et rend compte des couplages morphodynamiques (processus de rétroaction entre évolutions morphologiques, hydrodynamisme et transports

de sédiments).

Nous avons choisi de compléter l'exercice de projection sur un système réaliste, pour lequel la question de l'évolution des marais inondables était jugée cruciale.

Le cas de l'estuaire de la Loire, où un modèle hydrosédimentaire avait déjà été appliqué en vue de restaurer le fonctionnement hydraulique de l'estuaire en aménageant des vasières intertidales, a été choisi. Une attention particulière a été portée sur un marais maritime entièrement végétalisé, dont il était important de connaître l'évolution actuelle, tant sur le plan sédimentaire que "phyto-sociologique". Le groupe de partenaires engagés dans la construction et l'exécution du projet C3E2 en a découlé, de même que son découpage en cinq sous-programmes.

Modélisation morphosédimentaire d'estuaires schématiques

Initialisé avec une géométrie estuarienne en forme d'entonnoir régulier, le modèle s'est montré capable de simuler après une cinquantaine d'années la formation de méandres alternés dans un lit entièrement sableux, et plus rapidement des banquettes latérales configurées comme les schorres estuariens dans un système entièrement constitué de vases. Après ces tests initiaux, le modèle a été utilisé dans une configuration à 3 sédiments, une vase et deux sables dont le comportement se distingue pour l'essentiel par la vitesse de chute. Rapidement, un tri granulométrique se produit, et le chenal devient exclusivement sableux tandis que la vase se dépose majoritairement en haut d'estran, faisant évoluer l'hypsométrie de la zone intertidale selon un mode préférentiel vers le niveau de pleine mer de vive eau.

Partant d'une géométrie telle que les courants de marée étaient élevés, le modèle fait évoluer la bathymétrie de telle sorte que le courant et la contrainte de cisaillement associée diminuent.

Avant toute exploitation du modèle, une étude de sensibilité à différents paramètres a été conduite : sensibilité à la rugosité hydraulique, à la fermeture turbulente, à la vitesse de chute des vases, à la contrainte critique d'érosion, au processus de glissement des dépôts frais, à la prise en compte des cycles vive eau / morte eau et enfin au facteur morphodynamique.

Après une étude de sensibilité aux différents paramètres, le modèle a d'abord été utilisé pour simuler l'évolution à long terme de différents estuaires en fonction de l'amplitude de marée ou des apports fluviaux. La figure 2 illustre différents types d'évolution obtenus pour un même marnage moyen de 4 m appliqué à un estuaire long de 50 km. Pour un débit et des apports solides amont soutenus (Figure 2b), l'estuaire se remplit et évolue rapidement vers un delta, où la dynamique des chenaux est très intéressante, montrant un réalisme étonnant pour la résolution horizontale assez rustique du modèle. On note aussi la formation spontanée de chenaux secondaires qui assurent le drainage de la plaine alluviale, laquelle se met en place à la cote moyenne des pleines mers de vive eau. Dans certaines simulations, la formation de levées en bordure des chenaux est aussi reproduite. Dans le cas où les apports amont sont très réduits (figure 2d), l'estuaire évolue au contraire très peu : un élargissement des sections à l'aval est observé, tandis que l'estuaire se comble très lentement en amont. Enfin, si un débit fluvial important est introduit (figure 2 c), un effet de chasse évacue des dépôts amont antérieurs, et une dynamique accrue du système provoque la mise en place de méandres dans un chenal élargi (au détriment de la zone intertidale).

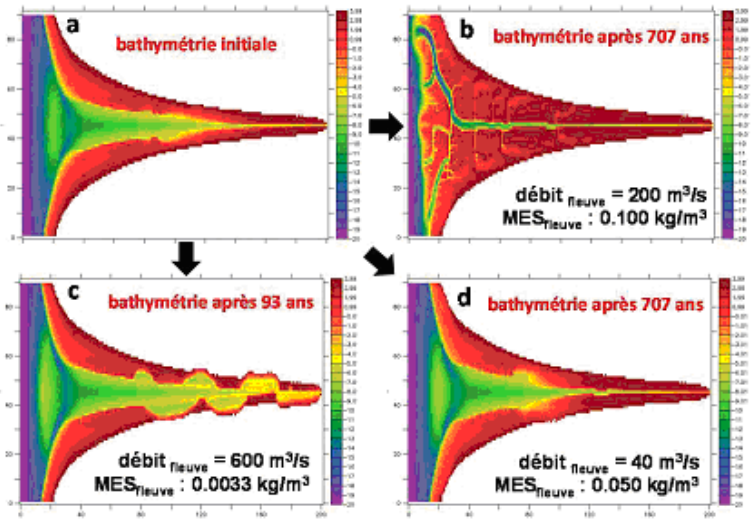


Figure 2 – Evolution morphologique d'un estuaire initialement long de 50 km. Amplitude moyenne des marées : 2m (marnage de 4 m) : a) condition initiale commune, b) débit de 200 $m^3.s^{-1}$, MES amont de 0.1 $kg.m^{-3}$, c) débit de 600 $m^3.s^{-1}$, MES amont de 0.0033 $kg.m^{-3}$, d) débit de 40 $m^3.s^{-1}$, MES amont de 0.05 $kg.m^{-3}$

Naturellement, les simulations long terme présentées sur la figure 2 ont un caractère artificiel résultant du maintien d'un débit faible ou élevé pendant des temps très longs. Un hydrogramme plus réaliste pourra être testé au cours d'investigations futures, mais ces premiers tests révèlent une extrême sensibilité aux apports amont. De même, une configuration bathymétrique moins profonde en aval est susceptible de modifier les flux solides à l'embouchure.

Une augmentation du marnage provoque une dynamique plus intense, favorisant l'élargissement et le méandrement du chenal, et "retardant" le remplissage amont dans le cas d'un apport solide important, mais sans changer l'évolution finale vers un delta.

Les évolutions morphologiques restent très dépendantes des initialisations bathymétriques : par exemple des tests avec une longueur initiale d'estuaire deux fois plus élevée ont montré des tendances différentes, où l'effet du débit solide amont était atténué. L'outil ainsi mis en place mérite d'être exploité dans de multiples configurations pour rechercher une statistique des réactions possibles.

Plus sûrement, le modèle peut être appliqué à l'étude d'une bathymétrie réaliste, et fournir alors un faisceau de trajectoires possibles en fonction de l'évolution attendue des apports liquides et solides.

Résultats

Simulation des effets du changement climatique sur des configurations schématiques

Les différents tests effectués sur l'estuaire long de 50 km montrent que la montée du niveau de la mer génère une hydraulicité supérieure dans l'estuaire, due à une augmentation des volumes oscillants. Cette hydraulicité supérieure se traduit par un élargissement du chenal, en particulier dans les secteurs aval de l'estuaire, et/ou par l'incision de chenaux secondaires prononcés dans les estrans supérieurs, lorsque ceux-ci avaient une extension déjà élevée.

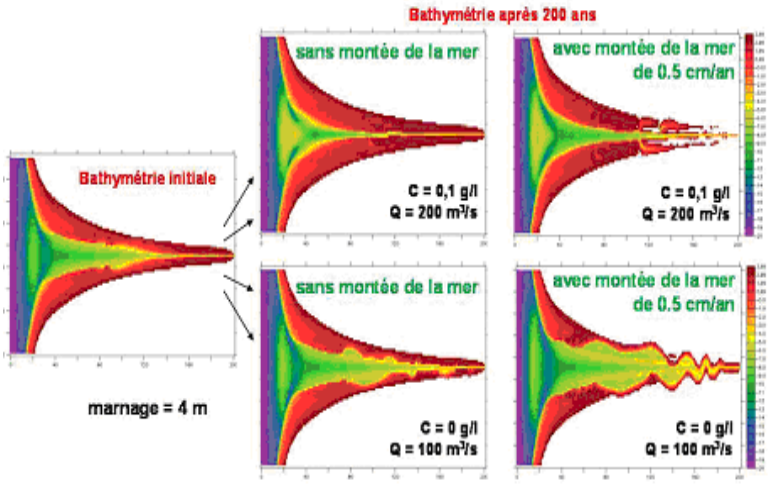


Figure 3 – effet de la montée du niveau de la mer sur l'évolution morphologique après 200 ans d'un estuaire long de 50 km. Amplitude de marée 2 m. Q et C sont respectivement le débit et la concentration en matières en suspension en amont.

La figure 3 montre que les réponses à la montée du niveau de la mer se distinguent nettement selon les apports amont. Si l'apport solide amont est insuffisant, l'estran supérieur est susceptible d'être érodé fortement (Figure 3 bas). Dans le cas où l'alimentation en sédiments par le fleuve amont est suffisante, on constate une sédimentation sur l'estran. Néanmoins, pour les tests effectués, cette évolution du niveau bathymétrique ne compense jamais l'élévation du niveau marin, de telle sorte que les temps de submersion moyens augmentent (Figure 4). Le modèle indique qu'après deux siècles le système converge vers un même état, que la montée du niveau marin ait été de 1cm/an pendant 100 ans suivie d'une stabilisation du niveau atteint, ou de 0.5 cm/an pendant 200 ans.

Sur la figure 4, l'incision de chenaux secondaires provoquée par la montée du niveau marin est spectaculaire : elle permet le drainage d'une surface étendue pour laquelle une hauteur d'eau en moyenne faible engendrerait des vitesses d'écoulement trop élevées. Ce mécanisme naturel s'observe dans la plupart des marais maritimes en secteurs microtidaux (*e.g.* lagune de Venise) ou macrotidaux (*e.g.* estuaires de la Loire ou de la Seine) ; il serait amplifié en cas de montée du niveau de la mer au-dessus d'une plaine alluviale étendue.

La figure 4 montre aussi l'effet d'une montée du niveau de la mer sur le bouchon vaseux ("maximum de turbidité") qui est déplacé vers l'amont.

La réponse morphodynamique du système est sensible à son état initial. En particulier, l'évolution de la zone intertidale dépend fortement du profil de la plaine alluviale, au-delà de la limite actuelle atteinte par les plus hautes eaux. Si les bords du lit majeur actuel sont figés par des digues, routes ou autres aménagements, l'estran sera automatiquement réduit en cas de montée du niveau de la mer.

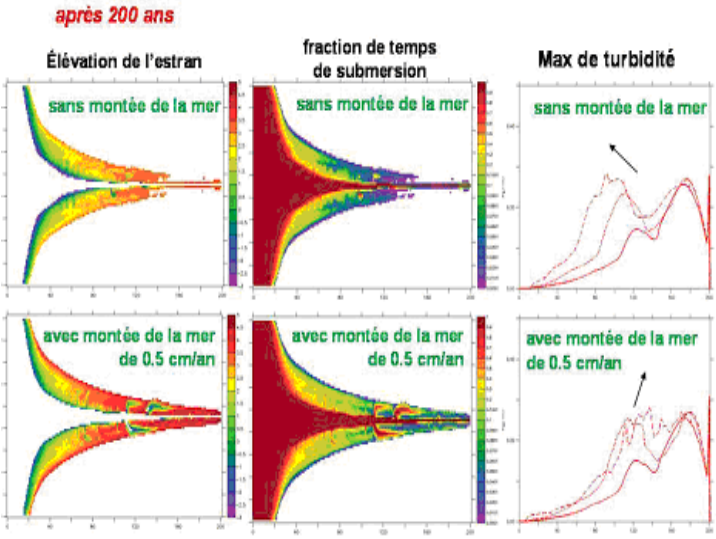


Figure 4 – Effet de la montée du niveau de la mer sur la zone intertidale, après 200 ans d'évolution, et maximum de MES simulées dans le chenal en surface (estuaire de 50 km, marnage moyen de 4 m, débit fluvial 200 $m^3.s^{-1}$, concentration des MESamont : 0.1 $kg.m^{-3}$).

Par contre il n'est pas exclu que la sédimentation sur l'estran restant ne soit alors accrue (pour une alimentation identique en sédiments), et qu'ainsi l'accroissement du taux d'inondation sous l'effet de la montée du niveau de la mer soit atténué.

Dans le cas où le terrain est plat aux alentours de l'estran actuel, et en l'absence de frontières infranchissables, la zone inondable pourra s'étendre largement.

Les tests effectués ne montrent pas une influence forte de la végétation sur l'hydrodynamique et l'évolution morphosédimentaire qui peut en résulter. Ce résultat inattendu est confirmé par les simulations réalisées sur la Loire (section suivante).

Les conséquences pratiques sont intéressantes, car cela autoriserait l'étude du devenir morphosédimentaire d'un estran sans nécessairement prendre en compte la présence de végétation, ou seulement de façon simple et

schématique. Naturellement, cela ne signifie pas une indifférence du système en termes d'habitat : un changement de rythme d'inondation peut impacter très fortement les herbus, voire les détruire, et changer la fonctionnalité du milieu, mais sans effet retour sur l'évolution morphologique.

Échanges hydriques et particulaires entre lit majeur et lit mineur, rôle de la végétation et investigation spécifique en Loire

Avant de simuler l'impact du changement climatique dans l'estuaire de la Loire, il était nécessaire de décrire et comprendre les échanges entre le lit mineur (chenal et zone de balancement des marées moyennes) et le lit majeur constitué d'une plaine alluviale inondable par grande marée et/ou crue. Des mesures de taux d'inondation, de flux particulaires et de taux de sédimentation (à l'échelle de la semaine par jalons ou pièges, et à moyen terme par datation de carottes) ont été entreprises. Ces mesures ont mis en évidence l'évacuation incomplète des eaux de submersion pendant la marée descendante suivante, et permis de valider le modèle hydrosédimentaire TELEMAC 3D de l'estuaire de la Loire (Figure5).

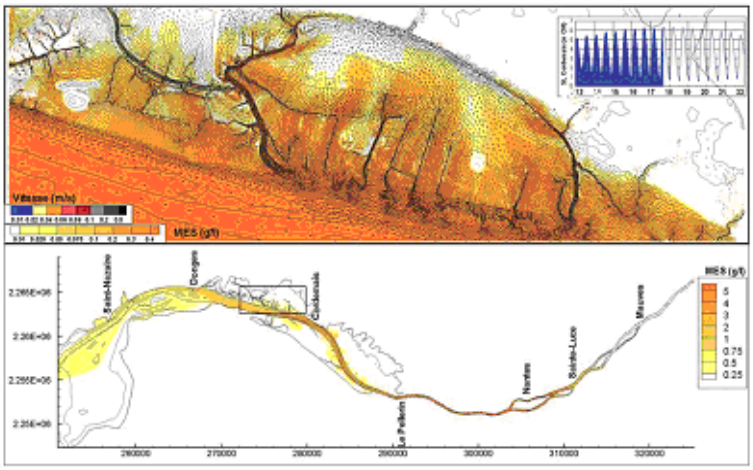


Figure 5 – Visualisation du débordement simulé le 17 septembre 2012 : situation de pleine mer. Les vecteurs représentent le courant, tandis que la couleur du fond représente la concentration de matières en suspensions dans les secteurs inondés. La carte du haut est un zoom du secteur d'étude encadré dans la figure du bas, laquelle montre le positionnement du bouchon vaseux simulé.

Evolution de la végétation de 1982 à 2014

Une cartographie de la végétation du secteur d'étude, exécutée pendant le projet, révèle une évolution de la végétation depuis une trentaine d'années (Figure 6), résultant soit d'actions anthropiques locales telles que l'évolution des pratiques de fauche et de pâturage, soit de modifications anthropiques indirectes effectuées à l'échelle de l'estuaire (construction de remblais en aval, creusement du chenal), provoquant une évolution de la végétation via des processus de sédimentation et de salinisation.

Les relations dynamiques entre les différents types de végétation sont décrites à l'aide d'une matrice de transition qui permet de quantifier les probabilités de transition d'un type à l'autre (Figure 6 droite). L'évaluation des indices d'Ellenberg *et al.* (1991) a mis en évidence une progression spatiale de la salinité à partir des données de végétation, indicatrices des changements environnementaux.

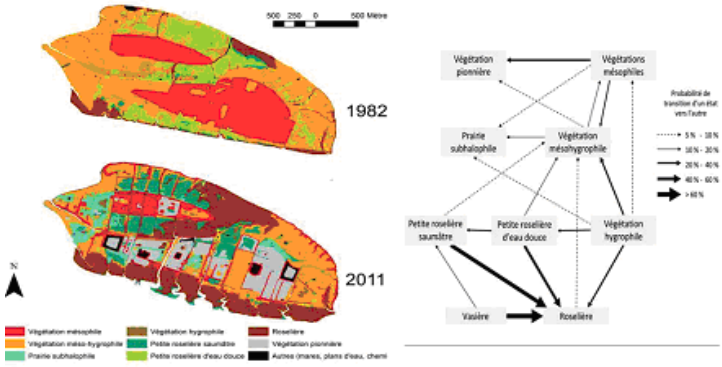


Figure 6 – Evolution de la végétation du secteur Lavau-Pipy (localisation du zoom de la figure 5) en 1982 et 2011. À droite : probabilités de transitions des unités de végétation entre 1982 et 2011.

Simulation de l'impact du changement climatique sur l'évolution morpho-sédimentaire de l'estuaire de la Loire en 2040

Rappel méthodologique

Un modèle bidimensionnel a d'abord été mis en place pour simuler la dynamique sableuse du lit mineur en amont de Nantes, tandis qu'en aval il a été considéré que le chenal d'accès au port de Nantes serait maintenu. L'évolution de la géométrie du lit mineur est ainsi forcée dans le modèle 3D précédemment validé, lequel est utilisé tous les cinq ans pour simuler un cycle annuel en réactualisant le fonctionnement du bouchon vaseux, la structure des salinités, le taux de sédimentation annuel dans la plaine alluviale et finalement l'ajustement topo-bathymétrique correspondant.

Les variations bathymétriques sont alors multipliées par cinq, tandis que la procédure est renouvelée 6 fois pour reconstituer l'évolution 2010-2040. Quatre scénarios ont été étudiés : un scénario sans changement climatique, un scénario d'élévation du niveau moyen de la mer, atteignant + 34 cm en 2040, un scénario de variation hydrologique, prenant en compte les projections statistiques de débits de Loire calculées dans le cadre du projet de recherche Hydroqual (scenario A2 du GIEC/ modélisation ARPEGE-EROS), se traduisant par une réduction du débit et consécutivement des apports solides amont (1.17 Mt/an en 2040 au lieu de 1.56 Mt/an actuellement). Un quatrième scénario combine les deux précédents.

Résultats

Les résultats montrent tout d'abord que les zones submersibles et les berges ne sont pas encore à l'équilibre dans le fonctionnement actuel de l'estuaire, et qu'une sédimentation se poursuit sur le secteur de la plaine alluviale étudiée (Figure 7).

Toutefois, cette sédimentation tend à s'atténuer au cours du temps dans le cas sans changement climatique.

Sur la base du scénario combiné considéré comme le plus probable, les effets du changement climatique se font ressentir par :

- une remontée du système turbide et halin d'environ 5 kilomètres ;
- une masse maximale du bouchon vaseux qui augmente d'environ 9%, malgré une diminution de 25% des apports amont, ce qui confirme le caractère importateur de sédiments de l'aval vers l'amont de la Loire, qui s'intensifierait dans les années futures ;
- en arrière du bourrelet de rive, des zones submersibles continuant d'évoluer (Figure 7).

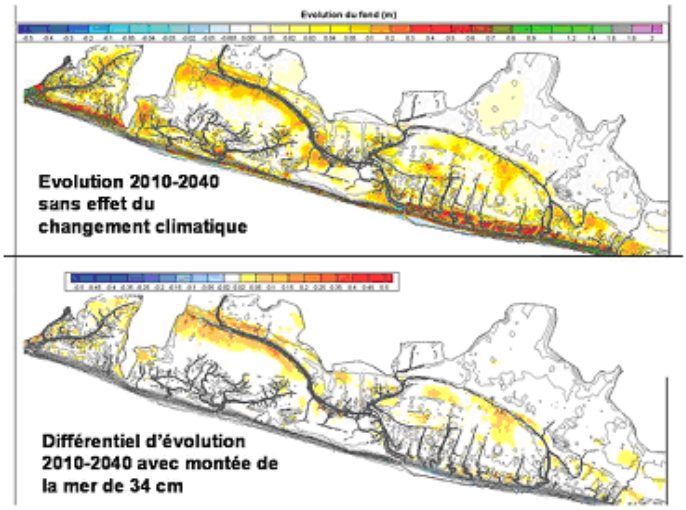


Figure 7 – Evolution topo-bathymétrique 2010-2040 pour le cas sans changement climatique et différentiel (avec ce cas) d'évolution pour le scénario de montée du niveau de la mer.

Sans changement climatique, les zones submersibles en aval de Nantes piégeraient environ 40 000 tonnes/an de sédiments en 2040, à comparer à un apport annuel par l'amont de l'ordre de 1.2 à 1.6 M tonnes, ou encore à la masse du bouchon vaseux, environ 1.1 Mt. Ce piégeage passerait à environ 100 000 tonnes/an dans le cas d'une élévation du niveau de la mer de 34 cm, ce qui ne suffit pas à compenser l'élévation de la mer. En conséquence, à l'horizon 2040, les zones submersibles subiraient des submersions plus courantes (Figure 8), et connaîtraient des apports plus fréquents en MES et en eaux salées, ce processus étant renforcé par la remontée du système halin.

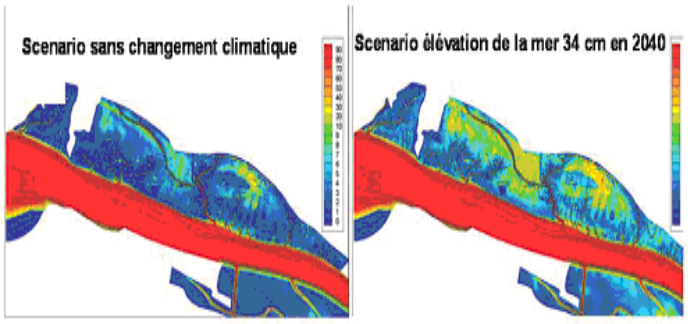


Figure 8 – simulation du pourcentage temps de dépassement d'une hauteur d'eau de 20 cm en 2040.

La figure 9 révèle que la salinité du marais étudié diminue dans le scénario sans changement climatique, du fait du rehaussement du marais, tandis qu'elle augmenterait dans le cas du scénario combinant élévation du niveau de la mer et réduction des apports fluviaux.

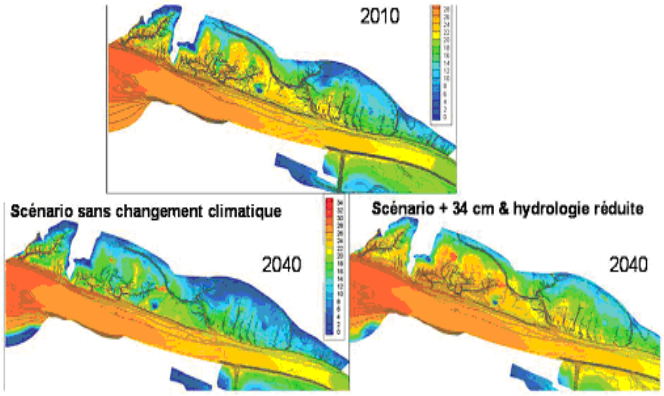


Figure 9 – salinités maximales simulées par le modèle.

Conséquences prévisibles sur la végétation.

L'augmentation de la salinité et sa progression vers l'amont devraient réduire les roselières d'eau douce en aval de Lavau (alors remplacées par une roselière saumâtre à scirpe maritime ou par une phragmitaie), et favoriser la progression vers l'amont des prés salés à *Puccinellia maritima*, au détriment des prairies à *Agrostis stolonifera*. L'augmentation des périodes et des hauteurs de submersion va favoriser le développement des hélophytes mieux adaptées à l'immersion : progression de la scirpaie et de la phragmitaie au niveau des parties les plus basses situées derrière le bourrelet de rive et diminution de la surface des prairies. Ces prévisions sont aussi dépendantes de l'évolution des usages anthropiques sur les bords de Loire, notamment ceux liés à l'agriculture et à la chasse.

Perspectives

Le projet C3E2 a inspiré et permis la proposition de programme de recherche ICEPEL soutenu par la Fondation de France et devant démarrer le 1er février 2015 : “Impacts socio-économiques des Changements Environnementaux des complexes Prairiaux de l’Estuaire de la Loire : approche prospective”. Le projet est porté par l’EA 2219 “Institut de Géoarchitecture”, son responsable scientifique est Fréderic Bioret.

II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

À notre connaissance, les études et projets antérieurs en France concernant les effets du changement climatique en estuaire portaient sur le changement de probabilité d’inondation en fonction de l’élévation du niveau de la mer, et sur les conséquences en termes de remontée saline et de turbidité maximale (“bouchon vaseux”), avec le défaut de base d’ignorer les variations et adaptations possibles des estuaires en termes morphosédimentaires, de telle sorte que les résultats annoncés étaient sujets à caution. Le projet C3E2 s’est attaché à lever ces verrous en prenant en compte les évolutions morphologiques. Il s’agit d’abord d’une avancée scientifique.

En termes de politiques publiques, les acquis du projet C3E2 peuvent se décliner de la façon suivante :

- inventaire des manifestations du changement climatique en estuaire, et de leurs impacts possibles,
- rappel des résultats provenant de la régionalisation du changement climatique, exprimés en termes de “forçages” à considérer pour traiter les conséquences en estuaire,
- mise en place et tests d’un outil de modélisation générique Sedi-MARS3D, ici appliqué à des cas schématiques, mais transposable à des configurations réalistes,
- démonstration d’une possibilité d’exploitation d’un modèle opérationnel existant, offrant une perspective de valorisation d’outil préalablement développé à des fins d’aménagements sédimentaires ayant mobilisé des moyens importants (ici : application du modèle TELEMAC de la Loire) ; le projet C3E2 a aussi permis de renforcer la fiabilité de ce genre de modèles,
- avertissement sur la sensibilité de la réponse d’un système estuarien aux apports solides qui aujourd’hui sont très mal connus, et pour lesquels les prévisions d’évolution à long terme sont quasi inexistantes,
- avertissement sur la sensibilité de l’évolution des marais maritimes (plaine alluviale, de part et d’autre du lit mineur) à leur profil topographique au-delà de la zone actuellement submersible,
- caractérisation des risques d’inondation accrue de différents secteurs de la plaine alluviale,
- caractérisation de l’évolution des salinités et turbidités, en particulier dans la plaine alluviale, et description des conséquences prévisibles sur la végétation.

Incidences sur les usages du lit majeur

Les travaux spécifiques menés sur les systèmes prairiaux du lit majeur de l’estuaire de la Loire ont permis de mieux comprendre la dépendance des usages de ces milieux en fonction des effets du changement climatique. Ces systèmes prairiaux sont le siège d’une pratique agricole de pâturage extensif. Cette pratique est dépendante :

- des conditions de submersibilité des prairies lors des marées de vives eaux. Les moindres submersibilités après les grandes marées de printemps permettent une stabilité des prairies et la mise en pâturage des bovins jusqu’aux grandes marées d’automne. Si la submersibilité est compatible avec le pâturage, elle peut cependant le compromettre si les surfaces inondées deviennent trop importantes par rapport aux secteurs restant hors d’eau ou si les eaux s’évacuent trop lentement,
- de la salinité, qui est également un facteur limitant du fait notamment des contraintes d’abreuvement des bêtes : la salinité se révèle en progression depuis 30 ans, comme le montre l’évolution de la végétation,
- de l’évolution de la morphologie du lit majeur (maintien, développement de points hauts pour les bovins) et de la végétation.

A contrario, la pratique de pâturage extensif conditionne elle-même les groupements végétaux. Le pâturage garantit notamment le caractère prairial des milieux et permet de contrôler le développement des roselières. Une pratique agricole moins présente peut également se traduire par le développement d’autres pratiques comme la chasse et les aménagements qui peuvent être liés, tels que les mares de chasse. Ces aménagements peuvent influencer les évolutions des groupements végétaux.

Enfin, la pratique de pâturage a conduit à aménager un réseau hydrographique qui permet une connexion directe avec le fleuve et conditionne ainsi le régime de submersibilité.

Ces interactions entre les pratiques agricoles sur ces milieux prairiaux représentatifs du lit majeur de la Loire et les évolutions appréhendées par le projet concernant la morphologie, les facteurs physiques et le couvert végétal posent la question de la capacité d’adaptation de l’activité agricole du lit majeur dans une perspective de changement climatique : l’activité agricole va-t-elle être remise en question, impliquant une évolution des milieux qui elle-même peut influencer les évolutions morphologiques ? Ou bien cette activité peut-elle s’adapter, quitte à modifier les pratiques et le réseau hydraulique existant, pour limiter l’impact des submersibilités ?

La construction de scénarios globaux d’évolution intégrant les modalités de gestion et d’exploitation de ces milieux pourrait constituer un prolongement du projet permettant une valorisation importante de ses résultats.

Comment concilier gestion locale de l'espace et gestion à l'échelle de l'estuaire ?

Le projet apporte aussi un éclairage nouveau sur un risque de contradiction entre intérêts locaux et besoins d'espace à l'échelle de l'estuaire. Le renforcement par la montée du niveau de la mer de secteurs submersibles dans la plaine alluviale peut s'avérer favorable au maintien de certaines fonctionnalités de l'estuaire : la sédimentation naturelle sur les schorres tend à se poursuivre et s'accompagne d'une réduction des échanges avec le lit mineur (qui évolue vers un système chenalisé bordé d'une plaine alluviale continentalisée), alors que le maintien de zones submersibles préserve ces échanges. Localement pourtant, le risque de submersion accrue menace les possibilités d'exploitation des prairies sous forme d'élevage extensif. Le compromis est dépendant de l'espace total disponible (*i.e.* non figé par des endiguements ou ouvrages en dur) et la modélisation mise en place peut aider à identifier des scénarios d'optimisation.

Transfert vers les gestionnaires

Le transfert des acquis du projet C3E2 pourra se faire par une information basée sur une plaquette rappelant les résultats majeurs, qui serait diffusée dans les DREAL et structures de gestion des estuaires. En ce qui concerne les résultats spécifiques à l'estuaire de la Loire, leur restitution vers les gestionnaires pourrait permettre d'amorcer la construction de scénarios globaux d'aide à la décision. Il est proposé de s'appuyer, pour ce transfert vers les gestionnaires, sur une logique de restitution impliquant les acteurs locaux, sous la forme de réunions associant :

- les acteurs de terrains directement impliqués dans la gestion quotidienne du territoire agriculteurs, syndicats de marais, chasseurs, associations de protection de la nature…
- les acteurs en charge de politiques publiques en lien avec la gestion de ces territoires : conservatoire du littoral et Grand Port Maritime Nantes St Nazaire propriétaires de terrains), le conseil général (gestionnaire), l'État au titre des mesures agro-environnementales, la Région Pays de la Loire et l'Agence de l'eau Loire Bretagne au titre des démarches de contractualisation soutenant les actions e restauration des milieux, …

Ces réunions devraient avoir lieu au 1er trimestre 2015 et pourront à la fois permettre d'expliciter les enjeux associés au changement climatique, mais également, ans le cadre d'un échange sous une forme assez resserrée, de poser les bases de la construction de scénarios globaux intégrant différentes stratégies (laisser faire, adaptation des pratiques…).

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

Articles scientifiques

Sawtschuk J., F Bioret, 2012. Analyse diachronique de la dynamique spatiale de la végétation de l'estuaire de la Loire. Photo interprétation 48(3), 15-28.

Vareilles, J., Cayocca, F., Le Hir, P.. Modelling the long-term morphological evolution of sand-mud beds, 60p.

Le Hir P., Cayocca F., Vareilles J.. Estuarine morphodynamics : simulating schematic configurations with a process-based 3D model with focus on the evolution of tidal marshes under climate change.

Walther R., Le Hir P., Cayocca F. Evaluation of the effect of climate change on the muddy deposits in the flood plain of the Loire Estuary and on the turbidity maximum (C3E2 Project- French research program).

Cayocca F. & Le Hir P. Simulation of estuarine morphodynamics and sediment distribution with a process-based 3D model accounting for mixed sediment transport (sand and mud).

Rapports

Bayart E., 2013. Evolution de la morphologie de l'estuaire de la Loire sous l'effet du changement climatique. Rapport de stage à ARTELIA, 30 p.

Vareilles, J., 2013, Rapport d'activités de postdoctorat, projet C3E2, 168 pp.

Le Hir (Coord.), 2012. Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires. Rapport d'avancement à mi-parcours du projet C3E2 du programme GICC (APR 2010) du Ministère de l'Ecologie, 32p.

Le Hir (Coord.), Walther R., Cayocca F., Sawtschuk J., Bioret F., Prud'homme B., et la collaboration de Bassoullet P., Baulin S., Bayart E., Berthier C., Bona P., Bouvier C., Cerisier S., Jestin H., Le Berre D., Lecornu F., Ledez M., Ledissez A., Saur N., Schmidt S., Verney R., 2014. Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires. Rapport final du projet C3E2 du programme GICC du Ministère de l'Ecologie, 281p.

Participations aux colloques nationaux ou internationaux

Communications orales

Conférence internationale INTERCOH'2013 à Gainesville (USA) 21-24 octobre 2013 : Le Hir P., Walther R., Cayocca F., Bassoullet P., Jestin H., Verney R., 2013. Consequences of climate change on estuarine ecogeomorphology.

Conférence internationale de la SHF "Small scale morphological evolution of coastal, estuarine and river systems" à Nantes, 6-7 octobre 2014: Le Hir P., Cayocca F., Vareilles J., Bouvier C., 2014. Simulating tidal marshes evolution in estuarine systems under climate change, using a schematic process-based 3D model.

Séminaire annuel du Programme Scientifique Seine Aval, Rouen, 3-4 décembre 2014 : Le Hir P., Walther R., Cayocca F., Bioret F., Sawtschuk J., Vareilles J.,

Bayart E. et al. Projet C3E2 : Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires.

Forum “Loire & affluents : au coeur de l’Europe des fleuves”, Orléans 10 décembre 2014 : Le Hir P., Walther R., Cayocca F., Bioret F., Sawtschuk J., Vareilles J., Bayart E. et al. Projet C3E2 : Conséquences du Changement Climatique sur l'Ecogéomorphologie des Estuaires.

Le Hir P., Cayocca F., 2015. Simulation of estuarine morphodynamics with a process- based 3D model accounting for mixed sediment transport (sand and mud), proposée à la conférence internationale River, Coastal and Estuarine Morphodynamics (RCEM 2015), Iquitos (Pérou) 30 août-3 sept 2015.

Deux propositions de communication orale ont été envoyées au comité d’organisation de la conférence INTERCOH'2015 (7-11 sept 2015, Leuwen, Belgique) :

- Le Hir P., Cayocca F., Vareilles J., 2015. Estuarine morphodynamics : simulating schematic configurations with a process-based 3D model with focus on the evolution of tidal marshes under climate change.

- Walther R., Le Hir P., Cayocca F., 2015. Evaluation of the effect of climate change on the muddy deposits in the flood plain of the Loire Estuary and on the turbidity maximum (C3E2 Project- French research program)

Articles de vulgarisation

Dans le cadre la collection Mer et Océans, coordonnée par André Monaco et Patrick Prouzet et publié sous la direction d’André Mariotti et Jean-Charles Pomerol, aux Editions HERMES-ISTE Editions, il est prévu de monter une monographie sur le continuum Fluvio-Estuarien de la Loire, coordonné par Florentina Moatar (Univ. Tours) et Nadia Dupont (Univ. Rennes). Deux chapitres de l'ouvrage s’appuieront sur les résultats du projet : le chapitre 3 sections 3.2 et 3.3 : le chapitre 6 sections 6.2, 6.3, 6.4.

TERADCLIM

Adaptation au changement climatique à l'échelle des terroirs viticoles

PRÉSENTATION DU PROJET ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

Date d'engagement : 2011

Montant du budget : 298 000 € TTC de subvention du service de la recherche du Ministère chargé du développement durable.

Cofinancements obtenus : ANR-JC TERVICLIM (période 2011-2012)

Coordinateurs :

Hervé Quénol

CNRS, UMR6554 LETG, université Rennes 2, Place du recteur Henri le Moal, 35043 Rennes

herve.quenol@uhb.fr

Noms et organismes des autres partenaires scientifiques bénéficiaires :

Cyril Tissot, Laboratoire GEOMER, UMR6554 LETG, Institut Universitaire Européen de la Mer

Technopôle Brest-Iroise, place Nicolas Copernic, 29280 Plouzané cedex (France)

Gérard Barbeau, UVV-UMT Vinitera, INRA-Angers, Inra Angers-Nantes, BP 71627, 44316 Nantes Cedex 03 (France)

Jean-Philippe Boulanger, ECOCLIMASOL©

Malika Madelin, UMR8586 PRODIG, Université Diderot Paris 7 (France), UFR GHSS (c.c.7001) 75205 PARIS Cedex 13.

Philippe Rolet, Bodega ALTA VISTA. Terroir Expression Winemakers®. Alzaga 3972, Luján de Cuyo, M5528AKJ, Mendoza, (Argentina)

Mots clés :

Changement climatique, terroirs viticoles, échelles fines, modélisation spatiale méso-échelle, transfert d'échelles, plate-forme multi -agent, mesures météorologiques et agronomiques.

Objectifs des recherches :

Dans un contexte d'intensification de la concurrence entre les différents pays producteurs (notamment avec l'avènement des nouveaux pays viticoles) et où les viticulteurs des pays traditionnels se défendent en mettant en avant le "terroir viticole", une estimation des conséquences du changement climatique à une échelle fine permettrait de mieux orienter les possibles conséquences économiques et sociales de changements. L'objectif étant que les professionnels viticoles puissent adapter leurs pratiques culturales en fonction d'une nouvelle donne climatique en mettant à l'œuvre leur savoir-faire (techniques culturales raisonnées, évolution des variétés…).

I. PRÉSENTATION DES TRAVAUX ET RÉSULTATS

Introduction

Les nombreuses interrogations posées par le changement climatique engendrent une multitude de questions sur le fonctionnement des géo-systèmes aux échelles locales. Un changement global du climat aura obligatoirement des répercussions sur le climat local et sur les *terroirs* viticoles. Dans ce contexte, les impacts attendus d'un éventuel changement climatique posent un certain nombre de questions, dans l'optique de favoriser l'adaptation.

Dans un contexte d'intensification de la concurrence entre les pays producteurs de vins, les viticulteurs des pays traditionnels se défendent en mettant en valeur la spécificité des terroirs, définie en partie par les climats locaux. La notion de terroir est, pour le viticulteur, un outil de commercialisation, car il permet d'apporter une spécificité et une identité au vin. Les professionnels viticoles sont alors demandeurs d'outils et de techniques scientifiques pour évaluer les potentialités agroclimatiques actuelles et futures, notamment à travers une meilleure connaissance des variations locales du climat afin d'adapter suffisamment tôt leurs pratiques culturales. L'évaluation du changement climatique adaptée à l'échelle du terroir (échelles fines) est donc primordiale dans l'optique de la mise en place d'une politique raisonnée d'adaptation aux modifications du climat.

Les approches de ces phénomènes à partir des modèles de circulation générale (MCG) ne sont pas adaptées aux échelles fines et, de ce fait, apportent des résultats trop approximatifs. Même si de réels progrès ont été réalisés ces dernières années au niveau de la modélisation climatique régionale, aucun modèle utilisé dans un cadre opérationnel ne permet de faire une simulation du climat aux échelles locales (quelques dizaines de mètres). C'est donc à une échelle spatiale plus fine, en tenant compte des caractéristiques de surface et des capacités des viticulteurs, qu'il sera possible d'évaluer les conséquences imputables au changement climatique.

Dans ce contexte, le projet TERADCLIM a pour objectif d'apporter des réponses aux conséquences futures du changement climatique en procédant à une simulation adaptée à l'échelle des terroirs viticoles.

Pour réaliser ce projet, à l'interface de plusieurs disciplines et plusieurs techniques (science de la vigne, climatologie, statistique, modèles numériques) en passant par les acteurs, nous sommes amenés à faire appel aux savoirs et aux savoir-faire d'autres disciplines et des professionnels viticoles.

Matériels et méthodes

Notre démarche scientifique vise à mettre en place une méthodologie reposant sur des observations climatiques et agronomiques in situ et sur de la modélisation spatiale du climat, permettant d'évaluer la variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir (valeurs moyennes et extrêmes climatiques). Confrontée à des observations agronomiques (ex : stress hydrique, phénologie, taux de sucre, taux d'alcool…), l'étude météorologique permet de déterminer le climat spécifique d'un terroir. En comblant le manque de données aux échelles fines, ce travail permet d'affiner les connaissances sur les modifications climatiques qui pourront apparaître dans les terroirs viticoles et donc permettre d'améliorer les estimations sur les possibles impacts économiques. Cette méthodologie est développée et appliquée à plusieurs vignobles de renommée internationale, vignobles pour lesquels les caractéristiques climatiques jouent un rôle important sur la qualité du vin et où des expérimentations scientifiques sont menées (par les partenaires de ce projet) depuis plusieurs années. La multiplication des sites expérimentaux (terroirs français, européens et étrangers du "Nouveau Monde") permet d'étudier les potentialités agroclimatiques locales des terroirs dans des conditions macro-climatiques différentes.

Dans ce contexte, le projet TERADCLIM s'articule en 4 parties :

Acquisition des données météorologiques et agronomiques à l'échelle des vignobles expérimentaux

Avec ce dispositif de mesures et suivant cette démarche d'analyse du climat à l'échelle des vignobles, plusieurs niveaux d'observation imbriqués ont été suivis :

- Pour chaque région viticole, l'analyse d'une série de données journalières ou mensuelles, sur une période la plus longue possible (milieu du XX^{e} siècle), a été réalisée, pour une ou plusieurs stations météorologiques issues des réseaux nationaux.
- À l'intérieur de chaque région viticole, les données issues des réseaux météorologiques disponibles à l'échelle régionale ont été utilisées afin d'analyser les nuances régionales.
- À une échelle plus fine, des stations météorologiques et des capteurs enregistrant la température sous abri ont été installés afin d'étudier la variabilité spatio-temporelle du climat dans les vignobles. Les appareils de mesures ont été disposés d'une part, suivant les caractéristiques locales (ex : pente, exposition, type de sol…) susceptibles d'influencer les variables climatiques et d'autre part, le mieux répartis possible sur le terrain d'étude afin de ne pas avoir de secteurs sans prise de mesures ce qui pourrait être un problème au niveau de l'interprétation et de la modélisation des données.
- La variabilité spatiale des paramètres atmosphériques à l'échelle d'un terroir doit être validée par l'intermédiaire des données de réponse viticoles et/ou œnologiques afin d'évaluer l'hétérogénéité de la qualité du raisin et du vin influencée par les facteurs locaux.

Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles

Les méthodes de modélisation spatiale doivent suivre la même démarche que les analyses des données météorologiques, c'est-à-dire, prendre en compte l'influence des paramètres locaux sachant qu'ils agissent sur les

variables météorologiques à différentes échelles spatiales imbriquées.

Afin de spatialiser les données ponctuelles des mesures sur le terrain, nous cherchons donc à déterminer quels sont les facteurs géographiques, environnementaux et topographiques influençant de manière significative la distribution spatiale des mesures observées. Ainsi, dans une démarche hypothético-déductive, il s'agit de quantifier leur rôle en testant et en mesurant les effets respectifs de chaque facteur sur les paramètres météorologiques et de construire in fine des modèles statistiques à partir de régressions multiples. L'équation de cette régression est alors utilisée pour spatialiser, par l'intermédiaire d'un Système d'Information Géographique (SIG), le phénomène en tout point de l'espace (en fonction des paramètres locaux).

Intégration des scénarios du GIEC

L'explication apportée par le modèle de régression multiple, centré sur les facteurs géographiques et environnementaux reste partielle. Les modèles atmosphériques dits physiques permettent d'appréhender la complexité du milieu (transferts sol/atmosphère), difficilement prise en compte par le type de modélisation précédent (géostatistique). Le modèle méso-échelle RAMS (*Regional Atmospheric Modeling System*) est un modèle qui permet la simulation ou la prévision de circulations atmosphériques dont l'échelle spatiale s'étend de moins de 1 km au millier de km. C'est un modèle non-hydrostatique qui prend donc en compte les hétérogénéités de surface. Le forçage des sorties de modèles globaux par les modèles méso-échelle a été réalisé sur les vignobles français. Grâce à une résolution spatiale fine obtenue avec RAMS (5 km) par rapport à ARPEGE_Climat (50 km), les hétérogénéités de surface y sont mieux représentées, on peut donc s'attendre à une meilleure adéquation entre les observations et les valeurs simulées.

Scénarios d'adaptation des vins de terroir au changement climatique à une échelle de temps de 15-30 ans avec l'utilisation d'une plate-forme Multi-agents (SMA)

Cette action de recherche vise à simuler l'impact de la variabilité du climat sur la dynamique de la vigne et les capacités d'adaptation des viticulteurs au changement climatique. Les travaux de recherche menés ont abouti au développement d'un modèle multi-agents permettant de modéliser les activités viticoles dans un contexte de changement climatique et d'analyser l'évolution des stratégies de production viticole.

L'objectif est de relier les itinéraires agro-techniques à l'évolution des contraintes d'environnement de la vigne pour évaluer les méthodes de production et les stratégies d'adaptation des viticulteurs. La technologie multi-agents permet de modéliser l'ensemble des composantes de l'activité viticole et d'analyser les relations entre ces différentes composantes. Cette démarche systémique s'accompagne d'une approche analytique qui vise à étudier les modifications des pratiques viticoles en fonction de la dynamique de la vigne, des contraintes d'environnement, de l'orientation des productions et de la structure économique des exploitations.

Résultats

Les résultats des mesures et de la modélisation adaptée à l'échelle des terroirs ont permis de mettre en évidence une forte variabilité spatiale du climat sur des espaces très restreints. Au niveau des températures, les différences spatiales engendrées par les conditions locales (topographie…) sont très souvent supérieures à l'augmentation de températures simulée par les différents scénarios du GIEC pour les cinquante années à venir. Les vignerons s'adaptent à cette variabilité spatiale du climat qui détermine en partie les caractéristiques et la typicité de leur vin.

Dans le contexte du changement climatique, cette démarche d'analyse spatiale peut être une méthode d'adaptation à l'évolution temporelle du climat notamment à court et à moyen terme.

Observations agroclimatiques à l'échelle des vignobles expérimentaux

Plusieurs méthodes statistiques ont été utilisées afin de caractériser la présence ou pas d'un réchauffement climatique. Ces analyses statistiques ont été faites sur les données météorologiques mais également sur des indices bioclimatiques adaptés à la viticulture. Ces indices permettent notamment de définir des régions climatiques adaptées à la viticulture. Par exemple, l'évolution de l'indice héliothermique de Huglin permet la classification climatique des vignobles dans différentes catégories du type "très frais" au type "très chaud". Cet indice est généralement corrélé avec la teneur en sucre du raisin (Huglin, 1978 ; Tonietto, 2004).

En général, quatre ou cinq stations météorologiques complètes (températures, humidité relative, rayonnement solaire, vitesse et direction du vent, précipitations) et une vingtaine de Data Logger (centrales de mesure) enregistrant la température ont été réparties à hauteur moyenne de la vigne dans chaque site expérimental. Le choix des postes de mesures est effectué à partir de l'analyse des paramètres topographiques (altitude, pente, exposition) issus de Modèles Numériques de Terrain, de la cartographie des types de sol, des caractéristiques de la vigne (ex : cépages…) et de l'occupation du sol.

La caractérisation de la réponse viti-vinicole a porté sur la croissance de la plante en fonction de la période de son cycle végétatif (par l'intermédiaire du suivi des stades phénologiques et de la date de récolte) et sur la qualité du raisin en analysant les teneurs en sucres et acides organiques, l'acidité totale, ainsi que la teneur en anthocyanes pour les raisins rouges. Le comportement de la vigne et les analyses sur les raisins prennent en compte les pratiques mises en œuvre par les viticulteurs, lesquelles, dans la majeure partie des cas ont pour objet de contrebalancer les variations climatiques saisonnières.

Dans le Val de Loire, l'analyse a été réalisée suivant la démarche multi-scalaire imbriquée, c'est-à-dire (1) à l'échelle de la région viticole du Val de Loire puis (2) à l'échelle des vignobles d'Anjou et du Saumurois et (3) à l'échelle de l'appellation "Quart-de-Chaumes".

Les données thermiques hebdomadaires et mensuelles de dix stations de Météo-France du Centre Ouest de la France ont

été analysées de 1948 à 2010. Les indices bioclimatiques ont également été calculés.

Puis un réseau de onze stations météorologiques Campbell a été installé en 2008 dans les vignobles d'Anjou et du Saumurois. À l'échelle la plus fine, plus de vingt Data Logger enregistrant la température ont été disposés dans le vignoble de l'appellation "Quart-de-Chaumes". L'appellation "Quart-de-Chaumes" dans les Coteaux-du-Layon s'étend sur un secteur d'environ 2km sur 3km. Cette appellation est définie par des caractéristiques de sol, d'exposition (principalement sud), environnementales (proximité de la rivière Le Layon) et de cépages (Chenin) spécifiques.

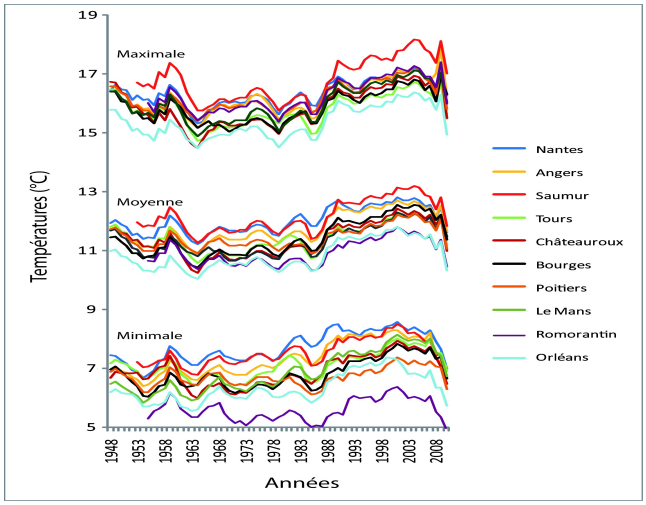


Figure 1 : Evolution de la température (avril à septembre). (Source des données : Météo-France)

C'est la combinaison de ces caractéristiques (plus le travail du vigneron) qui permettent d'élaborer ce vin liquoreux avec sa spécificité reconnue. Le climat particulier de ce terroir permet la production de vin liquoreux suite à la formation d'un champignon (*Botrycis Cinerae*) et à des vendanges tardives (Duchêne, 2005), en général au mois d'octobre voire novembre.

Depuis 1950, l'augmentation de température à l'échelle du Val de Loire a été supérieure à 1°C et huit des vingt dernières années ont été les années les plus chaudes enregistrées depuis le début de la série, en 1851. Bonnefoy et al. (2010) ont démontré pour plusieurs stations météorologiques situées dans le Val de Loire l'existence d'une rupture en 1987 dans l'évolution de la température. Cela illustre le fait que pendant les vingt dernières années la température a augmenté encore de manière plus significative. L'augmentation de la température n'a été uniforme ni dans le temps, ni dans l'espace à l'échelle des différents sous-bassins du Val de Loire. Le cycle de la croissance de la vigne étant généralement calculé entre avril et septembre dans l'hémisphère nord, l'évolution de la température a donc été calculée pour ces mois de 1953 à 2009. Toutes les stations météorologiques montrent une augmentation significative des températures minimales, maximales et moyennes, sauf pour les minimales de Romorantin. Les températures minimales de Nantes et de Beaucouzé ont augmenté plus vite que les maximales. Comme l'influence océanique se réduit lorsqu'on se situe vers l'est du Val de Loire, les températures maximales de Saumur, Tours, Romorantin, Châteauroux et Orléans ont augmenté plus vite (figure 1). Cette variabilité spatiotemporelle des températures a eu une influence au niveau de la croissance de la vigne et sur les caractéristiques du vin. Par exemple, la date de la vendange a avancé depuis 1970 dans le Val de Loire (figure 2).

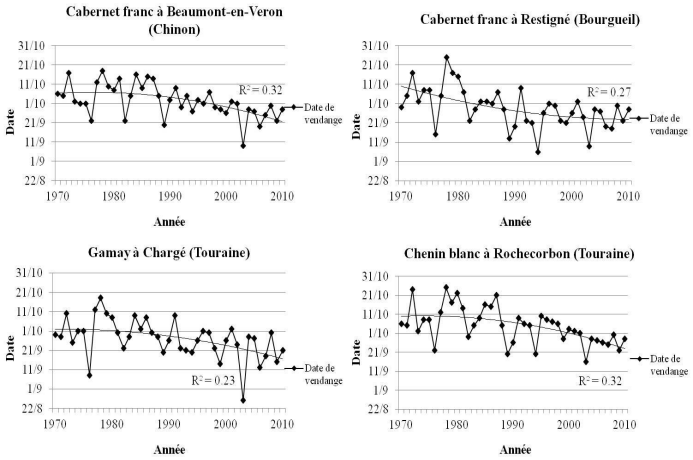


Figure 2 : Evolution de la date de vendange pour quatre parcelles, situées dans le Val de Loire, de 1970 à 2010 (Source des données : Laboratoire de Touraine). (Neethling et al, 2012)

L'analyse des capteurs thermiques disposés dans le vignoble des Coteaux du Layon au niveau de l'appellation Quart-de-Chaumes a mis en évidence une forte variabilité spatio-temporelle des températures liée à la topographie (pente et exposition), à la distance à la rivière et au type de sol.

Initialement utilisé à une échelle régionale, l'indice de Winkler a été calculé dans les vignobles des coteaux du Layon afin d'évaluer au mieux les différences qui peuvent exister entre les parcelles à une échelle très fine. La figure 3 montre l'indice calculé pour dix-neuf capteurs où aucune donnée journalière n'était manquante.

Dans ces vignobles la somme des degrés jours (somme des températures moyennes journalières supérieures à 10°C calculée durant la période végétative de la vigne) varie de 1184 à 1481 ce qui représente une différence importante au niveau des sommes thermiques. En accord avec la classification de l'indice régionale de Winkler, la plupart des capteurs seraient classés en Région I, ce qui constitue la région viticole la plus fraîche dans le monde (850-1 389 DJ). Cependant, six des dix-neuf capteurs ont des valeurs qui correspondent plus à la région II (1 389-1 667 DJ).

Cela montre à quel point le climat peut être diversifié d'un point de vue thermique à une échelle aussi locale. Les indices les plus élevés sont calculés sur les mi-pentes et/ou sur un versant exposé sud, alors que les indices les plus faibles se retrouvent soit aux endroits les plus élevés, soit dans les points les plus bas et/ou sur un versant exposé nord.

La phase d'acquisition des données agroclimatiques à l'échelle du terroir viticole (décrite ici avec l'exemple du Val de Loire) a été mise en place sur les différents vignobles expérimentaux. Les résultats ont permis de mettre en évidence une importante variabilité spatiale du climat

(notamment pour les températures) sur des espaces relativement restreints. Les analyses agronomiques ont montré aussi une relation entre ces différences climatiques locales et la vigne que cela soit au niveau de la phénologie ou des caractéristiques du raisin. Dans un contexte de changement climatique où les différents scénarios simulent une augmentation de 2 à 6°C à l'horizon 2100, la modélisation de la variabilité spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles est un objectif primordial pour la profession viticole dans une optique d'adaptation.

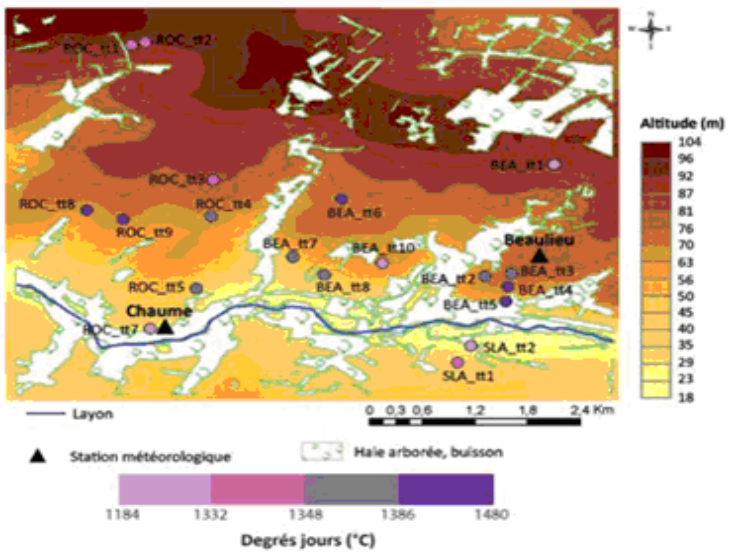


Figure 3 : Cumuls des degrés jours calculés pour la période végétative de 2009 (Bonnefoy et al., 2014).

La phase d'acquisition des données agroclimatiques à l'échelle du terroir viticole (décrite ici avec l'exemple du Val de Loire) a été mise en place sur les différents vignobles expérimentaux. Les résultats ont permis de mettre en évidence une importante variabilité spatiale du climat (notamment pour les températures) sur des espaces relativement restreints. Les analyses agronomiques ont montré aussi une relation entre ces différences climatiques locales et la vigne que cela soit au niveau de la phénologie ou des caractéristiques du raisin. Dans un contexte de changement climatique où les différents scénarios simulent une augmentation de 2 à 6°C à l'horizon 2100, la modélisation de la variabilité spatiale du climat à l'échelle des terroirs viticoles est un objectif primordial pour la profession viticole dans une optique d'adaptation.

Modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles

L'utilisation des modèles de régression multiple permet de modéliser et spatialiser, à échelle fine sur l'ensemble du territoire, des variables climatiques. Cependant, les variables à introduire dans le modèle doivent être étudiées préalablement à l'étude statistique. Cette dernière doit correspondre aux mieux au phénomène étudié. Elle doit être confrontée à la réalité et aux connaissances terrain pour être validée. La modélisation par régression est un outil puissant permettant d'obtenir une multitude d'informations sur un espace. Mais elle ne peut être qu'une approximation (relativement précise) de la réalité, particulièrement à échelle fine où de nombreux phénomènes climatiques locaux interviennent dans la variabilité des températures. Toutefois, dans le cadre de nos travaux sur l'impact du changement climatique aux échelles locales, l'utilisation des modèles de régression multiple permet de modéliser la variabilité spatiale du climat engendrée par les effets locaux. Un modèle de base a été mis en place afin d'être appliqué sur l'ensemble des vignobles expérimentaux.

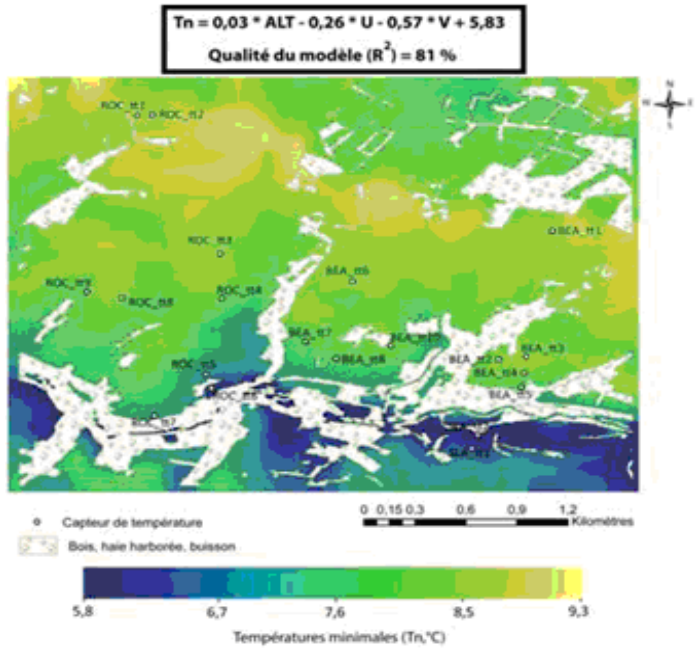


Figure 4: Spatialisation de la température minimale pour le mois d'octobre 2009 (Bonnefoy et al., 2014).

La figure 4 présente la spatialisation des températures minimales du mois d'octobre 2009 dans les Coteaux du Layon. La répartition des températures minimales est très fortement corrélée avec l'altitude et l'exposition.

Intégration des scénarios du GIEC

L'utilisation de modèles climatiques méso-échelle a permis la régionalisation de phénomènes atmosphériques avec des résolutions fines inférieures à 10 km jusqu'à 1 km et 200 m (Bonnardot et Cautenet, 2009). Avant l'intégration des scénarios du GIEC dans le modèle à méso-échelle, une phase de validation de données a été effectuée sur une période de référence. Les sorties d'ARPEGE ont ainsi été désagrégées pour deux périodes de dix ans pour réduire les temps et coûts de calcul au CINES: 1991-2000 (période de contrôle) et 2041-2050 pour la projection climatique future proche. Les champs tridimensionnels utilisés pour la période future sont ceux générés sous les conditions du scénario SRES A2 pour la fin de ce siècle avec des concentrations de CO_2 passant de 350 ppm à 850 ppm entre 2000 et 2100.

Les simulations climatiques méso-échelle ont été effectuées pour certains mois clés du cycle de la vigne (avril, juillet et août), sur la période de référence 1991-2000 puis 2040-2050 et en utilisant deux grilles imbriquées : Grille 1 avec une résolution horizontale de 25 km correspondant au domaine de forçage ; Grille 2 avec une résolution horizontale de 5 km. Cette dernière grille à haute résolution permet une comparaison des sorties de modèle avec les données observées à une échelle plus pertinente pour les différents

vignobles étudiés.

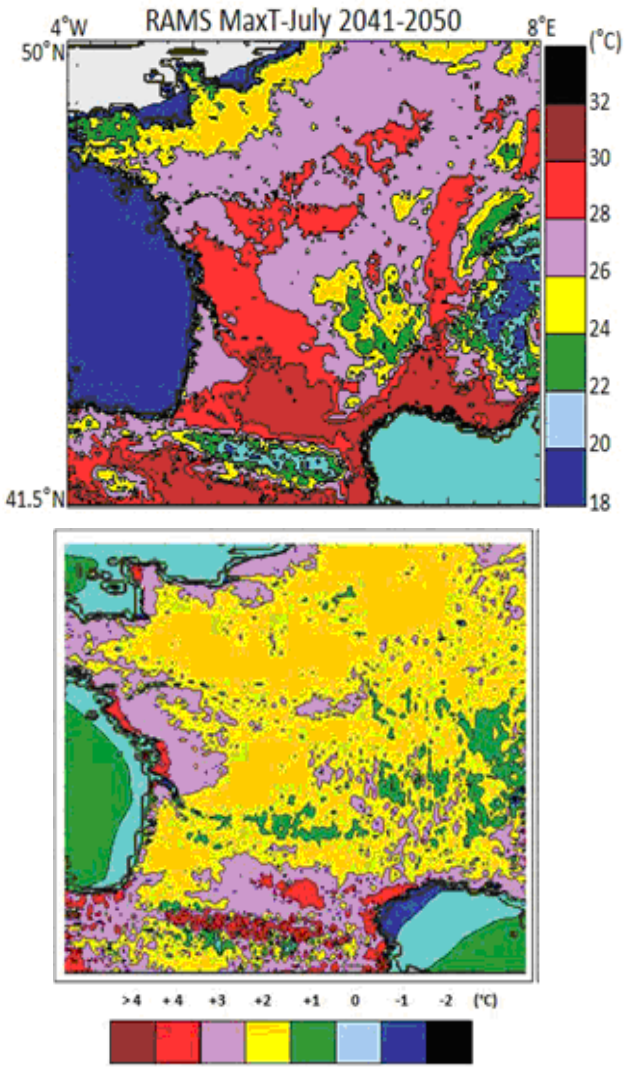


Figure 5 : Température maximale de juillet simulée par RAMS pour la période 2041-2050 sous conditions SRES A2 et pour la grille 2 (a) ; Différence entre 1991-2000 et 2041-2050 (b). (Bonnardot et al, 2012).

La figure 5 représente la distribution des températures maximales de juillet simulées par le modèle numérique atmosphérique à méso-échelle RAMS (regional atmospheric modeling system) pour la période 2041-50 sous conditions de scénario A2 ainsi que les anomalies par rapport à la période de référence. Le modèle RAMS est un modèle météorologique développé pour la simulation et la prévision des phénomènes atmosphériques à méso-échelle, c'est-à-dire à aire limitée par opposition à des modèles globaux. Ce modèle prend en compte des domaines imbriqués, si bien qu'il est possible de simuler à de très fines résolutions horizontales, jusqu'à 200 m, comme cela a été réalisé sur un domaine viticole en Afrique du Sud (Bonnardot et Cautenet, 2009). Les résultats montrent trois pôles régionaux de chaleur dans les régions du centre-ouest et du sud-ouest de la France, c'est-à-dire le bassin de la Loire moyenne et inférieure et l'Aquitaine intérieure ainsi que la vallée du Rhône et de la Saône. On distingue très bien en 2041-2050 avec RAMS la limite de la forêt landaise. Le gradient littoral est fort avec des conditions climatiques uniformément plus chaudes sur les bordures du continent.

Scénarios d'adaptation des vins de terroir au changement climatique à une échelle de temps de 15-30 ans avec l'utilisation d'une plate-forme multi-agents (SMA)

La démarche de modélisation entreprise propose une approche globale visant à simuler le déroulement des activités viticoles sous contraintes d'environnement.

Abordée via le développement d'un modèle multi-agents chargé de modéliser les interactions entre les différentes composantes de la viticulture, la problématique de l'impact de la variabilité des conditions climatiques sur les stratégies de production viticole a été plus spécifiquement ciblée. La finalité recherchée était double : il s'agissait d'une part de restituer la dynamique de la vigne à partir d'indices bioclimatiques et d'autre part de simuler les itinéraires de conduites agronomiques dans un contexte de changement climatique.

Sur le plan méthodologique, les développements réalisés ont contribué à formaliser une relation cohérente entre un réseau d'agents réactifs et un territoire viticole à partir d'une série de contraintes techniques, socio-économiques, réglementaires et environnementales. Le couplage entre base de données spatio-temporelles et modèle multi-agents s'inscrit dans cette perspective et vise notamment à améliorer l'intégration de données spatio-temporelles composites comme variables de forçage afin de restituer la variabilité du déroulement des activités viticoles (figure 6a et 6b).

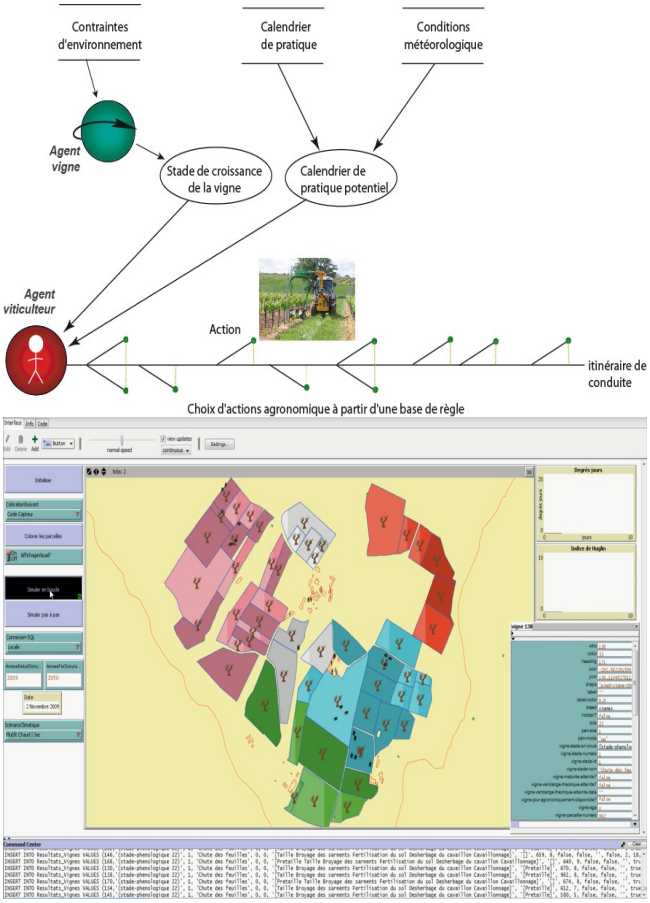


Figure 6 : Éléments de la base de règle (a) et plate-forme multi-agents (b) (Tissot et al, 2014)

Sur le plan thématique, l'analyse des implications du changement climatique sur les itinéraires de conduites agronomiques et les stratégies de production représente un enjeu important pour la profession viticole qui doit s'adapter aux modifications des conditions d'environnement tout en conservant la typicité des terroirs et les caractéristiques des vins d'appellation.

Les premiers résultats obtenus même s'ils restent partiels montrent que le modèle DAHU-Vigne est en mesure de restituer la dynamique de la vigne et de simuler des itinéraires de conduites agronomiques en lien avec la variabilité des conditions climatiques. Cette étape est cruciale, car elle constitue un préalable indispensable à l'analyse des stratégies de conduite de la vigne dans un contexte perturbé.

A l'issue de cette première phase de développement, de nombreuses perspectives sont donc envisagées. Elles concernent principalement des améliorations du code de calcul de DAHU-Vigne qui nécessite d'être étoffé pour évaluer les implications de certains outils d'adaptation sur la dynamique de la vigne. Sur le plan technique cela revient à introduire des boucles de rétroaction au sein du modèle pour simuler les implications des choix de conduites agronomiques sur les caractéristiques de la vigne (vigueur, précocité, résistance aux pathogènes…). Dans cette perspective le couplage de DAHU-Vigne au modèle Walis (modèle de bilan hydrique du sol en vigne) (Celette et al., 2010) a été engagé. Cette démarche permet de modéliser l'influence d'actions sur le contrôle du bilan hydrique de la vigne. Elle est actuellement testée en Argentine sur le site de Mendoza (Bodega Alta Vista en Argentine).

L'intégration d'autres indicateurs permettant notamment de mesurer la qualité potentielle de la baie de raisin est également envisagée. Ces développements permettraient de contrôler des variables par anticipation et d'intervenir dans la prise de décision des viticulteurs pour réaliser ou non une action agronomique au regard de la stratégie globale adoptée.

La construction de ces modèles multi-agents pour apporter des "réponses" à la profession viticole nécessite une forte implication des acteurs. Dans le Chaumes/Quart-de-Chaumes, les viticulteurs sont peu nombreux et très impliqués dans cette démarche. Pour l'Argentine, nous avons mis en place des ateliers participatifs où tous les viticulteurs ont été conviés. Sur ces deux terrains, l'impact du changement climatique s'est déjà fait sentir avec des conséquences positives ou négatives pour l'activité viticole. Des premières réunions entre les chercheurs de TERADCLIM et les organismes viticoles ont montré l'intérêt pour ce type de démarche.

Conclusions – Perspectives

Les simulations régionalisées du changement climatique en fonction des différents scénarios permettent d'obtenir des estimations de l'évolution climatique future à une résolution de quelques kilomètres. Les progrès réalisés au niveau de la modélisation atmosphérique montrent une convergence des modèles vers des résultats largement partagés et qui semblent signifiants à grande échelle (Le Treut, 2010).

Toutefois, la succession de phases d'incertitudes, de la conception des modèles aux différents scénarios envisagés, rend très difficile la mise en place de scénarios d'adaptation au changement climatique à plus ou moins long terme.

Afin de limiter ces incertitudes, l'analyse de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines peut être un bon outil d'adaptation au changement climatique futur.

La forte variabilité spatiale du climat sur des espaces très restreints engendrée par les aspérités et la nature de la surface (type d'occupation du sol…) sont du même ordre voire supérieures à l'augmentation de température simulée par les différents scénarios du GIEC. Le vigneron s'adapte à cette variabilité spatiale du climat notamment par ses pratiques culturales. Dans le contexte du changement climatique, la connaissance préalable de la variabilité spatiale du climat aux échelles fines est un atout pour imaginer des possibilités d'adaptation à l'évolution temporelle du climat à plus ou moins long terme. La connaissance du climat actuel aux échelles locales permet à l'Homme d'adapter ses activités. Par exemple, un viticulteur ne plantera pas des cépages sensibles à la sécheresse sur une parcelle où le déficit hydrique est important. Cette connaissance climatique locale est un point de départ pour sensibiliser les acteurs à l'adaptation de leurs activités au changement climatique.

La démarche multiscalaire de TERADCLIM a permis d'étudier les modalités de la variabilité climatique et des impacts du réchauffement global à des échelles fines.

Des modèles adaptés à l'échelle locale et à celle des terroirs viticoles ont exploité conjointement des données issues du réseau météorologique conventionnel, mais aussi des données issues de mesures climatiques et agronomiques opérées au sein des vignobles. Le réseau de capteurs installés dans les vignobles offre ainsi une base de données exceptionnelle pour cibler la variabilité spatiale et temporelle du climat viticole aux échelles fines. Dans un certain nombre de vignobles pris en compte dans cette étude, la variabilité du climat à l'échelle d'un terroir – qui marque sensiblement le millésime et la typicité du vin – s'affirme plus forte que celle enregistrée à l'échelle régionale, ou même globale.

L'étude des différents exemples géographiques de modélisation climatique à l'échelle des terroirs viticoles, souligne, dans tous les cas, pour l'avenir, une nécessaire adaptation des terroirs viticoles au réchauffement climatique. Cette adaptation *"permettant de simuler les activités viticoles dans un contexte de changement climatique et d'analyser l'évolution des stratégies de production viticole"* doit intégrer non seulement des pratiques culturales ou œnologiques nouvelles et cela dès le court terme, mais aussi un aménagement des conditions socio-économiques et de la législation des régions de vignoble. En France, les normes actuelles d'AOC/AOP pourraient devoir être révisées, le cas échéant, pour permettre un recours à l'irrigation, ou même pour autoriser une "nouvelle donne" géographique des cépages.

Dans d'autres pays où la législation est plus souple, des adaptations sont déjà en cours. En Argentine, la pénurie en eau liée à la forte diminution des précipitations neigeuses sur le massif andin a conduit à des modifications de la gestion de l'eau en viticulture, par exemple par la réduction de l'irrigation gravitaire. Certains viticulteurs de la province de Mendoza pratiquent maintenant une "irrigation raisonnée" avec un système de goutte à goutte qui économise l'eau tout en

réduisant les pertes par évaporation et préservant les sols du lessivage. Là encore, les fortes contraintes hydriques liées au changement climatique poussent certains viticulteurs à déplacer leurs vignobles plus en altitude, vers les versants du piémont andin (vallée d'Uco et de Cafayate).

La continuité du projet TERADCLIM concerne principalement la sensibilisation de la profession viticole à l'adaptation des terroirs viticoles au changement climatique notamment par l'intermédiaire du projet LIFE-ADVICLIM[1] qui a débuté en juillet 2014.

II. APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Tout au long du projet TERADCLIM, la profession viticole a été impliquée notamment par l'intermédiaire de réunions organisées avec l'interprofession et l'organisation d'ateliers participatifs sur l'adaptation de la viticulture au changement climatique.

Par exemple, le 21 novembre 2012, un atelier avec les principaux viticulteurs de la région de Mendoza a eu pour objectif d'étudier les stratégies d'adaptation des vignobles au changement climatique. Après avoir présenté les différents résultats des analyses et de la modélisation réalisées dans les vignobles expérimentaux argentins, l'atelier s'est déroulé en trois étapes : 1- impact du climat sur l'activité viticole ; 2- stratégies d'adaptation ; 3- actions nécessaires pour lutter contre le changement climatique.

Durant cet atelier, les vignerons ont identifié les principaux défis climatiques auxquels ils sont confrontés. D'une part, les changements lents du climat qui redéfiniront les zones favorables à la culture de la vigne et d'autre part, l'augmentation des phénomènes extrêmes comme les sécheresses, les vagues de chaleur, la grêle ou les gelées de printemps. L'augmentation des températures de ces dernières décennies a un impact sur le cycle phénologique de la vigne et surtout sur l'augmentation des taux de sucre et de la teneur en alcool des vins. Face à ces nouveaux défis en matière de gestion des risques climatiques, la majorité des exploitations viticoles a déjà incorporé des stratégies de lutte active ou passive (des assurances) contre les événements climatiques.

Les principales inquiétudes des viticulteurs *mendocinos* concernent l'augmentation des extrêmes mais surtout la forte diminution des ressources en eau. Les méthodes d'adaptation sont évoquées à des échelles temporelles différentes. En comparaison avec des enquêtes réalisées dans le Val de Loire, les méthodes d'adaptation évoquées à long terme sont, à Mendoza, déjà mises en place. Il s'agit notamment de l'irrigation et des pratiques œnologiques permettant de limiter les niveaux de sucre et d'alcool. Dans une optique à plus long terme, les propriétaires viticoles de Mendoza plantent de la vigne dans des régions plus au sud (ex : Patagonie) ou plus en altitude (ex : Vallée de Tupungato).

Les résultats de ces enquêtes et des ateliers participatifs avec la profession viticole sont en cours d'intégration dans le système multi-agents afin de relier les itinéraires agro-techniques à l'évolution des contraintes d'environnement de la vigne pour évaluer les méthodes de production et les stratégies d'adaptation des viticulteurs.

Les résultats du projet TERADCLIM ont permis la réalisation d'un documentaire scientifique "Et pour quelques degrés de plus, …" par le CNRS-Images en septembre 2013 (Réalisateur : Christophe Gombert).

Toujours en termes de transfert, une *business unit* intitulé TerraClima© "études climatiques de haute précision spatiale" a été créée en 2013.

III. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

Articles scientifiques

Neethling E., Barbeau G., Bonnefoy C. et Quénol H., 2012 : Evolution in climate and berry composition for the main grapevine varieties cultivated in the LoireValley. *Climate Research*, 53, 89-101.

Bonnefoy C., Quénol H., Bonnardot V., Barbeau G., Madelin M., Planchon O. And Neethling E., 2012: Temporal and Spatial Analysis of Temperatures in a French wine-producing area: the Loire Valley. *International Journal of Climatology.* DOI : 10.1002/joc.3552.

Van Leeuwen C., Schultz H., Garcia de Cortazar-Atauri I., Duchêne E., Ollat N., Pieri P., Bois B., Goutouly J.P., Quénol H., Touzard J.M., Malheiro A.C., Bavaresco L. and Delrot S., 2013: Why climate change will not dramatically decrease viticultural suitability in main wine-producing areas by 2050. *Proceedings of the National Academy of Sciences* (PNAS), letter, 2013 110 (33) E3051-E3052; published ahead of print June 21, 2013, doi:10.1073/pnas.1307927110.

Briche E., Beltrando G., Somot S. and Quénol H., 2014 : Critical analysis of simulated daily temperature data from the ARPEGE-Climate model: application to climate change in the Champagne wine-producing region. *Climatic Change.* DOI : 10.1007/s10584-013-1044-5.

Quénol H. and Bonnardot V., 2014: A multi-scale climatic analysis of viticultural terroirs in the context of climate change : the "TERADCLIM" project. *International Journal of Vine and Wine Sciences*. 23-32.

Ouvrages et chapitres d'ouvrages scientifiques

Quénol H., 2014 : *Changement climatique et viticulture*. Ed. Lavoisier, coll. Tech. & Doc. 444p. ISBN : 9782743015756.

Quénol H., 2011 : *Observation et modélisation spatiale du climat aux échelles fines dans un contexte de changement climatique*. Habilitation à Diriger des Recherches à l'Université de Haute Bretagne, 2 vol., 298p.

1 adaptation of vIticulture to climate change : High resolution observations of scenarii for viticulture.

Participations aux colloques nationaux ou internationaux

Bonnardot V., Cautenet S., Planchon O. et Quénol H., 2011 : Simulations climatiques méso-échelles : comparaison de données observées et simulées en vue d'une integration de scénarios de changement climatique. Actes du XXIVème colloque de l'AIC, Rovereto, Italie, 93-98.

Quénol H., 2012 : Observation et modélisation du climat à l'échelle des terroirs viticoles. Actes du IX Congrès International des Terroirs, Dijon/Reims, 25-29 juin 2012. 3, 15-17.

Neethling E., Sicard S., Barbeau G., Bonnefoy C. and Quénol H., 2012: Spatial variability of temperature and grapevine growth at terroir scales in the context of climate change. Actes du IX Congrès International des Terroirs, Dijon/Reims, 48-50.

Neethling E., Coulon C., Barbeau G., Courtin V., Quénol H. and Bonnefoy C., 2012 : Viticultural strategies to adapt to climate change: Temporal and spatial changes in land use and crop practices. 10th European IFSA Symposium, 9p.

Quénol H., 2013 : Terroirs viticoles et changement climatique. In 11e Journée Technique du CIVB.

Articles de vulgarisation

"Les vendanges tardives ne le sont plus… !". Revue Sciences Ouest : n°283, janvier 2011. p9.

"Adapting Vineyards to Climate Change". CNRS International Magazine – No.22, p17 – July 2011, Current Trends in Superconductivity. Article de Ruth Surridge. http://www.cnrs.fr/fr/pdf/cim/CIM22.pdf.

Documentaires

"Coup de Chaleur sur le Vin". Un film de 52mn écrit et réalisé par Eric Michaud. Une coproduction Saison cinq, France Télévisions avec la participation de la RTBF.

Eric Michaud et son équipe sont venus sur les sites TERADCLIM dans le Val de Loire et à Mendoza pour filmer le travail sur le terrain que nous effectuons. Première diffusion mai 2011.

"Pour quelques degrés de plus…" Réalisation d'un documentaire scientifique sur les projets TERVICLIM et TERADCLIM avec le CNRS-Images en septembre 2013. Réalisateur : Christophe Gombert.

Bibliographie

Bonnardot V., Cautenet S., 2009, Mesoscale modeling of a complex coastal terrain in the South-Western Cape using a high horizontal grid resolution for viticultural applications, *J. Appl. Meteorol. Climatol.* 48, 330-348.

Bonnefoy C., Quenol H., 2010, Planchon O., Barbeau G., Températures et indices bioclimatiques dans le vignoble du Val de Loire dans un contexte de changement climatique, *EchoGéo* [http://echogeo.revues.org/12146], 14.

Celette F., Ripoche A., Gary C., 2010, WaLIS – A simple model to simulate water partitioning in a crop association : The example of an intercropped vineyard", *Agricultural Water Management*, 97(11), 1 749-1 759.

Duchêne E., Schneider C., 2005, Grapevine and climatic changes: a glance at the situation in Alsace, *Agronomy for Sustainable Development*, 25, 93-99.

Huglin P., 1978, Nouveau mode d'évaluation des possibilités héliothermiques d'un milieu viticole, Comptes rendus des séances de l'Académie d'agriculture de France, 64, 1 117-1 126.

Quénol H., *Changement climatique et terroirs viticoles*, Lavoisier Tec&Doc, 440p, 2014. Tonietto J., Carbonneau A., 2004, A multicriteria climatic classification system for grape-growing regions worldwide, *Agric. Forest Meteorol*., 124, 81-97.

Commissariat général au développement durable
Direction de la recherche et de l'innovation
Tour Séquoia
92055 La Défense cedex
Tél : 01.40.81.21.22

Retrouver cette publication sur le site :
http://www.developpement-durable.gouv.fr/developpement-durable

Les connaissances scientifiques au service de la COP21

Florilège des projets de recherche GICC 2008-2015

La tenue en 2015 à Paris de la 21e Conférence des parties de la Convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques (COP21) est l'occasion pour le Commissariat général au développement durable du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie (Medde) de présenter dans ce document les résultats de plusieurs projets de recherche du programme *gestion et impacts du changement climatique (GICC)*, conduits sur la période 2008-2015.

L'atteinte des objectifs de la COP21, contenir le réchauffement moyen en dessous de 2°C par des actions d'atténuation et adapter nos sociétés face au changement climatique, sur la base notamment de l'agenda des solutions, ne peut se concevoir sans l'éclairage par les résultats de la recherche. Le programme GICC a pour ambition d'y contribuer.

L'objectif de ce document est donc de présenter les thèmes, axés sur le changement climatique, abordés dans le cadre du programme et de montrer à travers ces restitutions, notamment la rubrique « apport aux politiques publiques et acquis en termes de transfert », les liens étroits qui existent entre connaissance et action, savoir et décision.

Ce document n'est pas exhaustif en ce sens qu'il ne présente pas la totalité des recherches menées dans le cadre du programme GICC dont on pourra retrouver l'intégralité sur le site dédié : www.programme-gicc.fr.

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie

Dépôt légal : novembre 2015
ISSN : 2102-474X

Direction de la recherche et de l'innovation
www.developpement-durable.gouv.fr