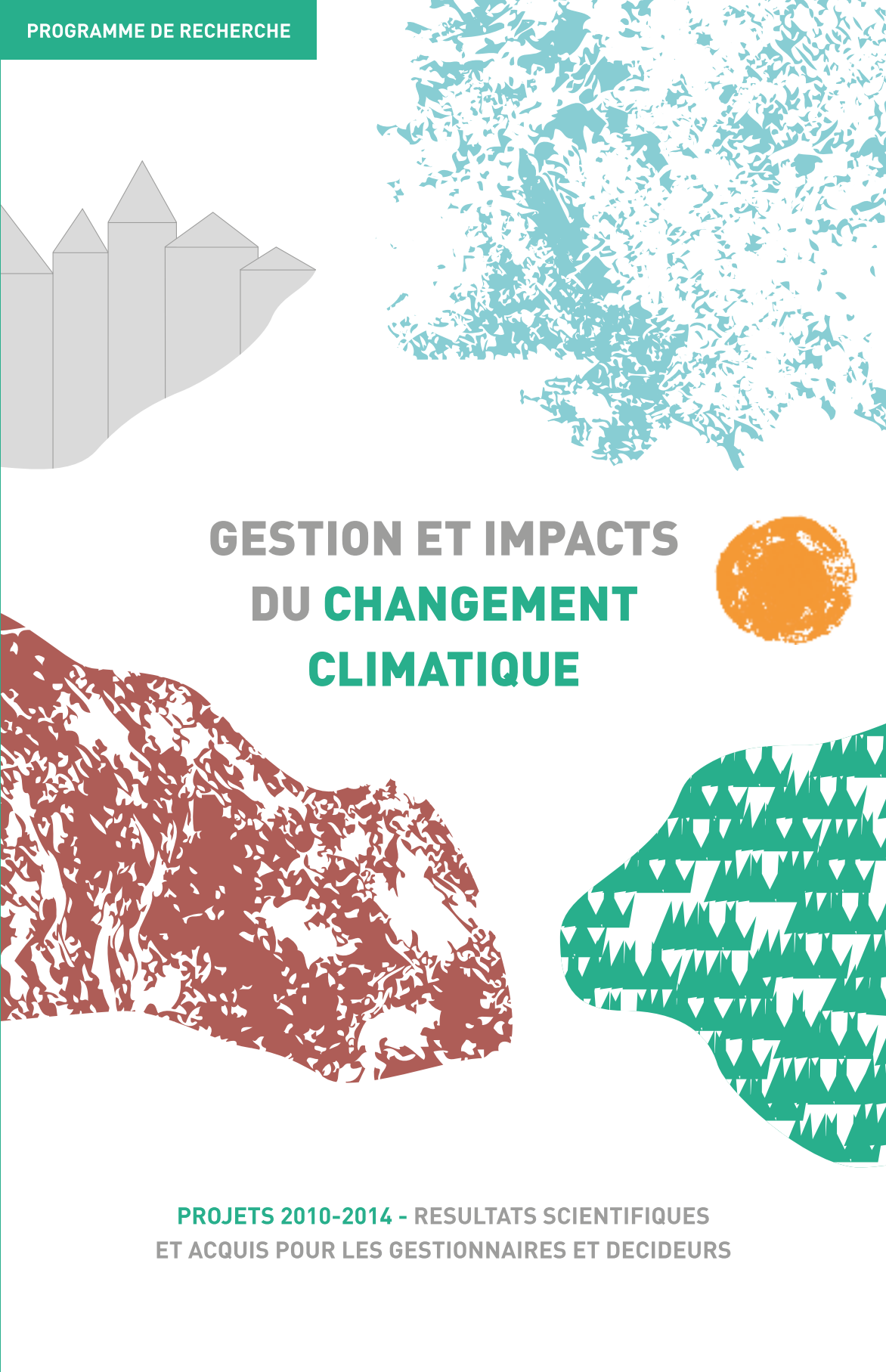




GESTION ET IMPACTS DU **CHANGEMENT** **CLIMATIQUE**

**PROJETS 2010-2014 - RESULTATS SCIENTIFIQUES
ET ACQUIS POUR LES GESTIONNAIRES ET DECIDEURS**

© GIP Ecofor, MEDDE, 2015, 1ère édition

Citation recommandée (pour l'ouvrage complet) :

Bakhache C., Imbard M., Millier C. (coordinateurs), 2015.

Programme de recherche « Gestion et Impacts du Changement Climatique »,

Appel à projets 2010- 2014, Résultats scientifiques et acquis pour les gestionnaires et décideurs, GIP Ecofor-MEDDE, XXX p.

ISBN : 978-2-914770-07-1

Pour obtenir cet ouvrage en version papier :

GIP Ecofor

42 rue Scheffer

75116 Paris

secretariat@gip-ecofor.org

01 53 70 21 70

Pour obtenir cet ouvrage en version numérique :

<http://www.programme-gicc.fr> (rubrique « publications »)

Conception graphique : Léa Chevrier

PROGRAMME DE RECHERCHE

**GESTION ET IMPACTS
DU CHANGEMENT
CLIMATIQUE**

**PROJETS 2010-2014 - RESULTATS SCIENTIFIQUES
ET ACQUIS POUR LES GESTIONNAIRES ET DECIDEURS**

**GESTION ET IMPACTS
DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
ORGANISATION DU PROGRAMME
DE RECHERCHE**

Le programme est piloté par le Comité d'Orientation, composé d'organismes, soutenu par un Conseil Scientifique composé d'experts scientifiques du domaine. Il est animé par le Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie et par le Groupement d'Intérêt Public Ecofor. Les projets sont financés par le Service de la recherche du Ministère chargé du développement durable et par tout autre financeur intéressé ; ont notamment contribué à ce programme l'Ademe et l'Onerc.

LE COMITÉ D'ORIENTATION

Présidé par le Chef du service de la recherche, de la Direction de la recherche et de l'innovation du Ministère en charge du développement durable, il réunit les représentants des organismes suivants :

Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie
Agence de l'eau Seine-Normandie
Agence nationale de la recherche
Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail
Entreprises pour l'environnement
Caisse des dépôts et consignations
CNRS Insu
Conservatoire du littoral
Ministère de l'écologie, du développement durable, et de l'énergie
AgroParisTEch-Engref
GIP Ecofor
GIS Climat environnement et société
Institut national de recherche agronomique
Hélio international
Institut du développement durable et des relations internationales
Institut de veille sanitaire
Laboratoire de glaciologie et géophysique de l'environnement
Ministère des affaires étrangères et du développement international
Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt
Ministère de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche
Ministère des finances et des comptes publics

Météo-France
Observatoire national des effets du réchauffement climatique
Office national de l'eau et des milieux aquatiques
Parcs nationaux de France
Région Rhône-Alpes
Sénat
WWF France
Le président du Conseil scientifique du programme

LE CONSEIL SCIENTIFIQUE (2010 - 2014)

Présidé par Claude Millier, il est composé de chercheurs en sciences du climat, en économie, sciences sociales, écologie, santé, etc.

Beat Burgenmeier (Université de Genève)
Pierre Chevallier (Université Montpellier 2)
Wolfgang Cramer (CNRS)
Pascale Delecluse (Météo-France)
Antonio Guell (CNES)
Philippe Guttinger (Université Paris X)
Jean-Pierre Lacaux (Observatoire Midi-Pyrénées)
Sandrine Maljean-Dubois (CNRS)
Jean-Claude Manuguerra (Institut Pasteur)
André Monaco (Université de Perpignan)
Serge Morand (CNRS)
Michel Nakhla (MinesParisTech)
Michel Petit (Conseil général des technologies de l'information)
Serge Planton (Météo-France)
Felipe Duarte Santos (Université de Lisbonne)
Rainer Sauerborn (Université d'Heidelberg)
Bernard Seguin (Inra)
Henry Tulkens (Université catholique de Louvain)
Chloé Vlassoupoulou (Université de Picardie)

AVANT-PROPOS

En 2013, nous avons publié un premier ouvrage présentant la synthèse des résultats des quatorze projets, conduits sur la période 2009-2011, du programme de recherche *gestion et impacts du changement climatique* (GICC) du Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie (MEDDE).

Fort de cette expérience et du succès de cette publication, largement diffusée vers la communauté recherche, les décideurs, les gestionnaires et les acteurs concernés par le changement climatique, nous présentons maintenant les synthèses des neuf projets menés sur la période suivante 2011-2013.

Le programme GICC est le programme incitatif qui vient en appui aux politiques publiques du ministère avec pour objectifs de développer les connaissances sur le changement climatique en cours et à venir, en considérant aussi bien l'angle de la lutte contre le changement climatique et les mesures d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre à mettre en place, que les études sur les impacts du changement climatique et les mesures nécessaires d'adaptation à prendre pour faire face à l'inévitable. Pour cela, le programme mobilise depuis maintenant plus de quinze ans des équipes souvent pluridisciplinaires provenant des sciences physiques et du vivant, des sciences humaines et sociales. Les projets de cette période 2011-2013 montrent bien toute cette diversité et l'aspect foisonnant de cette recherche.

Le projet MIRRACLE traite de l'adaptation des mesures de risques usuelles dans un climat en évolution, ETEM-AR développe une modélisation des choix d'atténuation et d'adaptation du système énergétique et EPIDOM instruit le sujet de la prévision décennale et de sa prévisibilité, cette prévision suscitant de fortes attentes en raison de son potentiel applicatif. Ce projet est d'ailleurs exemplaire puisque, bien que relevant aujourd'hui de questionnements scientifiques fondamentaux, il a permis d'impulser la recherche dans ce domaine en France en fédérant les laboratoires autour du sujet, en permettant de participer au 5^e rapport du GIEC et en étant in-fine poursuivi dans un nouveau projet français porté cette fois-ci par l'ANR.

Les autres projets sont plus finalisés, mais ils n'en présentent pas moins une grande diversité, allant de la vulnérabilité et de la demande des industriels (INVULNERABLE-2), de l'étude de l'écogéomorphologie des estuaires (C3E2), de la ressource en eau dans la vallée de la Durance (R2D2 2050), des terroirs viticoles (TERADCLIM) à l'évolution des vecteurs du paludisme en zone sahélienne (PALUCLIM) et à l'adaptation des arbres sur des gradients altitudinaux (GRAAL). Ces six projets ont un objectif commun, l'adaptation au changement climatique, en estimant les impacts sur les éco-systèmes et les secteurs d'activités, et en analysant les mesures qui peuvent être prises en concertation, en collaboration, ou en co-production avec les acteurs locaux ou territoriaux.

L'adaptation est bien depuis les années 2005-2008 le thème majeur du programme qui a su faire évoluer ses objectifs en fonction de l'avancée de la recherche et de la demande de son comité d'orientation.

Aujourd'hui et le dernier rapport du GIEC l'a une fois de plus confirmé, le changement climatique est « *sans équivoque et ce depuis les années 1950* ». Ce constat nous est rappelé régulièrement. L'année 2014 est une des années les plus chaudes si ce n'est la plus chaude jamais enregistrée. De même, l'étendue maximale de glace de mer en Arctique en 2015 est la plus réduite jamais observée. Le changement climatique est bien là et compte tenu de l'inertie du système qui est considérable, ce 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, de nous, à changer de modèle et à évoluer vers une société bas carbone et plus efficace dans sa consommation d'énergie. Il faut donc évoluer et s'adapter. L'adaptation selon l'une des nombreuses définitions est « *la démarche d'ajustement au climat actuel ou attendu, ainsi qu'à ses conséquences. Dans les systèmes humains, il s'agit d'atténuer ou d'éviter les effets préjudiciables et d'exploiter les effets bénéfiques. Dans certains systèmes naturels, l'intervention humaine peut faciliter l'adaptation au climat attendu ainsi qu'à ses conséquences* ». Cette démarche toute d'anticipation, forcément croisée à la démarche plus ancienne de l'atténuation, qui nécessite une action non différée aujourd'hui pour un changement à venir qui relève du moyen et long terme implique le renouvellement des politiques publiques et l'adhésion de l'ensemble de la société. Elle ne peut se concevoir sans l'éclairage de la recherche. C'est bien ce qui a motivé le choix des projets du programme GICC.

L'année 2015, année de publication de cet ouvrage est en France l'année où la lutte contre le réchauffement climatique est consacrée grande cause nationale, année de proposition du projet de loi sur la transition énergétique et c'est enfin l'année de la 21^e Conférence des parties à la Convention cadre des Nations unies sur le changement climatique (COP21). Autant dire que les recherches sur le climat et le changement climatique, qu'elles concernent la compréhension des mécanismes en jeux, l'évaluation des impacts, l'élaboration des mesures d'atténuation et d'adaptation, l'analyse de la sensibilisation et de l'évolution de la société face à ce changement, sont au cœur de l'actualité et que la demande en recherche et en actions est forte.

A son modeste niveau le programme GICC apporte sa pierre à cet édifice de connaissances et également à la diffusion de cette connaissance. Cet ouvrage en est la preuve.

En conclusion, je tiens à remercier de nouveau, au nom du service de la recherche du MEDDE et en tant que président du Comité d'orientation du programme, le président du Conseil scientifique, Claude Millier, qui vient d'achever son mandat

et je salue son successeur, Denis Salles, qui saura maintenir le niveau d'excellence du programme et poursuivre ses objectifs.

Je tiens également à remercier les responsables scientifiques des neufs projets pour leur investissement dans la réalisation de cette synthèse et pour le soin qu'ils y ont apporté et les membres du Conseil scientifique qui ont choisi et suivi les projets.

Bonnes lectures à tous.

Philippe Courtier,

Chef du Service de la Recherche

Direction de la recherche et de l'innovation,

Commissariat général au développement durable,

Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.

INTRODUCTION

Les projets retenus pour financement dans l'appel à proposition 2010 du programme « gestion et impacts du changement climatique » (GICC) sont terminés et leurs rapports finaux ont été évalués et restitués lors d'une conférence qui s'est tenue le 21 mai 2014. Le lecteur trouvera dans l'ouvrage les « synthèses » de ces différents projets, demandées en sus des rapports finaux pour mieux valoriser et disséminer les résultats du programme GICC.

Cet appel lancé en prolongement de l'appel à projets 2008 en reprend donc les thématiques et déplace quelque peu la focale de la problématique impacts vers les questions et politiques d'adaptation.

Les projets issus de l'appel lancé en 2010 portent sur une grande palette de secteurs allant des milieux naturels (estuaires, ressources en eau) à celui des entreprises en passant par la viticulture, la sylviculture et la santé humaine. Ils traitent également de sujets plus transversaux tels que la mesure des risques, les synergies adaptation/atténuation, l'efficacité et la robustesse des politiques publiques, les services climatiques et la prévisibilité décennale.

L'hétérogénéité du programme, par les thèmes abordés aussi bien que les méthodes, approches et disciplines, continue de faire sa force. Les résultats obtenus, présentés ici, montrent une avancée dans des domaines variés. Par exemple, un projet unique regroupant toute la communauté française travaillant sur la prévision décennale a servi les enjeux de la recherche dans ce domaine au niveau national et international, en adéquation avec la prise en compte de cette problématique dans le 5e rapport du GIEC. Les projets ancrés à une échelle territoriale s'intéressant à l'évolution et l'adaptation des milieux et des pratiques ajoutent à l'accumulation des connaissances pour anticiper l'effet des changements climatiques en cours et à venir. Le développement de méthodes et modèles innovants pour interroger les enjeux sociaux, économiques et scientifiques du changement climatique est aussi très présent dans cet appel 2010.

Lui a fait suite un appel lancé en 2012, intégrant au plus proche les acteurs de l'adaptation, mais aussi de nouveaux métiers (notamment le métier de designer) ouvrant de nouvelles perspectives pour innover socialement et techniquement, diffuser et utiliser les résultats des recherches sur le changement climatique.

La parution en 2015 de cet ouvrage, à la veille de la conférence de Paris devant décider de l'avenir du régime climatique international, participe à rendre visible les activités de la communauté scientifique, les apports de la recherche aux questions que posent le changement climatique aux différentes échelles.

Claude Millier

Président du Conseil scientifique du programme GICC

SOMMAIRE

Adaptation au changement climatique à l'échelle
des terroirs viticoles - TERADCLIM
Hervé Quénol (CNRS)

■ p. 25 ■

Modéliser l'atténuation et l'adaptation du
système énergétique dans un plan climat local – ETEM-AR
Alain Haurie (ORDECSYS)

■ p. 47 ■

Risque, ressources en eau et gestion durable
de la Durance en 2050 – R²D² 2050
Eric Sauquet (Irstea)

■ p. 59 ■

Evaluation de la prévisibilité internannuelle à décennale
à partir des observations et des modèles – EPIDOM
Christophe Cassou (Cerfacs-CNRS)

■ p. 81 ■

Conséquences du changement climatique
sur l'écogéomorphologie des estuaires – C₃E₂
Pierre Le Hir (Ifremer)

■ p. 99 ■

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

■ p. 121 ■

Mesures et indicateurs de risques adaptés
au changement climatique – MIRACCLE
Pierre Ribereau (Université Lyon 1)

■ p. 139 ■

Mesure du potentiel d'adaptation des arbres forestiers au changement
climatique : approches in situ et ex situ sur gradients altitudinaux
à l'aide de dispositifs de transplantation croisée – GRAAL
Philippe Rozenberg (Inra)

■ p. 153 ■

Emergence des vecteurs du paludisme en zone rurale du Sahel
et stratégies d'adaptation, impacts des facteurs climatiques.
Application à la région de Nouna au Burkina Faso – PALUCLIM
Cécile Vignolles (CNES)

■ p. 171 ■

TERADCLIM
ADAPTATION AU CHANGEMENT CLIMATIQUE
À L'ÉCHELLE DES TERROIRS VITICOLES

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: 2011

Montant du budget: subvention de 298 000 €

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

Responsable scientifique du projet:

Hervé Quénol

CNRS, UMR6554 LETG, Université Rennes 2

Place du recteur Henri le Moal 35043 Rennes

herve.quenol@uhb.fr

Partenaires Scientifiques:

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, Système 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 culturelles en fonction d'une nouvelle donne climatique en mettant à l'œuvre leur savoir-faire (techniques culturelles raisonnées, évolution des variétés...).

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

INTRODUCTION

Les nombreuses interrogations posées par le changement climatique engendrent une multitude de questions sur le fonctionnement des géosystèmes 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 culturelles. 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 modéli-

sation 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 XXème siècle), a été réalisée, pour une ou plusieurs stations météorologiques issues des réseaux nationaux.
- A 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.
- A 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 plateforme 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 vigneron 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. A 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. 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 (*Botrytis Cinerea*) 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, Châteaoux 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).

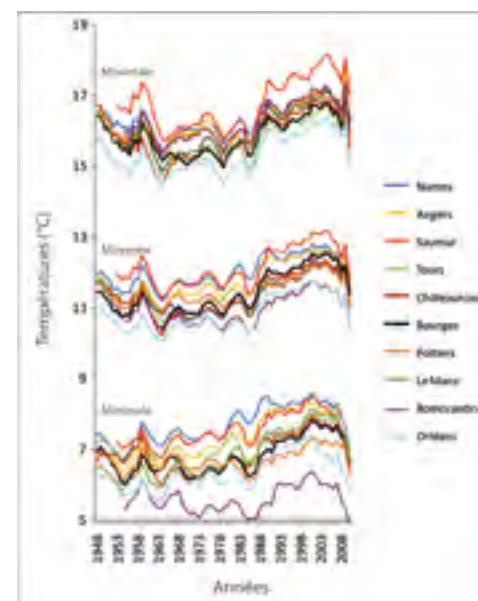


Figure 1 : Evolution de la température (avril à septembre). (Source des données : Météo-France)

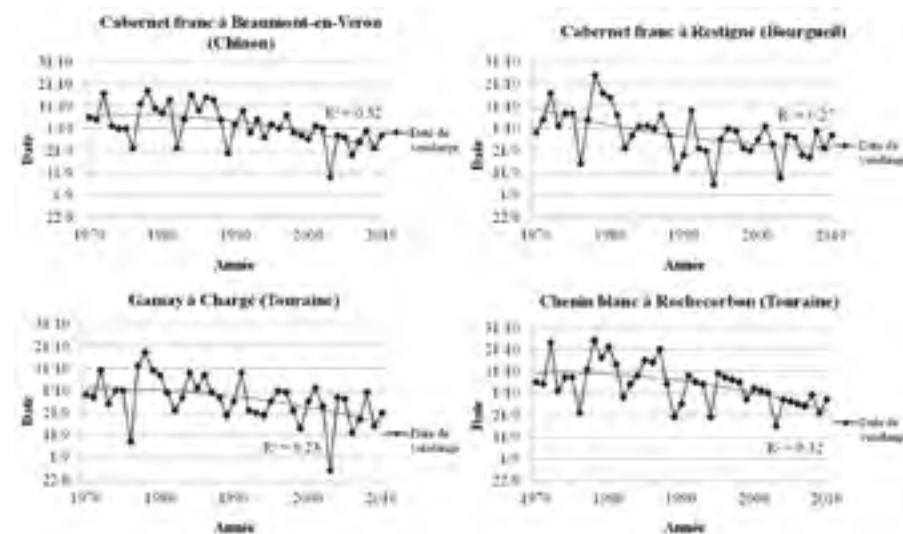


Figure 2 : Evolution de la date de vendange pour quatre parcelles, situées dans le Val de Loire, de 1970 à 2010 (Source des données : Laboratoire de Touraine). (Neethling et al, 2012)

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.

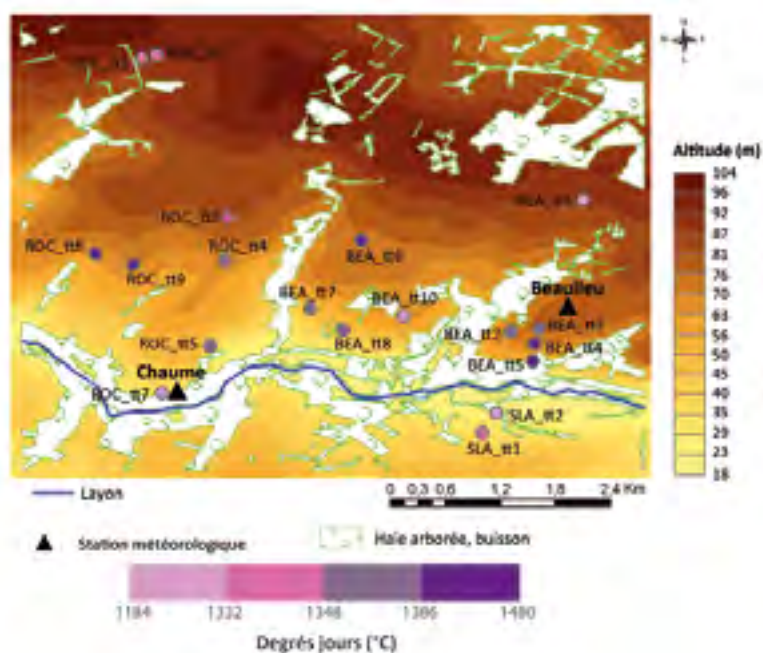


Figure 3: Cumuls des degrés jours calculés pour la période végétative de 2009 (Bonnefoy et al, 2014).

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

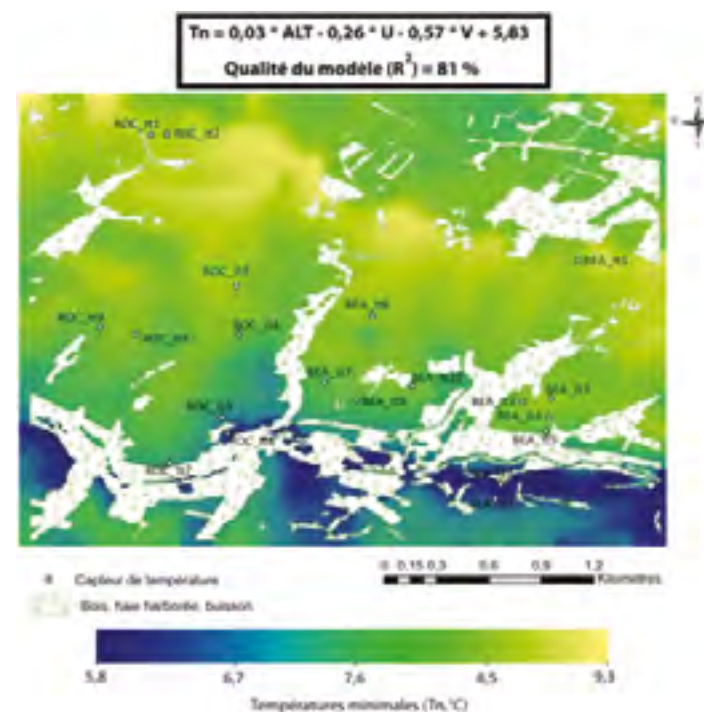


Figure 4: Spatialisation de la température minimale pour le mois d'octobre 2009 (Bonnefoy et al, 2014).

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. 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 CO₂ 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.

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.

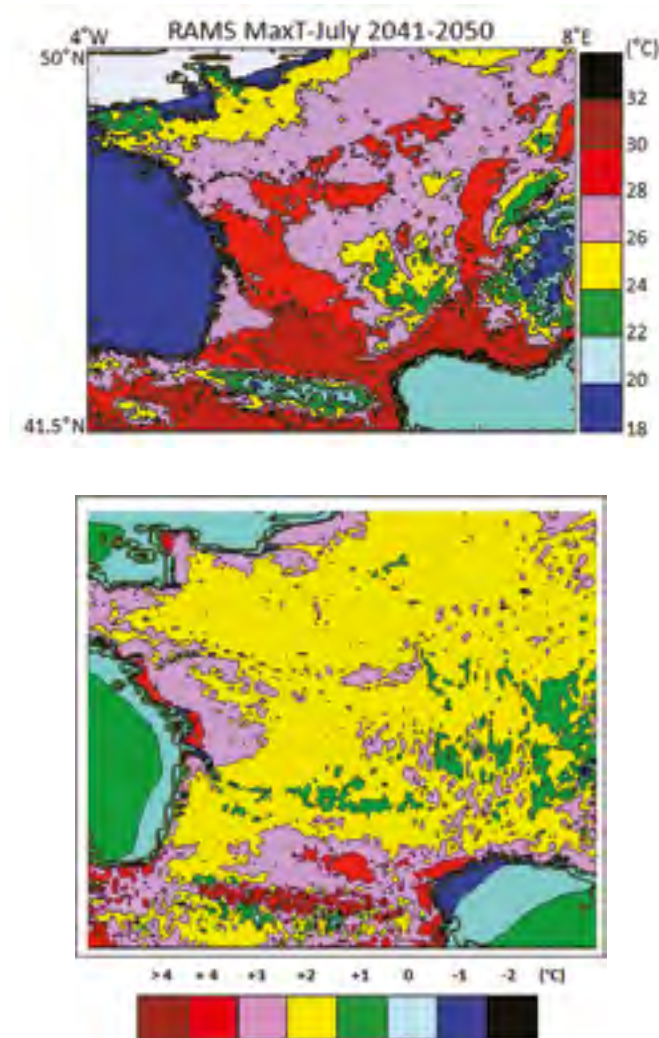


Figure 5 : Température maximale de juillet simulée par RAMS pour la période 2041-2050 sous conditions SRES A2 et pour la grille 2 (a) ; Différence entre 1991-2000 and 2041-2050 (b). (Bonnardot et al, 2012)

Scénarios d'adaptation des vins de terroir au changement climatique à une échelle de temps de 15-30 ans avec l'utilisation d'une plateforme 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 b).

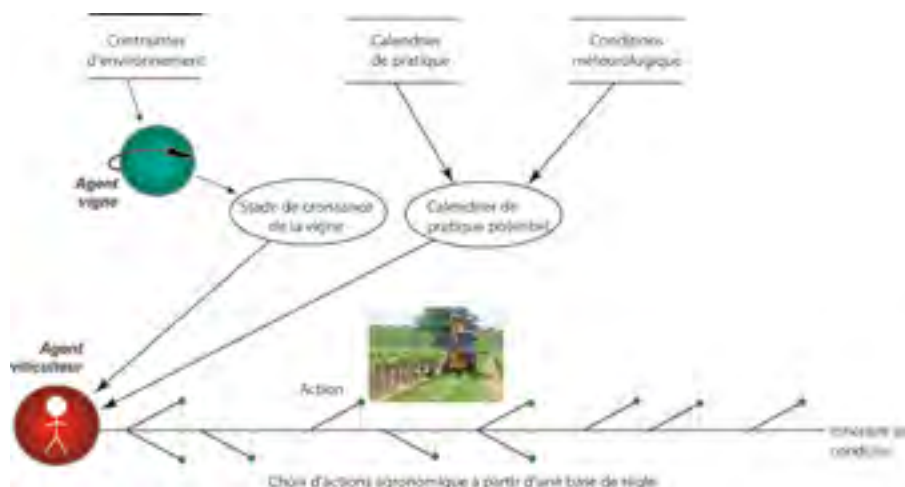


Figure 6 : Eléments de la base de règle (a) et plateforme multi-agents (b) (Tissot et al, 2014)

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 (viguer, 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 significatifs 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 piedmont 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-ADVICLIM¹ qui a débuté en juillet 2014.

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.

¹ aDaptation of Viticulture to CLIMate change : High resolution observations of scenarii for viticulture

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 vigneron 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 terme de transfert, une *business unit* intitulé TerraClima© « études climatiques de haute précision spatiale » a été créée en 2013.

LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

ARTICLES SCIENTIFIQUES

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

Bonnefoy C., Quénot 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., Quénot 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 Quénot 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.

Quénot 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.

OUVRAGE ET CHAPITRES D'OUVRAGES SCIENTIFIQUES

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

Quénot 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.

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 intégration 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 11^e 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., Quénol 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., Ripoché 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.

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

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: 01/10/2010

Montant du budget: subvention de 125 232 €

Responsable scientifique du projet:

Haurie Alain Dr.
Prof. Honoraire Université de Genève
Directeur ORDECSYS, Place de l'Etrier 4,
Chêne-Bougeries, 1224 Suisse, mél: ahaurie@ordecsys.com

Partenaires Scientifiques:

Babonneau Frédéric Dr.
Collaborateur scientifique,
Sté ORDECSYS.

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

Labriet Maryse Dr.
ENERIS Environment Energy Consul-
tants et consultante auprès de la
société KANLO.

Tarel Guillaume Dr.
Collaborateur scientifique,
Sté ORDECSYS.

Lavaud Julien
Conseiller technique sur l'impact du
changement climatique, ARPE, Maison
de l'environnement.

Thénié Julien Dr.
Collaborateur scientifique,
Sté ORDECSYS.

Loulou Richard Dr.
Professeur émérite, Université Mc Gill
Montréal, Sté KANLO.

Vial Jean-Philippe Dr.
Prof. Honoraire Université de Genève,
Directeur ORDECSYS.

MOTS CLÉS

Système énergétique régional, changements climatiques, coûts d'adaptation, poli-
tiques robustes, gestion du risque.

OBJECTIFS DES RECHERCHES

Dans le but d'appuyer les décideurs régionaux à identifier les mesures d'atténua-
tion 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'éner-
gie 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 étaient:

- Identifier les choix technologiques, énergétiques et les investissements appro-
priés 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.
- Explorer l'usage des techniques de modélisations stochastiques et robustes qui
tendent à recommander un portefeuille diversifié de mesures de précaution (*hed-
ging*).

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

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.

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). 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 de 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 bio-carburant. 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 (Figure 1) et d'optimisation robuste dans ETEM-AR.

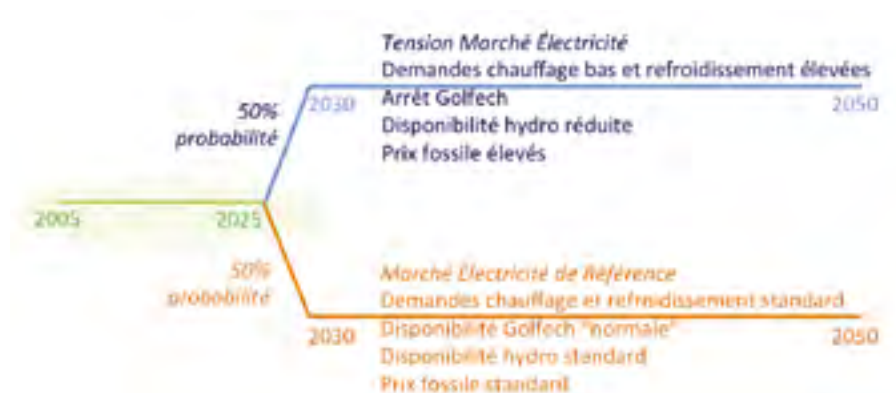


Figure 1 : Exemple de scénarios étudiés en programmation stochastique

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.

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 (Figure 2), 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 et 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.

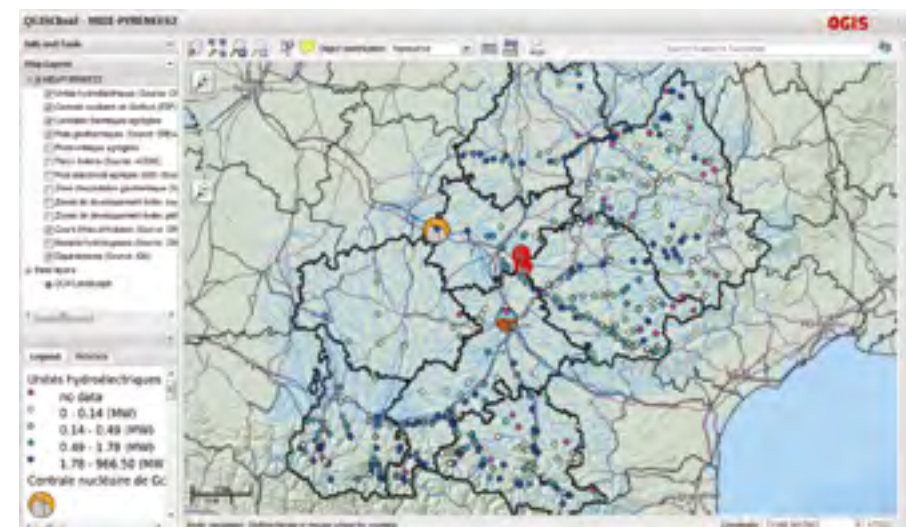


Figure 2 : Guichet cartographique interactif indiquant les différentes unités de production en Midi-Pyrénées.

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. 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

débats 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 de Golfech, 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 linéaire¹. 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). L'incertitude entraîne une baisse attendue d'attractivité des énergies renouvelables et induit indirectement des effets néfastes sur les émissions de CO₂ dans les scénarios sans contrainte sur les émissions. Enfin, les analyses montrent que les surcoûts liés à la robustesse sont très limités et ce, quelque soit le scénario étudié.

CONCLUSIONS – 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 Internet² (Figure 3) a été développé, incluant le mode opératoire complet et les analyses effectuées sur la région Midi-Pyrénées.

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.

² <http://etem-ar.ordecys.com>



Figure 3: Bannière d'accueil du site internet.

APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Un des résultats observé 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. 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 inclut 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» une 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.

LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

ARTICLES SCIENTIFIQUES PUBLIÉS, SOUS PRESSE, SOUMIS ET EN PRÉPARATION

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

Ian Vázquez-Rowea, 2013, Antonino Marvuglia, Julien Thénieb, Alain Haurie, Sameer Regea, Enrico Benetto. Application of three independent consequential LCA approaches to the agricultural sector in Luxembourg, *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 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 *Science Nature et Société*.

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.

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

R²D² 2050
RISQUE, RESSOURCE EN EAU ET GESTION
DURABLE DE LA DURANCE EN 2050

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: 23 décembre 2010
Montant du budget: subvention de 427 908€

Responsable scientifique du projet:

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	Laboratoire d'Etudes des Transferts en Hydrologie Grenoble
EDF, R&D Laboratoire National d'Hydrologie et d'Environnement Chatou	Société du Canal de Provence Le Tholonet
Direction Technique Générale Grenoble	ACTeon antennes de Colmar et de Grenoble
Unité Mixte de Recherche METIS, Université Pierre et Marie Curie Paris	

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-Rhône¹, en se concentrant sur un des affluents majeurs du Rhône et complète l'étude « Explore 2070 » réalisée à l'échelle nationale². 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

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

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 hydro-métriques 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.

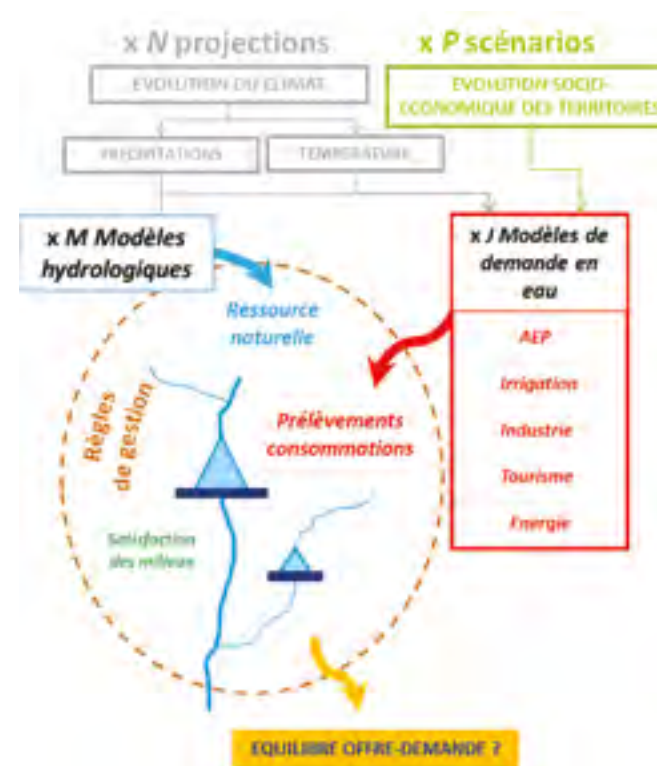


Figure 1 - Différentes composantes de la chaîne de modélisation

Le climat actuel est décrit par deux ré-analyses préexistantes : SPAZM¹ et SAFRAN² et une nouvelle archive « Durance météo », DuO³, 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 Monteith⁴ afin de s'approcher au mieux du référentiel des agronomes.

1 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

2 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

3 Magand C., Ducharme 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 Hydro-meteorology*, doi:10.1175/JHM-D-13-091.1

4 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.



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

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 RIWER2030⁵. 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.

Trois modèles de complexité variée estimant les besoins en irrigation (FIVE CoRE, SiSPAT et MODIC) ont été appliqués sur neuf cultures emblématiques

⁵ 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.

du bassin de la Durance⁶. 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 économétrique⁷ a été développé pour représenter la demande en eau potable (AEP).

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 hydroélectriques⁸, 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'hydro-système 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 socio-économique des secteurs connectés au système Durance-Verdon. Ces scénarios « littéraires » ont fait l'objet d'une quantification^{9, 10}, i.e. un conditionnement

⁶ 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.

⁷ 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.

⁸ 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

⁹ 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.

¹⁰ 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.

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 intermittence¹¹.

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.

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, haut), 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 (appelées *runs*) réalisées par quatre GCMs différents issus du projet européen ENSEMBLES¹². Les méthodes de descente d'échelle considérées intègrent une

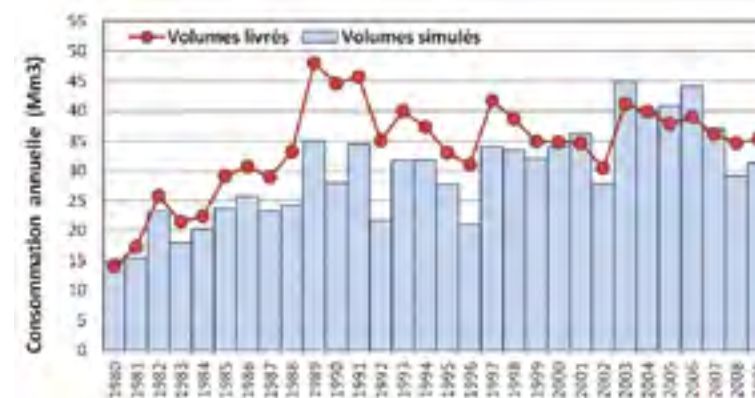
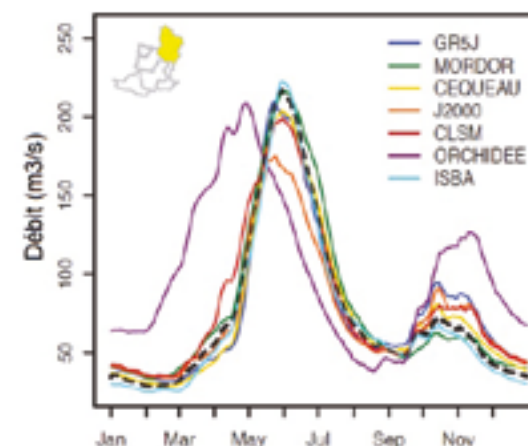


Figure 3 – Résultats de simulation des outils mobilisés dans R2D2 2050, en haut les débits décennaux moyens interannuels observés et simulés pour la Durance à Serre-Ponçon, en bas les consommations annuelles en eau d'irrigation simulées par le modèle FIVE-CoRe et livrées sur le périmètre desservi par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

composante stochastique, chaque run a pu ainsi être décliné en cent réalisations possibles (d'où un total de 3300 projections disponibles). Cependant, la quantité des projections élaborées s'est révélée au-delà des capacités de calcul associées aux différents modèles d'impact. Une méthodologie¹³ 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

¹¹ Cipriani T., Tilmant E., Branger E., 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*, Hanoi, Vietnam (IAHS Publ. 364, 2014), 463-468.

¹² Van der Linden P., Mitchell J.E.B., 2009. ENSEMBLES: Climate Change and its Impacts: Sum-

mary of research and results from the ENSEMBLES project. Met Office Hadley Centre.

¹³ Vidal J.-P., Hingray B., 2013. Sub-sampling ensembles of downscaled climate projections. In: *12th International Meeting on Statistical Climatology, Program & abstract*, Jeju, Corée du Sud, 126-127.

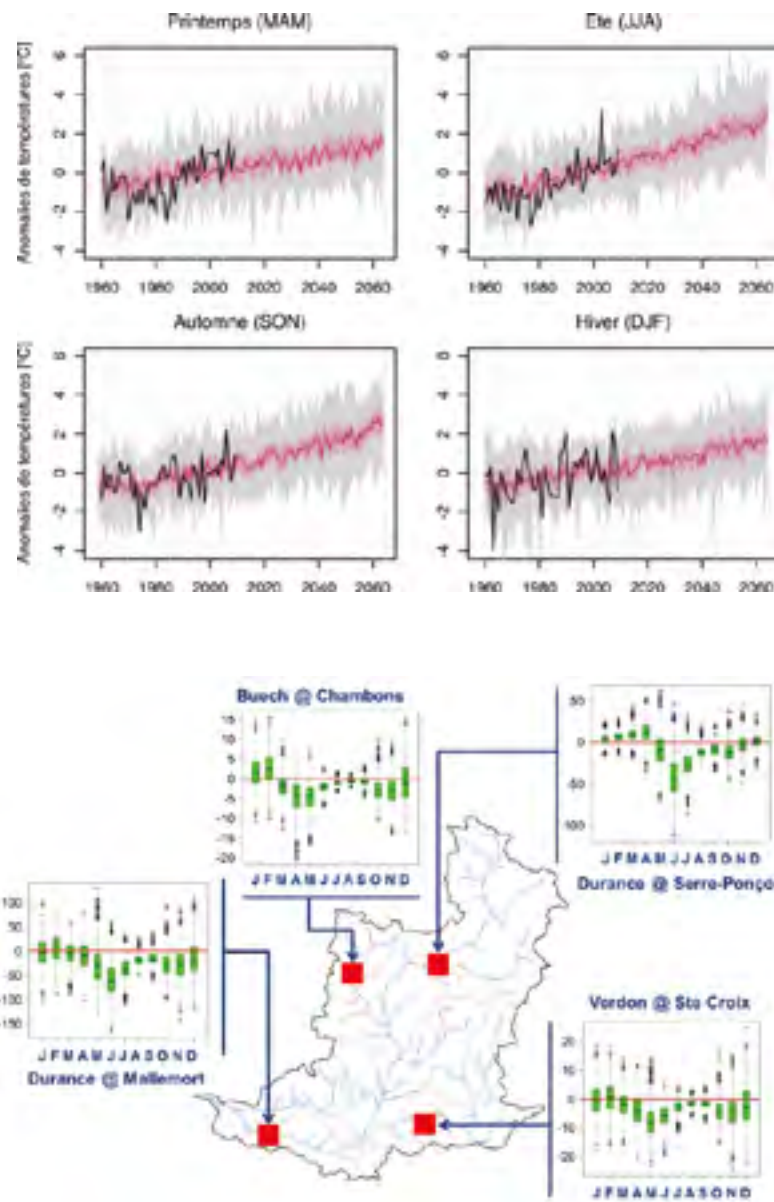


Figure 4 - Evolution des anomalies de températures saisonnières moyennes du bassin de la Durance à sa confluence avec le Rhône (en haut; les anomalies des 330 projections climatiques sont tracées en gris, la médiane est en rose foncé et l'enveloppe rose est l'intervalle entre les premiers et troisièmes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

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. 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, Ecologie, Crise*, voir Figure 5). S'y ajoutent les scénarios *Tendanciel* et « business-as-usual », ce dernier, baptisé



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

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, bas). 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, haut). 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.

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 consom-

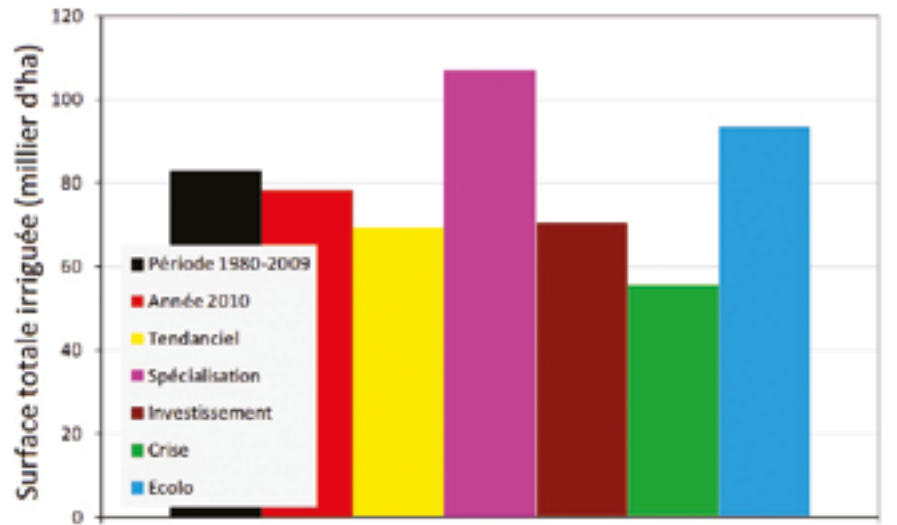


Figure 6 - Evolution de la surface totale irriguée considérée dans MODIC (en bas) et prélèvements par usage avec MODIC, modalité Cycle Fixe (en haut) selon les six scénarios socio-économiques sous les climats temps présent (Pst) et 2050 (Fut) issus de la sélection de dix projections climatiques régionalisées,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

mations 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).

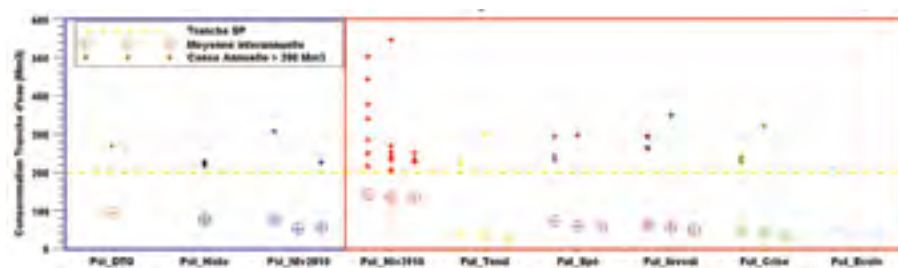


Figure 7 - Consommations annuelles moyennes et supérieures au seuil 200 Mm³ (tranche Serre Ponçon) sur la ressource disponible à Serre-Ponçon (SP), estimée par les outils opérationnels (DTG) et reconstituée par les outils de R2D2 2050 (Histo) et simulée en temps présent (Pst) et à l'horizon 2050 (Fut)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

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 partielle-

ment 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. Cette dernière est fortement incertaine du fait de la variabilité naturelle chaotique du climat¹⁴. 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 forçages¹⁵.

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.

A 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

¹⁴ 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

¹⁵ 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.

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, Tendancier*) 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 devenir 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.

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^{16,17} 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 des 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 Garonne¹⁸, 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,

¹⁶ 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.

¹⁷ 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.

¹⁸ 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.

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 efficacité 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'efficacité 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.

IV. LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

ARTICLES SCIENTIFIQUES

Hendrickx E., 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 E., Vidal J.-P., Chérel J., 2014. Quantifying climate change impact on irrigation 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 E., 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/84942838>

EPIDOM
ÉVALUATION DE LA PRÉVISIBILITÉ
INTERANNUELLE À DÉCENNALE À PARTIR
DES OBSERVATIONS ET DES MODÈLES

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: janvier 2011

Montant du budget: subvention de 489 758,80€ pour un budget total de 551 638€

Responsable scientifique du projet:

Christophe CASSOU

Chargé de recherche CNRS

Cerfacs-CNRS, 42 Avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex 1

Tel: 05 61 19 30 40 / Fax: 05 61 19 30 00;

Courriel: christophe.cassou@cerfacs.fr

Partenaires Scientifiques:

Centre Européen de Recherche
et de Formation Avancée
en Calcul Scientifique (Cerfacs)

Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL)

Centre National
de Recherche Météorologique –
Météo-France (CNRM-MF)

MOTS CLÉS

Prévisibilité décennale: sources, estimation, mécanismes physiques, incertitudes; variabilité climatique basse fréquence; changement climatique; exercice d'inter-comparaison CMIP5, GIEC

OBJECTIFS DES RECHERCHES

Le projet EPIDOM a été mené avec trois objectifs principaux :

- Apporter un soutien à la communauté française de modélisation climatique pour assurer une contribution sérieuse et significative au volet « décennal » de CMIP5 inclus dans le chapitre 11 du 5ème rapport du GIEC.
- Assurer la coordination de la communauté française associée au CEPMMT, pour évaluer la prévisibilité décennale en termes de processus, d'incertitudes et d'applications au travers des simulations CMIP5 et des observations ou de leurs estimations via les ré-analyses.
- Explorer les possibilités, mais aussi difficultés et limites de l'exercice de prévision climatique aux échelles de temps interannuelle à décennale, pour préparer les études d'impacts en aval.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

INTRODUCTION

L'analyse, l'évaluation et la prévisibilité des changements climatiques dits « à court terme », englobant les échelles de temps pluriannuelle à décennale (typiquement 3-30 ans), constituent une des principales nouveautés du 5^{ème} rapport du Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'évolution du Climat (GIEC), publié en 2013-2014. On trouve l'empreinte de ce thème émergent dans tous les grands projets internationaux sous la houlette du Programme Mondial de Recherche sur le Climat (PMRC) ou encore dans les divers appels d'offre de la Commission européenne. Il constitue ainsi un axe important dans la 5^{ème} édition du projet d'intercomparaison de modèles climatiques (CMIP5) qui a fourni un cadre coordonné de simulations pour aborder la problématique.

La question de la prévisibilité/prévision aux échelles de temps courtes, ci-après décennale par simplicité, est légitime : elle est importante pour orienter les décisions et directions à prendre dans un contexte d'adaptation au changement climatique et elle correspond surtout à une échelle de temps tangible pour les décideurs et le citoyen. Il existe de ce fait une très forte pression sociétale pour aborder ces problématiques scientifiques, qui relèvent cependant encore, et insistons sur ce point, du domaine de la recherche fondamentale. Le changement climatique à court terme et l'estimation/compréhension de sa prévisibilité se nichent donc dans les priorités et perspectives de recherche des organismes et agences nationaux, tels l'Institut national des sciences de l'univers (INSU) sous la tutelle du CNRS, l'Agence nationale de la recherche (ANR), les programmes animés par le ministère de l'Écologie, du Développement Durable et de l'Énergie, comme GICC.

Les *projections* climatiques ont été analysées dans les rapports successifs du GIEC, en particulier aux horizons 2070-2100. Rappelons que ces dernières ont pour seul but de fournir une estimation de la réponse du système climatique aux forçages anthropiques selon différents scénarios d'émissions de gaz à effet de serre (GES), aérosols etc. ; elles correspondent à autant de scénarios d'évolution socio-économiques, techniques et démographiques. Les *prévisions* climatiques consistent en revanche à deviner au mieux la trajectoire exacte du système climatique pour une échéance donnée. En plus de la réponse du système aux forçages externes (anthropiques + naturels - activité solaire et volcanisme) telle qu'estimée par les projections, elles prennent en compte l'empreinte spatio-temporelle de la variabilité interne¹ du système climatique. Le poids respectif des deux contributions varie

en fonction de l'échéance temporelle de la prévision mais aussi de l'échelle spatiale d'intérêt. Pour le court terme, de l'interannuel au décennal, la contribution interne est forte voire dominante pour de nombreuses régions. Dans certains cas, son impact est tel qu'elle peut aller jusqu'à moduler la température globale de la planète et peut être invoquée pour expliquer la pause dans le réchauffement global de la température de surface des années 2000-2010. Cette modulation repose sur l'excitation de modes de variabilité de grande échelle, dont la prévision permet de diminuer les incertitudes sur les changements climatiques à courtes échéances.

La prévision décennale (2010-2030) du système climatique repose ainsi sur trois sources de prévisibilité potentielle à cette échelle de temps :

- l'ajustement à l'augmentation (simultanée + passé proche) de la concentration des GES,
- la réponse aux forçages externes d'origine naturelle, qui englobent le cycle à 11 ans du forçage solaire et les éruptions volcaniques majeures qui peuvent intervenir à chaque instant,
- l'évolution (excitation et amortissement) des modes de variabilité interne qui sont principalement pilotés à ces échelles de temps par l'océan, et qui sont caractérisés par des impacts de grande échelle via les téléconnexions atmosphériques. On trouve principalement l'Oscillation Atlantique Multidécennale (AMO) et l'Oscillation Pacifique Interdécennale (IPO). La première contrôle par exemple une part importante des fluctuations basse fréquence de la mousson sahélienne et de l'activité cyclonique dans l'Atlantique. La seconde a un impact fort sur la pluviométrie sur tout le continent Nord-Américain, entre autres.

La prévision décennale est donc un problème à la fois de conditions aux limites (forçages externes) et de conditions initiales (variabilité interne) comblant un vide entre l'échelle saisonnière pour laquelle les prévisions se font de manière maintenant opérationnelle dans les principaux centres climatiques et les projections climatiques pour lesquelles la 3^{ème} source de prévisibilité est perdue.

Le projet EPIDOM s'inscrit dans ce contexte et s'organise autour trois piliers :

- **le soutien** à la communauté française pour assurer une contribution sérieuse et significative au volet décennal de CMIP5.
- **La coordination** des laboratoires de modélisation français pour évaluer la prévisibilité décennale en termes de processus, d'incertitudes et d'applications au

¹ Fluctuations intrinsèques générées, sans action extérieure, par les échanges d'énergie et de masse entre les sous compartiments du système climatique (atmosphère, océan etc.) aux propriétés physiques, dynamiques et chimiques très différentes.

travers de CMIP5 et des observations ou de leurs estimations via les ré-analyses. EPIDOM s'intègre dans une tradition de coopération des acteurs français de modélisation climatique (projet MISSTERRE par exemple).

• **L'exploration :** EPIDOM se veut être une étape exploratoire, un véritable pré-requis pour préparer les études d'impacts au sens usuel du terme (régionalisation, extrême etc.). L'échelle décennale semble concentrer toutes les limitations des études climatiques, à savoir : la couverture observationnelle limitée dans le temps et dans l'espace qui rend l'estimation des fluctuations décennales et la validation même de leur prévision difficile, l'interaction entre les biais/dérives des modèles et la variabilité/prévisibilité à ces échelles de temps, la coexistence de différentes sources (interne, naturelle, anthropique) de variabilité/prévisibilité qui interagissent, etc.

En résumé, EPIDOM s'inscrit donc naturellement dans le panorama français de suivi des effets du réchauffement climatique, de ses impacts et de l'adaptation dont la maîtrise d'ouvrage interministérielle est confiée au Ministère de l'Ecologie du Développement Durable et de l'Energie. Il vise à établir les bases scientifiques et méthodologiques qui sont indispensables à toutes les applications aval multidisciplinaires et essentielles dans un contexte d'adaptation au changement climatique.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

La prise en compte de la variabilité interne dans les prévisions climatiques pour une date de prévision donnée, repose sur l'injection dans les modèles océaniques d'informations sur la structure tridimensionnelle la plus proche des observations, ou de leurs estimations via les ré-analyses océaniques pour construire l'état initial des variables climatiques à prévoir qui soit le plus proche possible de la réalité.

Cette étape dite d'initialisation est complexe dans la mesure où :

- les observations de l'océan en dessous de 50m (qui contiennent l'essentiel de la mémoire de l'océan) sont rares et leur couverture spatiale et temporelle peu homogène avant la fin des années 1970 (date de lancement des premiers satellites), et avant l'émergence des flotteurs ARGO au début des années 2000.
- Les méthodes d'initialisation ne sont pas universelles et nécessitent encore des améliorations.
- les modèles couplés océan/atmosphère ont des erreurs qui les « éloignent » des observations. Ceci rend difficile l'extraction même du signal de prévision et ac-

croît son incertitude d'autant plus que la dérive des modèles vers leur attracteur (état moyen qui leur est propre) peut être dépendante des conditions initiales océaniques et du forçage radiatif dû aux GES qui se superpose.

La maturité des systèmes d'intégration d'observations océaniques dans les modèles (on parle d'assimilation), la qualité de la reconstruction des variables de forçage océaniques depuis 1960 via les ré-analyses atmosphériques et/ou autres jeux de données, et bien sûr l'amélioration des modèles climatiques, sont telles qu'aujourd'hui, étudier la prévisibilité décennale est cependant envisageable. Dans le cadre de CMIP5 et donc d'EPIDOM, des prévisions rétrospectives ont été conduites sur la période 1960-2005. D'une durée de dix ans, elles ont été initialisées aux années 0 et 5 de chaque décennie (1960, 1965, 1970, ..., 2000, 2005, expérience dite « CORE »). La prévision décennale est basée sur une approche dite ensembliste, qui consiste à jouer plusieurs fois (N fois) la même prévision en perturbant très légèrement son état initial. On génère ainsi un ensemble de N prévisions ou N membres pour une échéance donnée et cette technique permet de prendre en compte la nature chaotique du système climatique sensible par définition aux conditions initiales. En parallèle, des études de prévisibilité mais aussi de mécanismes de variabilité décennale ont été menées en configuration dite de « modèle parfait », telle décrite ci-après.

RÉSULTATS

Complétude de l'exercice décennal CMIP5

La réalisation des prévisions rétrospectives du CORE, qui étaient requises comme ticket d'entrée pour le volet décennal de CMIP5, ainsi que la mise à disposition des sorties de modèles sur les serveurs internationaux au format adopté par la communauté internationale, ont mobilisé une grande partie des forces en présence dans les laboratoires de l'IPSL et du Cerfacs. Le soutien du GICC via EPIDOM fut essentiel pour mener à bien cette tâche.

Réflexions et analyses sur les stratégies d'initialisation océanique des prévisions ont tout d'abord été menées. Après une série de tests, le groupe CNRM-Cerfacs a opté pour une initialisation tridimensionnelle de la température et de la salinité océanique (champs bruts) alors que l'IPSL a choisi une initialisation par anomalies et uniquement de la surface. L'accent a été mis sur la compréhension physique des dérives des modèles et sur l'adaptation des méthodes pour les minimiser et mieux en tenir compte par des techniques de débiaisage novatrices.

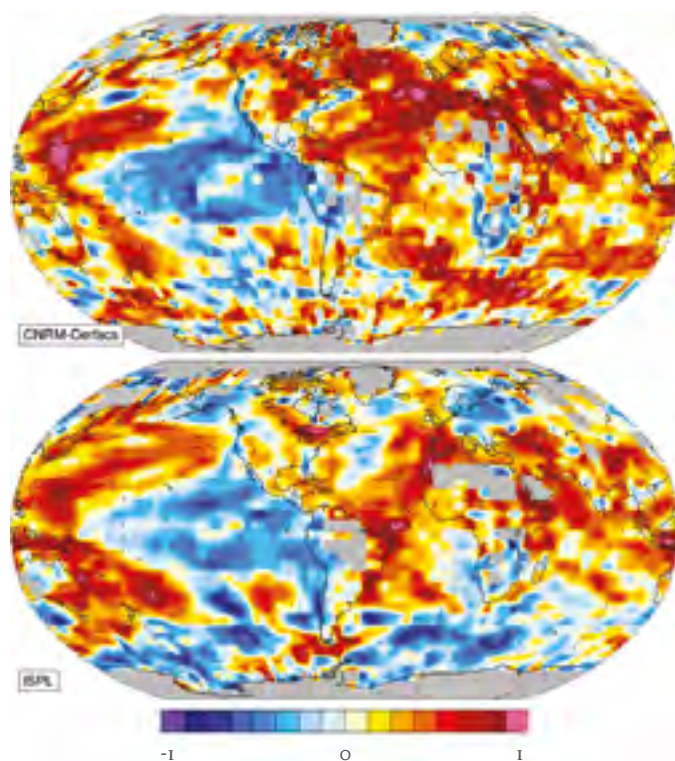


Figure 1 : Score de corrélation de la température à 2 mètres aux échéances 2-5 ans pour les prévisions décennales du CNRM-Cerfacs (en haut) et de l'IPSL (en bas) après avoir soustrait les tendances locales par régression linéaire sur la concentration du CO₂ à la fois dans le modèle et dans le jeu d'observation HadCRU3v. 1 signifie que la prévision est parfaite, -1 qu'elle correspond à l'inverse de la réalité, et 0 que la prévisibilité est inexistante. Les valeurs significatives de corrélation au seuil 95% selon un r-test sont représentées par un point et les régions où les observations sont insuffisantes pour le calcul sont grisées.

Les premiers résultats multi-modèles détaillés au workshop d'Aspen de 2011² montrent que la plupart des modèles ont des comportements très semblables en terme de prévisibilité et ce quelle que soit leur technique d'initialisation. Ils révèlent aussi clairement les limites de l'exercice CORE de CMIP5 pour estimer correctement les biais systématiques des modèles et de fait, la prévisibilité du système climatique aux échelles décennales. Un très grand nombre de dates de prévisions rétrospectives et un grand nombre de membres pour chaque date seraient en fait nécessaires. De nouvelles recommandations ont été fournies à la communauté internationale dans ce sens (initialisation tous les ans au lieu de tous les 5 ans) mais ni le Cerfacs, ni l'IPSL n'ont pu satisfaire cette nouvelle demande considérant les ressources informatiques en calcul et en stockage mais aussi les moyens humains disponibles pour CMIP5_Decennal/EPIDOM.

Etude de la prévisibilité aux échelles décennales et mise en évidence des mécanismes associés

Dans EPIDOM, la prévisibilité a tout d'abord été étudiée dans un cadre simplifié dit de « modèle parfait » qui consiste à considérer une simulation du modèle comme l'observation à prévoir ou à reproduire. Ce cadre « modèle parfait », adopté par le Cerfacs et l'IPSL, permet d'extraire plus facilement les mécanismes de variabilité décennale qui sous-tendent la prévisibilité, et de quantifier la prévisibilité en tant que propriété intrinsèque du système climatique, en l'absence de toute « erreur modèle » et de toute erreur sur les conditions initiales ; on parle de prévisibilité potentielle. Les analyses produites et rassemblées dans plusieurs publications labellisées EPIDOM mettent en évidence le rôle de la dynamique océanique dans la prévisibilité des modes de variabilité décennale et leurs téléconnexions continentales. L'action du sel, en plus de la température, semble primordiale en particulier dans le gyre subpolaire Atlantique qui semble concentrer une grande part de la mémoire décennale du système climatique. Les processus thermohalins se retrouvent ainsi dans les deux modèles du consortium EPIDOM dans l'Atlantique, même si ces derniers n'ont ni les mêmes caractéristiques spatio-temporelles ni la même origine. Dans le modèle IPSL-CM5, la variabilité décennale est largement dominée par un mode couplé océan-atmosphère de forte puissance spectrale autour de 20 ans. Ce mode thermohalin implique le gyre subpolaire et ses temps caractéristiques d'advection océanique, ainsi que l'atmosphère et les fluctuations de banquise dans les mers du Groenland/Irminger/Norvège. Ce mode interne du modèle est fortement prévisible et est particulièrement sensible aux éruptions volcaniques qui, de par leur action indirecte sur la circulation atmosphérique, contrôlèrent une grande partie de son phasage temporel. Des ressemblances avec le monde réel sont proposées pour expliquer, à partir de ce mode dominant dans IPSL-CM5, les fluctuations de gyre et de circulation

² http://www.agci.org/programs/past_scientist_workshops/sciSess_results.php

thermohaline observées depuis les années 60 en relation avec les trois éruptions majeures de l'Agung, d'El Chichon et du Pinatubo. Dans le modèle CNRM-CM5, ce mode advectif de gyre existe mais est peu marqué. Il est dominé par un mode multidéennal de plus basse fréquence dont l'excitation correspond à l'intégration temporelle d'un forçage atmosphérique de type « bruit blanc » qui englobe à la fois l'Oscillation Nord Atlantique (NAO) et le mode dit « Est Atlantique ». Les processus physiques mis en jeu sont multiples et complexes et conduisent à un mode non oscillant, ou en d'autres termes, à des événements climatiques d'une durée d'environ 50-60 ans qui affectent tout l'Atlantique et ses continents adjacents. La prévisibilité associée à ces événements est conditionnelle et est majoritairement expliquée par l'état halin de l'ensemble du bassin Atlantique.

L'analyse des prévisions rétrospectives produites par le consortium EPIDOM a été menée en parallèle, de même que l'extraction et la caractérisation dans les observations ou leurs estimations via les ré-analyses des signatures de la variabilité décennale. Les conclusions principales sont valables pour les deux systèmes de prévisions du consortium EPIDOM en dépit de différences fondamentales dans les choix d'initialisation telles qu'évoquées ci-dessus, mais aussi pour la plupart des modèles qui ont participé à CMIP5 :

- Une grande part de la prévisibilité aux échéances 1-10 ans est expliquée par les forçages externes, aux échelles spatiales aussi bien globale que régionale. L'initialisation océanique constitue une valeur ajoutée pour l'Océan Atlantique Nord alors qu'elle n'apporte rien voire dégrade les prévisions sur le Pacifique au-delà de 2-3 ans d'échéance (Figure 1). Ainsi, l'AMO semble bien prévisible dans la plupart des modèles de CMIP5 alors que l'IPO ne l'est pas. Il est nécessaire, en vue du prochain exercice CMIP6, d'aller plus loin et de comprendre physiquement la bonne (l'absence de) prévisibilité sur l'Atlantique (le Pacifique) par le design d'expériences de sensibilité bien ciblées.
- La prévisibilité, en dehors de celle liée aux forçages externes, est très faible sur les continents. Ce constat s'applique également sur les terres adjacentes à l'Océan Atlantique Nord alors que l'océan lui-même est prévisible (cf. ci-dessus) et que les relations océan-continent (Sahel, cycle hydrologique en Europe de l'Ouest, etc.) sont significatives dans les observations. La sous-estimation des connexions océan-continent doit être abordée de manière systématique dans CMIP6 afin de comprendre son origine (niveau trop fort de la variabilité interne des surfaces continentales liée à une modélisation des processus de sol tels l'humidité, l'évapotranspiration défaillante, biais dans les précipitations, etc.).
- Les questions de débiaisage sont essentielles, ainsi que la compréhension des dérives et biais qui se mettent progressivement en place dans les modèles. Abor-

der ces problématiques aval aux prévisions en tant que telles, est une étape nécessaire qui est souvent négligée par nos communautés, qui est peu visible dans les priorités de recherche établies/projets soutenus par les organismes financeurs, et qui est difficile à valoriser notamment en terme de publications. Les simulations de prévisions décennales produites pour CMIP5 sont des formidables bases de données pour attaquer toutes ces problématiques afin, à terme, de se débarrasser des erreurs qui se retrouvent assez systématiquement dans les modèles et que les modélisateurs cherchent à corriger depuis de nombreuses années.

L'analyse des prévisions rétrospectives montre également que le besoin d'observations de qualité et couvrant une longue période est manifeste. De grands espoirs portent sur les ré-analyses couplées depuis le début du vingtième siècle afin de mieux comprendre la variabilité décennale qui a une empreinte, au-delà des moyennes, sur la statistique et les propriétés physiques de la variabilité haute fréquence (régimes de temps journaliers, extrêmes, etc.). Les initiatives de *data-rescue* (sauvegarde de données passées archivées) sont également essentielles dans ce contexte. En termes de modélisation, les résultats de CMIP5 montrent qu'il est indispensable de réduire les incertitudes sur l'estimation de la réponse du système aux forçages externes et son corollaire, sur le niveau et la nature physique de la variabilité interne. Les études de détection/attribution suggèrent que cette dernière serait sous-estimée expliquant ainsi, en partie, la piètre performance des simulations CMIP5 pour prévoir le ralentissement du réchauffement des années 2000 dont l'origine principale est attribuée au changement de phase de la IPO. Au-delà de cet aspect physique, l'extraction même de la variabilité interne est entachée d'erreurs de par le faible nombre de membres des ensembles produits à la fois pour les prévisions et projections. Il semble essentiel dans ce contexte d'encourager la production d'un très grand nombre de membres suivant l'approche ensembliste [à ressources informatiques contraintes, ce conseil devrait être « en pole position » dans la liste des recommandations pour CMIP6], et en l'état actuel, d'utiliser leur plus grand nombre pour les études de régionalisation et d'impacts.

CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Le projet EPIDOM s'est parfaitement construit sur les trois piliers sur lesquels il reposait.

- Son soutien au lancement (IPSL) et au renforcement (Cerfacs) de la thématique « prévisibilité décennale » a été essentiel. Même avec ce soutien précieux, il est important de souligner que la réalisation des simulations CMIP5 a été très éprouvante techniquement et humainement, et ce pour les deux laboratoires. Ceux-ci étaient clairement sous dimensionnés pour ce genre d'exercice nouveau pour notre communauté. Il est clair que la contribution française à CMIP5 « volet

décennal », a reposé sur la bonne volonté et la conscience professionnelle de quelques personnes assurant à la fois la science et la technique. Des enseignements devront être tirés pour l'éventuelle prochaine participation au futur exercice CMIP6.

- L'espace de *coordination* qu'a procuré EPIDOM entre les acteurs français de la modélisation climatique fut un lieu d'échanges, de dialogues et de construction d'une très grande richesse. Même si des prémices de collaborations existaient, celles-ci se sont considérablement renforcées. Les échanges entre les partenaires d'EPIDOM permettent aujourd'hui à la communauté française d'aller « unie » et « sur la même longueur d'onde » dans les discussions liées à CMIP6 au sein des panels internationaux tels que le Decadal Climate Prediction Project (DCPP/WCRP). EPIDOM fut également un chapeau précieux pour assurer une meilleure visibilité des laboratoires autant au niveau international que national (projet LEFE-MISSTERRE par exemple).
- Enfin, la nature *exploratoire* des analyses conduites dans le cadre d'EPIDOM s'est avérée extrêmement utile pour mieux comprendre la nature physique de la variabilité décennale mais aussi pour extraire et hiérarchiser les problématiques à aborder dans le futur. EPIDOM a permis d'acquérir une expertise considérable à la fois sur les volets physique et statistique liés aux concepts mêmes de la prévisibilité. Certaines idées issues du consortium EPIDOM et certaines approches fondamentales sont d'ailleurs en train de percoler à l'échelle internationale, marque d'un certain succès du brainstorming issu du projet EPIDOM.

Une autre preuve de la réussite d'EPIDOM repose sur le fait que la thématique décennale se poursuive et continue à se développer aujourd'hui, aussi bien à l'IPSL qu'au Cerfacs, via deux nouveaux projets complémentaires. L'un international : SPECS (FP7-EU) qui permet d'une part de poursuivre l'amélioration de l'initialisation des modèles couplés et des techniques de génération d'ensemble, et d'autre part de mieux évaluer les performances des systèmes de prévision, la valeur ajoutée liée à l'augmentation de la résolution avec une volonté nourrie de compréhension des mécanismes de prévisibilité. L'autre national : MORDICUS (ANR) qui vise, par des expériences numériques ciblées et des approches fondamentales, à mieux caractériser les mécanismes physiques des modes de variabilité décennale de type Variabilité Atlantique Multidécennale (AMV), Variabilité Pacifique Interdécennale (IPV). MORDICUS a été construit sur les leçons tirées d'EPIDOM qui a joué le rôle de catalyseur et qui de fait rassemble les mêmes partenaires mais avec une implication respective encore plus étendue de la part des laboratoires. Il était important que l'ANR prenne le relais du GICC.

APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERME DE TRANSFERT

TRANSFERT VERS LA COMMUNAUTÉ SCIENTIFIQUE

Deux ateliers internationaux dédiés à la communauté scientifique ont été organisés sous la bannière EPIDOM. Le premier en mai 2012, à Capbreton (France), a regroupé l'University of Toronto (Canada), l'Institut Català de Ciències del Clima (IC3-Espagne) et les laboratoires anglais impliqués dans les activités de prévision, prévisibilité et variabilité décennale, à savoir le UK Met Office, l'Université de Reading et le Centre Européen de Prévision Météorologique à Moyen Terme (CEPMMT-ECMWF). La réunion « mi-parcours » d'EPIDOM fut combinée avec ce workshop qui a rassemblé 42 participants.

Le 2ème workshop d'amplitude beaucoup plus grande (137 participants) a été organisé à Toulouse en mai 2013 sous la bannière du WCRP (World Climate Research Program) et de ses groupes de travail (WGSIP – Working Group on Seasonal-to-Interannual Prediction, WGCM – Working Group on Climate Modelling et DCPP – Decadal Climate Prediction Panel). Ce workshop fut un rendez-vous majeur pour la communauté internationale alors que les chapitres du 5ème rapport du GIEC étaient en phase finale de rédaction et que les résultats d'intercomparaison regroupant un grand nombre de modèles étaient disponibles. Ce workshop fut l'occasion de dresser bilans et enseignements des activités de prévision et prévisibilité décennale dans le cadre de CMIP5, résumés dans la Section 4 du rapport (Cassou C., Doblas-Reyes F., 2013³).

L'organisation de ces deux workshops a concrètement montré l'insertion et l'implication forte au niveau international de la communauté EPIDOM dans les activités de prévision climatique aux échelles décennales, ainsi que sa reconnaissance. Ces deux workshops ont également permis d'insister sur une des conclusions fortes d'EPIDOM : l'indispensable compréhension des mécanismes de variabilité et éventuellement de prévisibilité, avant de se lancer dans de coûteux exercices de prévision ad-hoc. Ce message est à la base du projet ANR MORDICUS, et en voie d'être pris en compte pour le prochain exercice d'intercomparaison de modèles couplés CMIP6, sous la bannière du DCPP.

Cependant, un des enseignements d'EPIDOM est clairement la mise en lumière du sous-dimensionnement des moyens de soutien humain et technique mis à

3 http://www.meteo.fr/cic/meetings/2013/s2d/report_workshop_Toulouse_May2013.pdf

la disposition des chercheurs depuis quelques années. Ce message d'alerte doit clairement être diffusé auprès de programmes tels GICC ou l'ANR, mais aussi les centres de calculs (GENCI) si la problématique « décennale » reste considérée comme prioritaire pour la recherche future.

TRANSFERT VERS LE PUBLIC

Une brochure intitulée « Climat: modéliser pour comprendre et anticiper » et destinée à un public large, a été rédigée sous la bannière LEFE-MISSTERRE. Deux des trois « rédacteurs en chef » (C. Cassou et D. Swingedouw) appartenaient au consortium EPIDOM. Tirée à 5000 exemplaires, cette plaquette est parue en septembre 2013 en même temps que la publication du 1^{er} volet du 5^{ème} rapport du GIEC et a servi, à cette occasion, de support de communication à l'échelle nationale. La problématique de variabilité décennale et les concepts de prévisibilité ont été abordés en détail dans cette brochure. Pour essayer de pallier au déficit de compréhension sur la prévision décennale en tant que telle, et en particulier sur les méthodes et les incertitudes associées, un article un peu plus technique mais toujours de vulgarisation et à visée grand public, a été également publié dans *La Météorologie* (Cassou et Mignot 2013).

En termes de visibilité, EPIDOM est apparu dans diverses interventions orales au cours de réunions et manifestations diverses. Des présentations dans le cadre du projet ont été données par le coordinateur et à plusieurs reprises devant le groupe de travail 5 de l'alliance ALLEVI ou encore à l'observatoire des sciences de l'univers (OSU) de Grenoble lors de journées thématiques climat/hydrologie/biodiversité intitulées: « Possibilité et besoin pour la prévision régionale », et à d'autres colloques. EPIDOM fut également présent dans les deux conférences de presse inter-organismes organisées en février 2012 et septembre 2013 à Paris pour marquer les différents rendez-vous de CMIP5/AR5, à savoir respectivement la mise à disposition des résultats des simulations CMIP5 et l'approbation du volet 1 de l'AR5. De manière plus événementielle, EPIDOM fut cité lors de manifestations grand public comme, entre autres, la soirée du 16 mai 2013 organisée à Météo-France et intitulée « la prévision dans tous ses états ». Chacune de ces interventions a été l'occasion de présenter la problématique de la prévision décennale, l'espoir qu'elle suscite et ce que l'on peut en attendre au vu des premiers résultats.

TRANSFERT VERS LES DÉCIDEURS

Il était prévu dans le cadre d'EPIDOM d'organiser un séminaire de restitution et d'échanges destiné à un public large afin de mieux cerner les besoins et demandes des potentiels usagers des résultats issus des modèles de prévision

décennale et d'évaluer l'adéquation de ces attentes avec l'état de l'art en matière de prévision décennale. L'organisation d'un tel séminaire a eu lieu le 3 décembre 2014 sous la houlette du MEDDE.

LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

ARTICLES SCIENTIFIQUES

EPIDOM a généré 15 articles de rang A dont:

Escudier R., Mignot J. and Swingedouw D. (2013), A 20-yr coupled ocean-sea ice-atmosphere variability mode in the North Atlantic in an AOGCM. *Climate Dynamics*. 40, 619-636, DOI: 10.1007/s00382-012-1402-4

Germe A., Chevallier M., Salas D. y Melia, Sanchez-Gomez E. and Cassou C. (2014), Interannual predictability of Arctic sea ice in a global climate model: regional contrast and temporal evolution. *Climate Dynamics*, DOI:10.1007/s00382-014-2071-2

Meehl, G. A., Goddard L., Boer G., Burgman R., Branstator G., Cassou C., Corti S., Danabasoglu G., Doblas-Reyes F., Hawkins E., Karspeck A., Kimoto M., Kumar A., Matei D., Mignot J., Msadek R., Navarra A., Pohlmann H., Rienecker M., Rosati T., Schneider E., Smith D., Sutton R., Teng H., van Oldenborgh G. J., Vecchi G., Yeager S. (2013), Decadal climate prediction: An update from the trenches. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* DOI:10.1175/BAMS-D-12-00241.1

Persechini A., Mignot J., Swingedouw D., Labetoulle S. and Guilyardi E. (2013): Decadal predictability of the Atlantic Meridional Overturning Circulation and Climate in the IPSLCM5A-LR model. *Climate Dynamics*. 40, 2359-2380. DOI: 10.1007/s00382-012-1466-1

Ruprich-Robert Y. and C. Cassou (2014), Combined influences of seasonal East Atlantic Pattern and North Atlantic Oscillation to excite Atlantic multidecadal variability in a climate model. *Climate Dynamics*, DOI 10.1007/s00382-014-2176-7.

PARTICIPATIONS AUX COLLOQUES NATIONAUX OU INTERNATIONAUX

15 posters ont été présentés sous le label et 21 communications orales EPIDOM ont été données, dont :

Cassou. C, Sanchez-Gomez E., Fernandez E., Terray L. (2011), CMIP5 decadal experiments at CERFACS: Initialisation and preliminary results. *Aspen Global Change Institute workshop "Making sense of the multi-model decadal prediction experiments from CMIP5."*, Aspen (USA), June 2011

Sanchez-Gomez E., Cassou C. and Fernandez E. (2013), Analysis of model drift in a climate forecast system used for decadal predictions. International workshop on seasonal to decadal prediction, Toulouse (France), mai 2013

Ruprich-Robert Y. and Cassou C. (2013), Importance of the seasonality of the ocean-atmosphere relationship to produce multidecadal natural AMV/AMOC variability, US AMOC/UK RAPID 2013 International Science Meeting: 'AMOC Variability: Dynamics and Impacts', Baltimore (USA), July 2013.

Mignot J., Swingedouw D., Labetoulle S., Guiyardi E., Persechino A., Servonnat J. (2011), Decadal predictions at IPSL. *Aspen Global Change Institute workshop "Making sense of the multi-model decadal prediction experiments from CMIP5."*, Aspen (USA), June 2011.

Mignot J. (2013), Decadal prediction system with the IPSL-CM5A model: impact of horizontal atmospheric resolution on the reconstruction of initial conditions. *DACA Davos* (Switzerland), July 2013

Swingedouw D (2013), Influence of volcanic eruptions on the bi-decadal variability in the North Atlantic. International workshop on seasonal to decadal prediction, Toulouse (France), mai 2013

ARTICLES DE VULGARISATION

Plusieurs articles avec différents degrés de vulgarisation ont été écrits dont :

Cassou C. et Mignot J. (2013), Enjeux, méthodes et fondamentaux de prévisibilité et prévision décennale. *La Météorologie*, 81, 23-31, DOI: 10.4267/2042/51099

Collectif MISSTERRE (2013), "Climat: modéliser pour comprendre et anticiper", sous la direction éditoriale de C. Cassou, D. Swingedouw et A. Voldoire, 44 pages.

« Climat: établir des scénarios à 10 ou 20 ans: Le nouveau défi des chercheurs » dans *Hors-Séries du Monde* (2010) « Bilan Planète: les temps forts et les acteurs de l'année », Mo1545-1003H, p39.

« Prévoir le temps qu'il fera dans 10 ans n'est plus un rêve » dans *Sciences et Vie* (2012), 1141,86-95.

AUTRES

« Météo et climat, ce n'est pas la même chose! », C. Cassou, *Eds. Le Pommier*, Collection: Les Minipommes, ISSN: 170-7943, 58 pages.

C3E2
CONSÉQUENCES DU CHANGEMENT CLIMATIQUE
SUR L'ECOGÉOMORPHOLOGIE DES ESTUAIRES

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: 20 avril 2011

Montant du budget: subvention de 287 372 € pour un budget total de 469 619 €

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

Responsable scientifique du projet:

LE HIR Pierre

Ifremer, laboratoire DYNECO/PHYSED

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

Mail: plehir@ifremer.fr

Partenaires Scientifiques:

WALTHER Régis

ARTELIA Eau & Environnement

PRUD'HOMME LACROIX Bernard

GIP Loire Estuaire

BIORET Frédéric

UBO/Institut de Géoarchitecture

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.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

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 : manifestations du changement climatique
- en brun clair : contributions des actions anthropiques
- en blanc : conséquences sur les processus morphosédimentaires
- en jaune : 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-projets.

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 trois 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 2 b), 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 2 d), 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).

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.

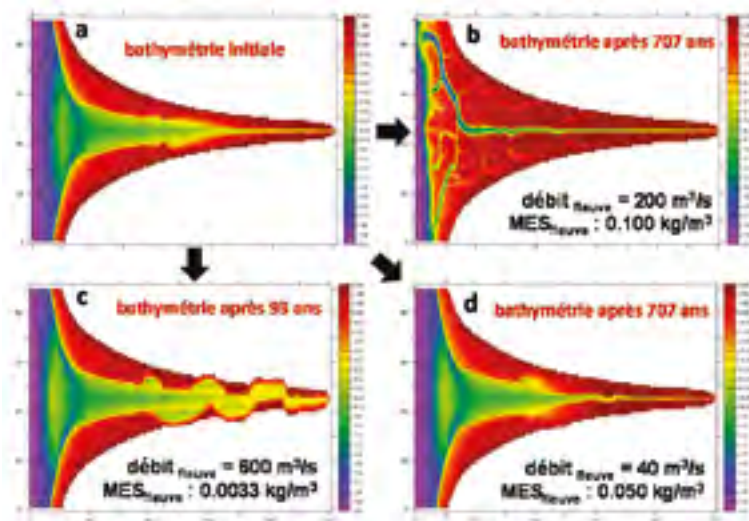


Figure 2 - Evolution morphologique d'un estuaire initialement long de 50 km. Amplitude moyenne des marées: 2m (marnage de 4 m). MES (Matières En Suspension)

- a) condition initiale commune
- b) débit de $200 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, MES amont de $0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- c) débit de $600 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, MES amont de $0.0033 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- d) débit de $40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$, MES amont de $0.05 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

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 hydraulique supérieure dans l'estuaire, due à une augmentation des volumes oscillants. Cette hydraulique 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.

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.

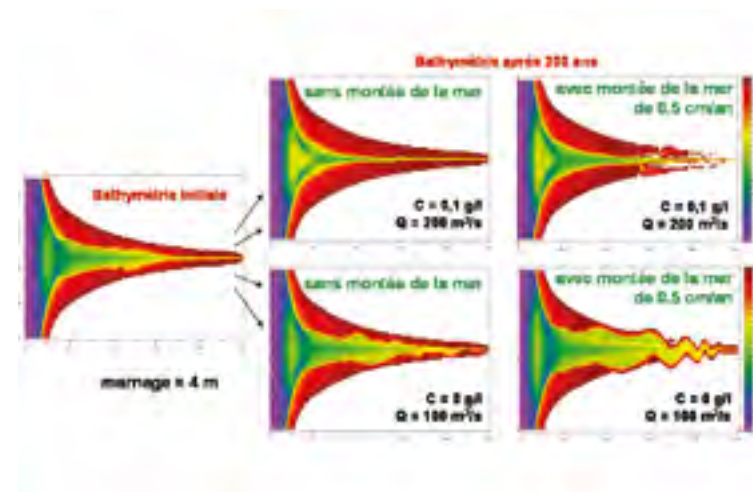


Figure 3 - Effet de la montée du niveau de la mer sur l'évolution morphologique après 200 ans d'un estuaire long de 50 km. Amplitude de marée 2 m. Q et C sont respectivement le débit et la concentration en matières en suspension en amont.

La 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,

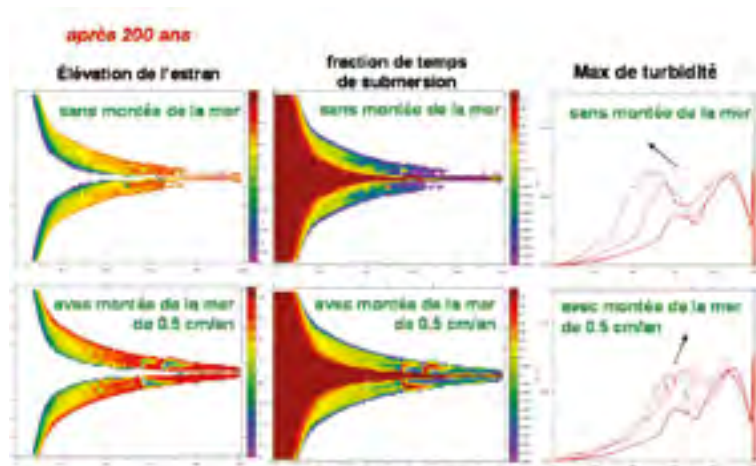


Figure 4 - Effet de la montée du niveau de la mer sur la zone intertidale, après 200 ans d'évolution, et maximum de matière en suspension simulées dans le chenal en surface (estuaire de 50 km, marnage moyen de 4 m, débit fluvial 200 m³.s⁻¹, concentration des MESamont: 0.1 kg.m⁻³).

l'estran sera automatiquement réduit en cas de montée du niveau de la mer. 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 herbues, voire les détruire, et changer la fonctionnalité du milieu, mais sans effet retour sur l'évolution morphologique.

Echanges 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 particuliers 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 (Figure 5).

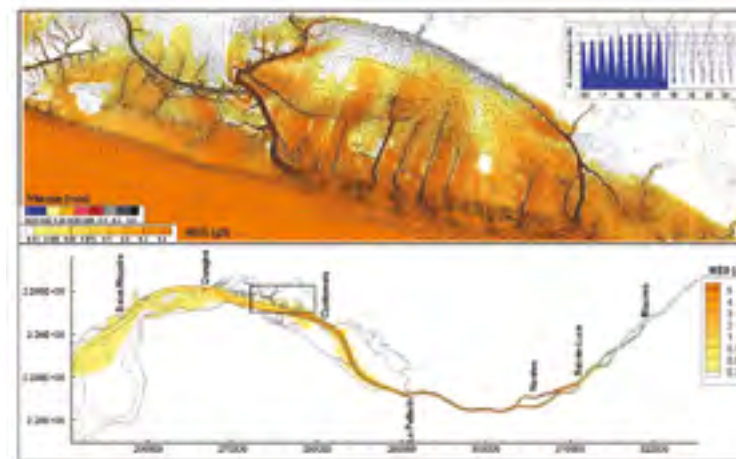


Figure 5 - Visualisation du débordement simulé le 17 septembre 2012: situation de pleine mer. Les vecteurs représentent le courant, tandis que la couleur du fond représente la concentration de matières en suspensions dans les secteurs inondés. La carte du haut est un zoom du secteur d'étude encadré dans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

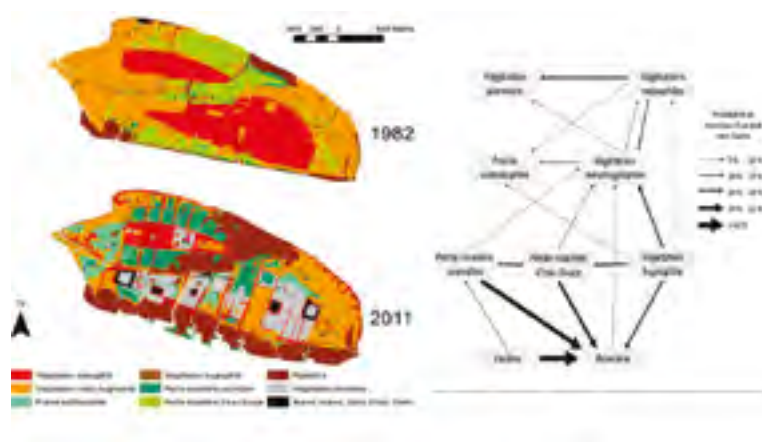


Figure 6 - Evolution de la végétation du secteur Lavau-Pipy (localisation du zoom de la Figure 5) en 1982 et 2011. A droite: probabilités de transitions des unités de végétation entre 1982 et 2011.

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 six 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 (scénario 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

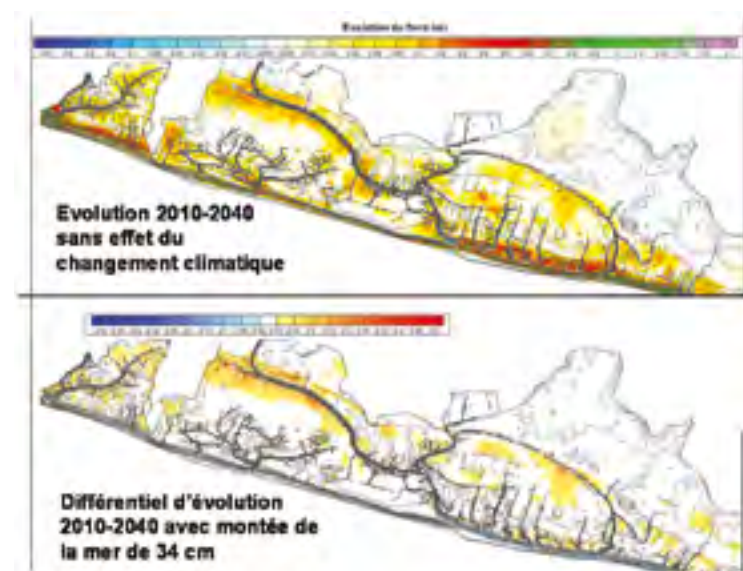


Figure 7 - Evolution topo-bathymétrique 2010-2040 pour le cas sans changement climatique et différentiel (avec ce cas) d'évolution pour le scénario de montée du niveau de la mer.

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).

Sans changement climatique, les zones submersibles en aval de Nantes piègeraient environ 40000 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 100000 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 matière en suspension et en eaux salées, ce processus étant renforcé par la remontée du système halin.

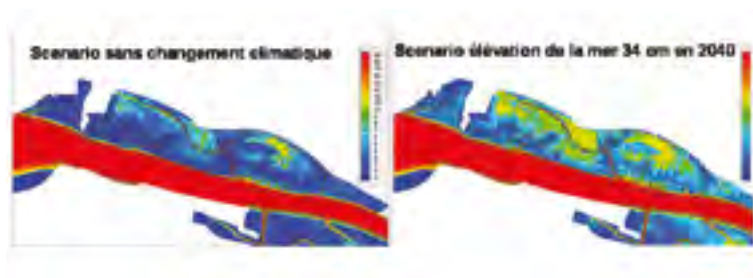


Figure 8 - simulation du pourcentage temps de dépassement d'une hauteur d'eau de 20 cm en 2040.

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.

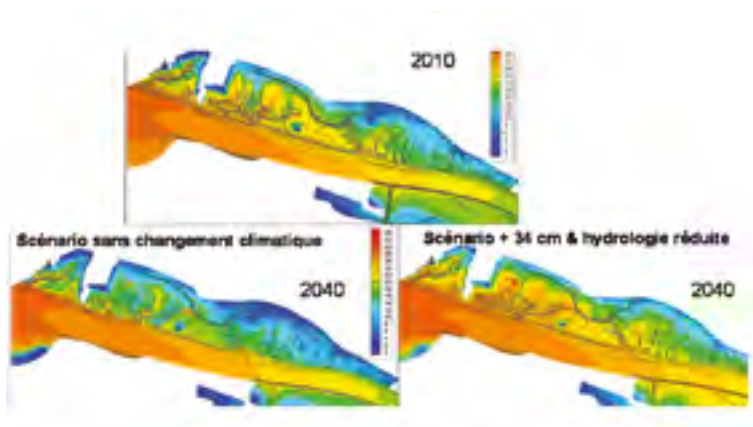


Figure 9 - Salinités maximales simulées par le modèle.

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.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

Le projet C3E2 a inspiré et permis la proposition de programme de recherche ICE-PEL soutenu par la Fondation de France démarrant en 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 Frédéric Bioret.

APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

A 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 vive eau. 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'Etat 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 de restauration des milieux...

Ces réunions devraient avoir lieu au 1er trimestre 2015 et pourront à la fois permettre d'explicitier les enjeux associés au changement climatique, mais également, dans 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...).

LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

ARTICLES SCIENTIFIQUES

Sawtschuk J., Bioret F., 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., Ledisseez 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 cœur 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.

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

Le Hir P., Cayocca E., 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 E., 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)

Le Hir P., Cayocca E., 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 aout-3sept 2015

ARTICLES DE VULGARISATION

Dans le cadre de 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.

INVULNERABLE 2
VULNÉRABILITÉ DES ENTREPRISES
PHASE 2

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: 23 décembre 2010

Montant du budget: subvention de 135 000 €

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

Responsable scientifique du projet:

Pascale Braconnot,
Chercheur CEA à l'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:

S. PLANTON, M. COLOMBIER
Meteo-France

P. PONCET
GDF Suez

M. COLOMBIER
IDDRI

S. PAREY
EDF R&D

J. CATTIAUX, H. DOUVILLE,
G. OUZEAU, Y. PEINGS
CNRM-GAME

J. MALANDAIN, N. DRUT
Veolia Eau

C. DÉANDREIS, B. QUESADA,
R. VAUTARD, Y. SANÉ
IPSL / LSCE

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.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

INTRODUCTION

Le projet INVULNERABLE 2 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 chaleurs 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 GDF Suez 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 compléter 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. A 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

Etude des vagues de froid pour le secteur du Gaz

Introduction

Les activités d'un opérateur d'énergie comme GDF Suez 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 jusqu'à -6°C en

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.

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 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-

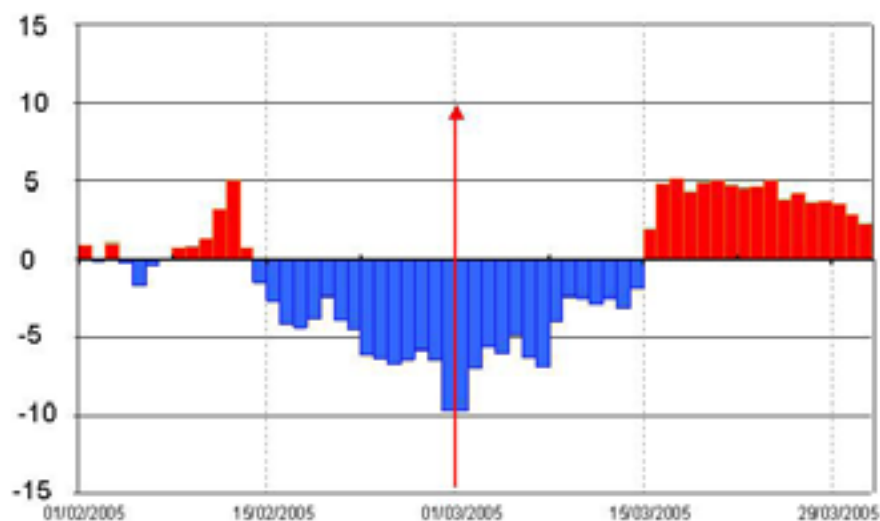


Figure 1 – Évolution des anomalies de température au cours des mois de février et mars 2005 en France. La flèche rouge correspond au 1er mars, date à laquelle GDF Suez a dû faire jouer les clauses d'interruption des contrats de ses clients dits interruptibles.

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 $-5^{\circ}\text{C}/\text{jour}$;
- 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.

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.

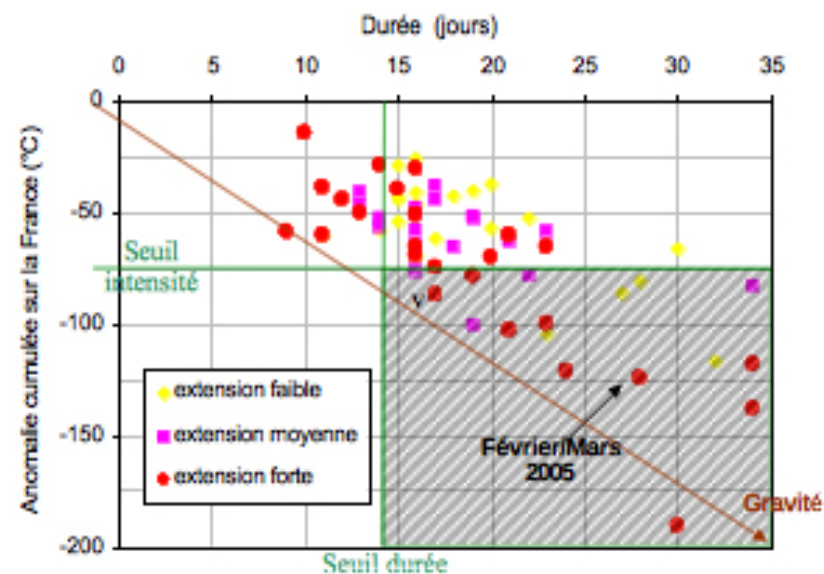


Figure 2 – Nuage de points des vagues de froid en fonction de leur durée (abscisse), de leur anomalie cumulée de température sur la France (ordonnée) et de leur extension géographique (rouge = fort; rose = moyen; jaune = faible). Les anomalies de température ont été calculées par rapport à la période 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 terme 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 terme 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 terme 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.

Etude 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'épu-

ration 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 permettant 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 PRUDENCE², CYPRIM³, MedUP⁴, HyMeX⁵ 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 (Figure 3) 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.

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>)

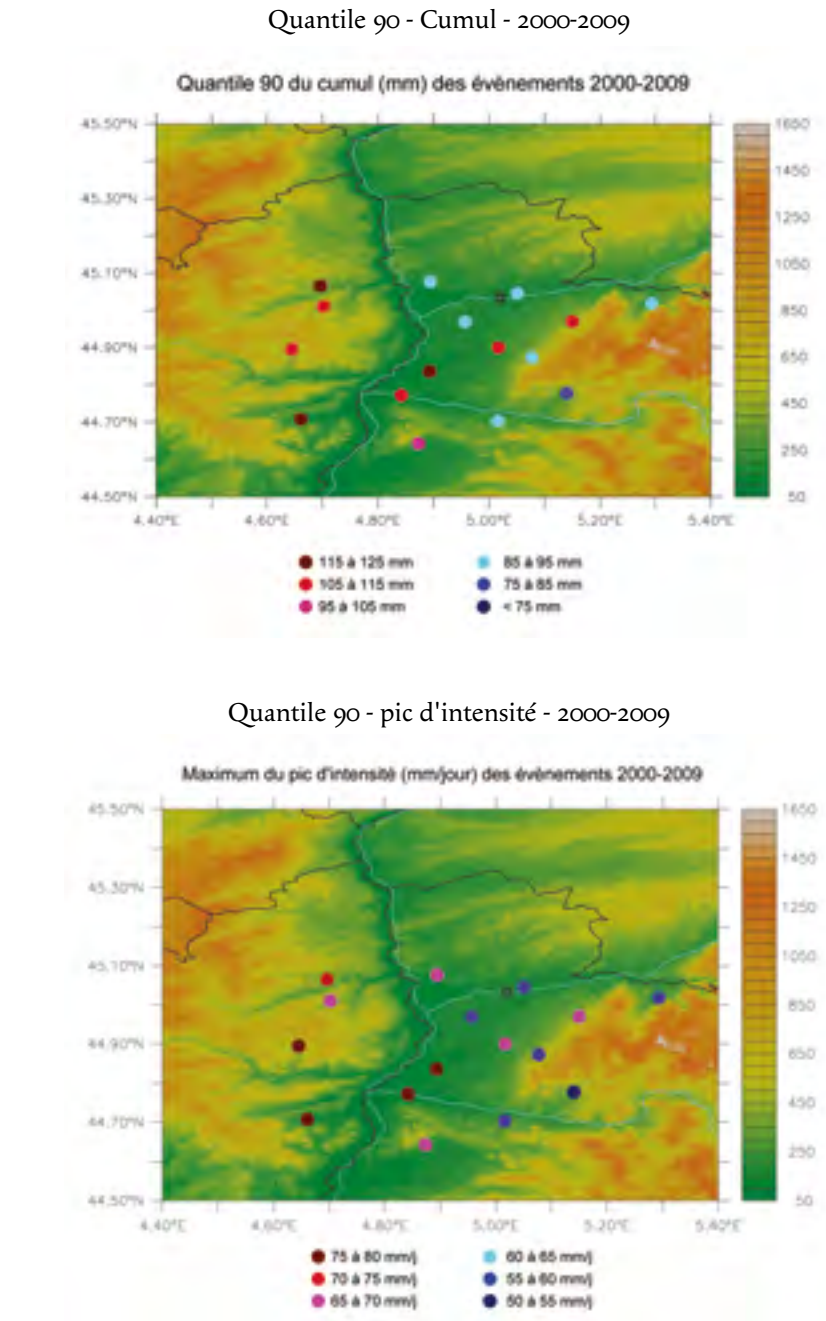


Figure 3 – Quantile 90 du cumul et du pic d'intensité des événements pluvieux enregistrés par les stations Météo-France (points de couleurs sur les cartes) au cours de la période 2000-2009 (définition CEMAGREF).

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 précipitants conditionnent les débordements et que les précipitations extrêmes ne sont que l'un des facteurs les plus contraignants (Figure 4).

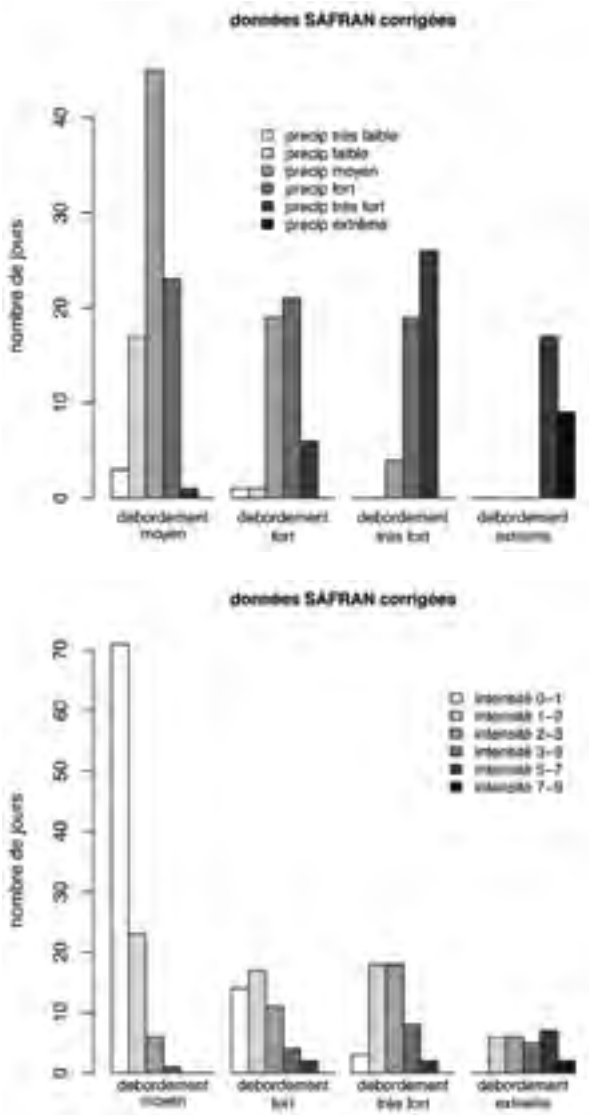


Figure 4. – Distribution des jours de débordement en fonction a) de leur classe de débordement et de leur classe de cumul journalier de pluie ; b) de leur classe de débordement et de l'intensité journalière de précipitation (en mm/h).

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 (Figure 5) 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.

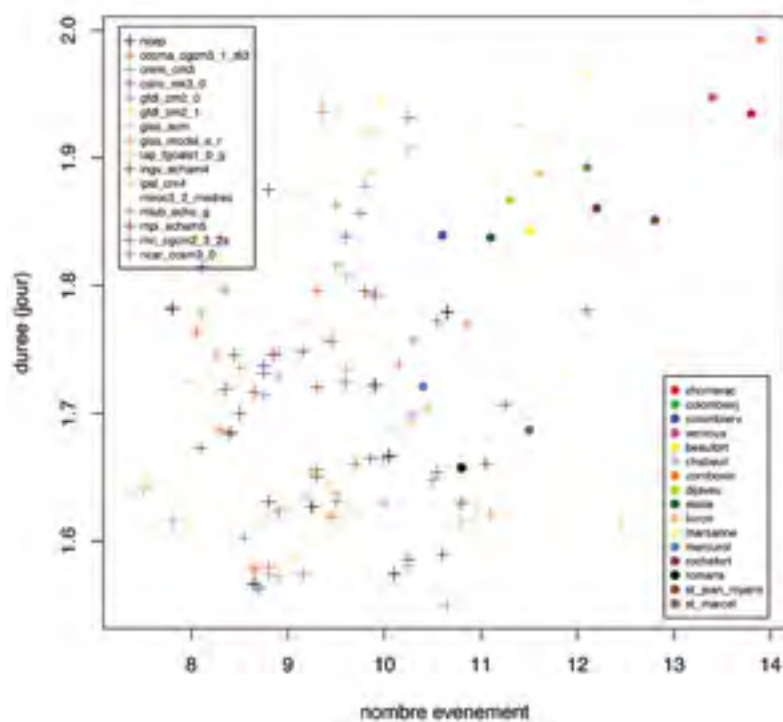


Figure 5 – Comparaison de la moyenne annuelle de la durée des événements pluvieux (définition CEMAGREF) et de leur nombre. Valeurs calculées à partir des 16 stations Météo-France sur la période 2000-2009 (cercles colorés) et des résultats de 16 modèles globaux dont les données ont été désagrégées sur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

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 INVULNERABLE 2 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'engager 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 aux 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.

APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

La principale valeur ajoutée de ce projet porte sur 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'Allenvi⁶. 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.

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 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 :

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

Fiche faisant l'état de travaux de INVULNERABLE 1.

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 : Elaboration 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

Deandreis 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.

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

MIRACCLE
MESURES ET INDICATEURS DE RISQUES
ADAPTÉS AU CHANGEMENT CLIMATIQUE

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: 01/12/2010
Montant du budget: subvention de 225 000 €

Responsable scientifique du projet:

Pierre Ribereau
Institut Camille Jordan, Université Lyon 1
43 Bd du 11 Novembre 1918 – 69622 Villeurbanne Cedex
Mail: pierre.ribereau@univ-lyon1.fr

Partenaires Scientifiques:

Jean-Noël BACRO I3M, Université Montpellier 2	Esterina MASIELLO Institut Camille Jordan, Université Lyon 1
Romain CHALAIN I3M, Université Montpellier 2	Véronique MAUME-DESCHAMPS Institut Camille Jordan, Université Lyon 1
Areski COUSIN Laboratoire SAF, Université Lyon 1	Philippe NAVEAU Laboratoire des Sciences du Climat et de l'Environnement
Diana DOROBANTU Institut Camille Jordan, Université Lyon 1	Thomas OPITZ I3M, Université de Montpellier 2
Anne EYRAUD-LOISEL LSAF, Université Lyon 1	Mathieu RIBATET I3M, Université de Montpellier 2
Erwan KOCH Laboratoire SAF, Université Lyon 1	Didier RULLIÈRE LSAF, Université Lyon 1
Stéphane LOISEL LSAF, Université Lyon 1	Gwladys TOULEMONDE I3M, Université de Montpellier 2

MOTS CLÉS

Mesure de risques, catastrophes naturelles, assurance, actuariat, extrêmes.

OBJECTIFS DES RECHERCHES

L'objectif du projet est d'étendre et adapter les mesures de risque usuelles à la nature spatio-temporelle des données climatiques.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

INTRODUCTION

La première question que l'on peut se poser est : pourquoi chercher à faire de nouvelles mesures de risques alors qu'il en existe déjà. Celle qui est la plus utilisée en pratique dans les sciences du climat est le niveau de retour « x années », c'est à dire le niveau que l'on s'attend à ne voir dépassé qu'une seule fois au cours des x prochaines années. Cette mesure de risque n'est toutefois pas adaptée lorsque l'on parle de changement climatique.

D'abord, le niveau de retour n'est pas adapté aux séries de données non stationnaires, ce qui est clairement le cas lorsque l'on considère les sciences climatiques. A titre d'exemple, dans la figure 1, nous avons considéré les minima de température à Paris en été. Cette variable est importante d'un point de vue sanitaire puisqu'une exposition à des températures nocturnes élevées peut entraîner chez les personnes âgées des coups de chaleur pouvant causer le décès. Pour chaque année depuis 1910, nous avons calculé le niveau de retour 100 ans en utilisant les techniques habituelles (estimateur POT i.e. au-delà d'un seuil) de la théorie des valeurs extrêmes en supposant la stationnarité des données.

Les croix représentent l'estimation de cette période de retour, la courbe rouge est un lissage de ces estimations et les cercles bleus représentent les vraies valeurs observées. Le résultat est que le niveau de retour estimé en 1910 n'aurait dû être dépassé qu'une seule fois au cours du siècle, or nous pouvons observer qu'il a été dépassé près d'une fois sur deux. Cet exemple montre que les mesures actuelles ne sont pas adaptées à des variables dont la loi de probabilité change avec le temps, typiquement comme dans le cas du changement climatique.

L'autre point concerne la nature spatiale des données climatiques. En effet, les mesures de risque actuelles ne prennent pas en compte la dépendance spatiale. D'un point de vue assurantiel, les extrêmes spatiaux sont importants puisqu'ils engendrent des pertes considérables. A titre d'exemple, en 2011 les risques climatiques ont provoqué des pertes économiques de l'ordre de 380 milliards de dollars et des pertes de biens assurés de l'ordre de 120 milliards de dollars. En 2012, il y a eu une baisse avec 105 milliards de pertes dont 65 pour les compagnies d'assurance. De plus, les secteurs de l'assurance, de la réassurance et même le secteur financier sont très sensibles aux catastrophes naturelles. L'évaluation correcte des risques intervient dans le calcul des primes demandées aux assurés mais aussi dans le calcul du capital initial nécessaire à la solvabilité des compagnies. Il apparaît donc nécessaire de bien quantifier ces risques à l'aide de mesures de risque adaptées.

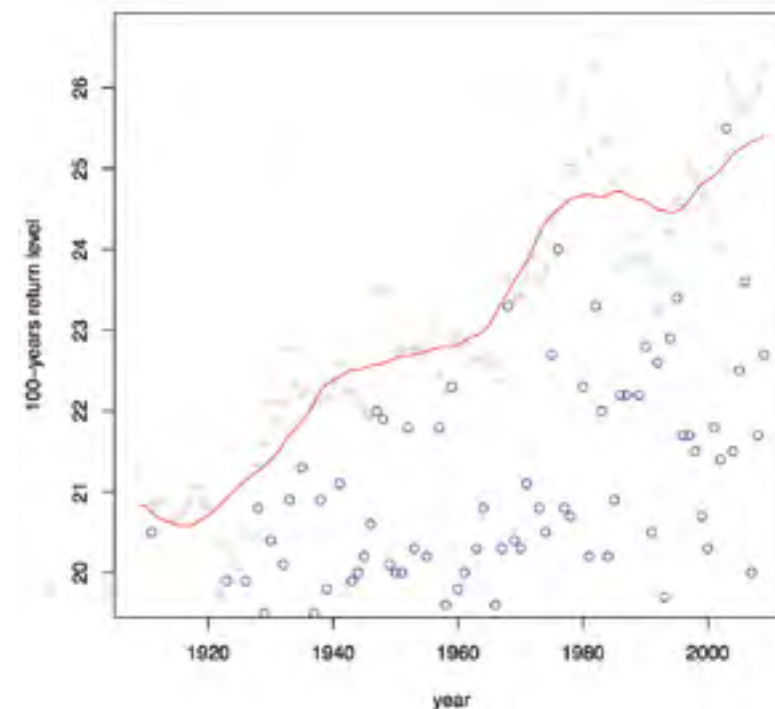


Figure 1 – Niveaux de retour 100 ans estimés pour le minimum des températures à Paris en été. Les croix représentent le niveau estimé chaque année, les cercles sont les maximales annuelles de ces températures minimales et la courbe rouge est un lissage des estimations

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Si on prend l'exemple d'un cours d'eau, le niveau de retour 100 ans correspond à la hauteur de crue qui sera dépassée en moyenne une seule fois au cours des 100 prochaines années. Un problème équivalent est celui de considérer une digue de protection qui n'a jamais été dépassée dans le passé et d'essayer de quantifier la probabilité que le cours d'eau dépasse cette digue. On comprend bien que les méthodes usuelles en statistique ne peuvent pas répondre à cette question « quelle est la probabilité d'un événement jamais observé? ». La théorie des valeurs extrêmes donne un cadre théorique, confirmé par la pratique, pour répondre à ces questions. Lorsque l'on considère une seule variable climatique en un seul point comme par exemple la hauteur de crue d'un cours d'eau en un point donné, cette théorie est bien connue et très fréquemment utilisée en pratique lorsque l'on veut estimer des mesures de risque « extrêmes ».

Cette théorie devient plus complexe lorsque l'on considère plusieurs variables climatiques en un point ou si l'on considère une seule variable climatique observée en différentes stations et que l'on s'intéresse aux événements extrêmes simultanément. On parle alors de théorie des valeurs extrêmes multivariées. Le cas où l'on considère une variable climatique sur une région donnée est encore plus complexe. Les objets mathématiques qui apparaissent dans le cas spatial sont les processus max-stables. Ce sont des processus encore mal connus et qui ont peu de représentations paramétriques, ce qui peut restreindre leur utilisation dans la modélisation d'extrêmes spatiaux. Comme c'est un objet essentiel pour la construction de mesures de risque spatiale, une part importante du projet a été consacrée à leur étude. Ces processus représentent le matériel de base pour la construction des mesures de risque spatial qui ont été proposées.

RÉSULTATS

Extrêmes spatiaux

Les phénomènes qui nous intéressent sont, par nature, extrêmes. Pour quantifier ces risques, dans le cas où l'on considère une seule variable climatique à un point donné de l'espace, la théorie des valeurs extrêmes unidimensionnelles est bien développée et connue. Les extensions de cette théorie dans le cadre spatial sont en plein développement. Dans ce cadre là, les processus limites sont les processus max-stables (équivalent de la distribution des extrêmes généralisées dans le cas univarié). Il existe peu de modèles permettant de représenter les phénomènes spatiaux. Le projet MIRACCLE a répondu ainsi à trois problèmes majeurs : le développement de nouveaux modèles max-stables, l'estimation des paramètres de ces modèles et l'interpolation.

Opitz (2013) et Robert (2013) ont développé de nouveaux modèles max-stables. Ces résultats permettent d'obtenir une plus grande classe et ainsi une meilleure adéquation aux observations.

Koch (2014) dans sa thèse a développé une nouvelle méthode d'estimation des paramètres d'un processus max-stable en utilisant la vraisemblance simulée, technique habituellement utilisée en économétrie. Opitz et al. (2015) ont proposé un nouvel outil, le spectrogramme qui permet de mieux comprendre la dépendance spatiale des extrêmes mais aussi d'estimer les paramètres du processus sous-jacent.

Dombry et al. (2013) ont calculé la loi d'un processus max-stable conditionnellement à certaines observations. Cela permet, dans le cas où on observe les ex-

trêmes spatiaux uniquement en certains points (par exemple les stations météorologiques), d'extrapoler à tous les points de la région via des simulations.

Détection de tendance dans les extrêmes

Pour pouvoir définir des mesures de risque adaptées au changement climatique, il faut encore être capable de détecter s'il y a changement ou pas. Comme les événements auxquels on s'intéresse sont extrêmes, il a fallu développer des méthodes permettant la détection de tendances dans les extrêmes. C'est une question qui intéresse à la fois les climatologues, les assureurs et les modélisateurs de risque : est-ce que les températures élevées sur les dernières années (par exemple les trente dernières années) diffèrent de façon significative de celles mesurées au cours des périodes précédentes une fois que l'on a enlevé la tendance moyenne ? Autrement dit, on cherche à savoir s'il y a oui ou non un changement dans la distribution des extrêmes.

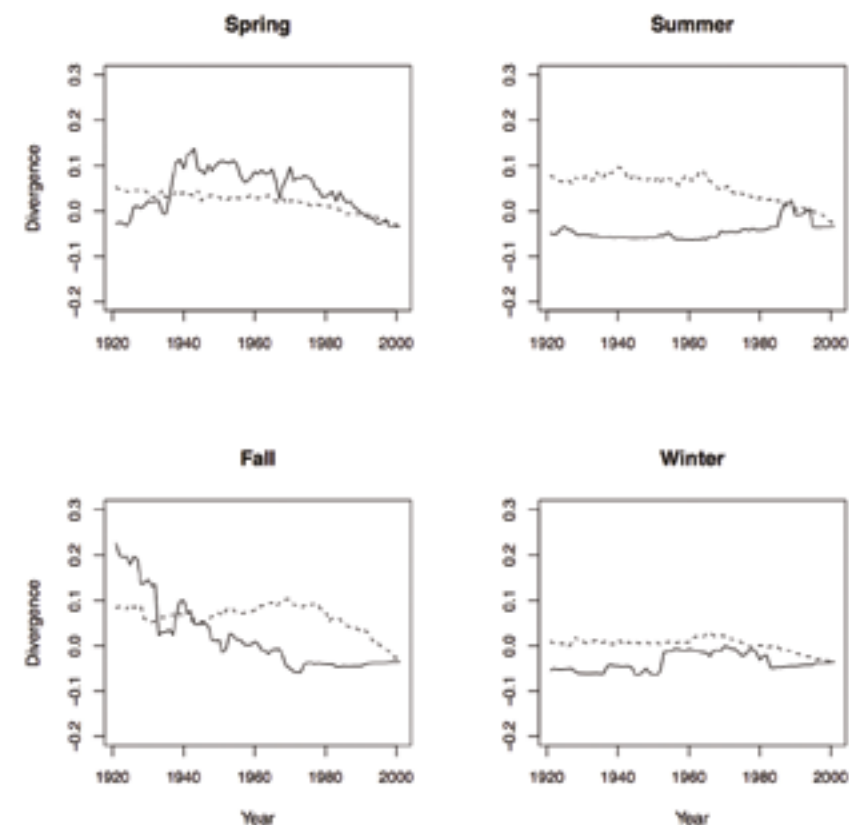


Figure 2 – évolution de la divergence sur la période $[1900+t; 1929+t]$, la période de référence étant $[1981, 2010]$. Station de Paris-Montsouris.

Naveau et al. (2014) ont utilisé une approche qui évite de faire des hypothèses mathématiques trop fortes et donc peu réalistes. Ils construisent un estimateur de la divergence. La divergence permet de comparer la distribution de probabilités des extrêmes de deux séries climatiques (ici les températures) provenant de deux périodes différentes.

La Figure 2 représente l'évolution de la divergence (courbe en noir) en fonction des années (pour chaque année, on considère la période de trente années précédente). La période de référence est [1981,2010]. La ligne en pointillés représente un intervalle de confiance à 95%. Ici, les données ont d'abord été traitées afin d'enlever la moyenne, de façon à ce que la divergence montre uniquement les écarts dans la distribution des extrêmes et non dans la moyenne. A l'exception du printemps et de l'automne, il apparaît que la distribution des extrêmes au début du siècle n'est pas vraiment différente de celle actuelle.

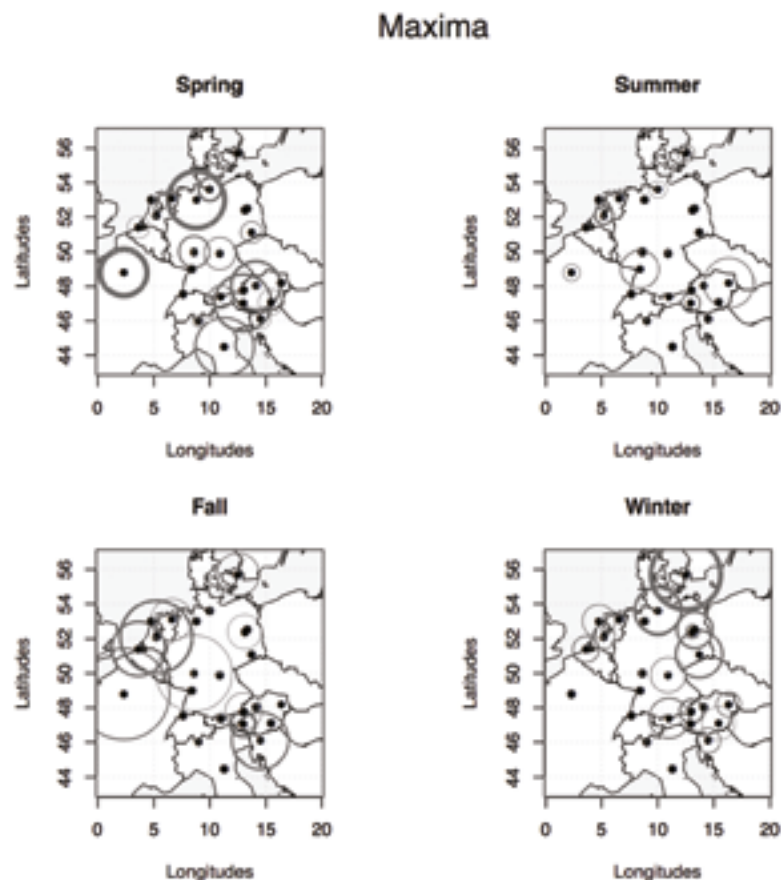


Figure 3 – Comportement de la divergence pour 25 stations en Europe. La construction des cercles dépend de la divergence.

Il est aussi possible de quantifier cette différence en calculant combien de temps et de combien la divergence est significativement différente, c'est à dire en comptant le nombre d'années pour lesquelles la divergence estimée est au dessus de la courbe en pointillés et on additionne la divergence pour ces années. Ainsi dans la Figure 3, on a représenté le nombre d'années pour lesquelles la divergence est positive (largueur du cercle) et la divergence cumulée (diamètre du cercle) pour plusieurs stations en Europe.

Si on regarde de nouveau la station de Montsouris, on se rend compte qu'il y a beaucoup d'années où la divergence est positive au printemps mais cette divergence est très peu au dessus de 0; alors qu'en automne, la divergence n'a pas beaucoup d'années positives mais les années où la divergence est positive les valeurs de celle-ci sont élevées.

Mesures de risque

La première mesure de risque consiste à calculer l'espérance de l'intégrale d'un processus au dessus d'un certain seuil, c'est à dire à s'intéresser à la surface entre le processus et le seuil comme le montre la Figure 4. Si le processus climatique est bien connu, ces mesures peuvent s'avérer utiles car elles permettent d'intégrer le changement climatique.

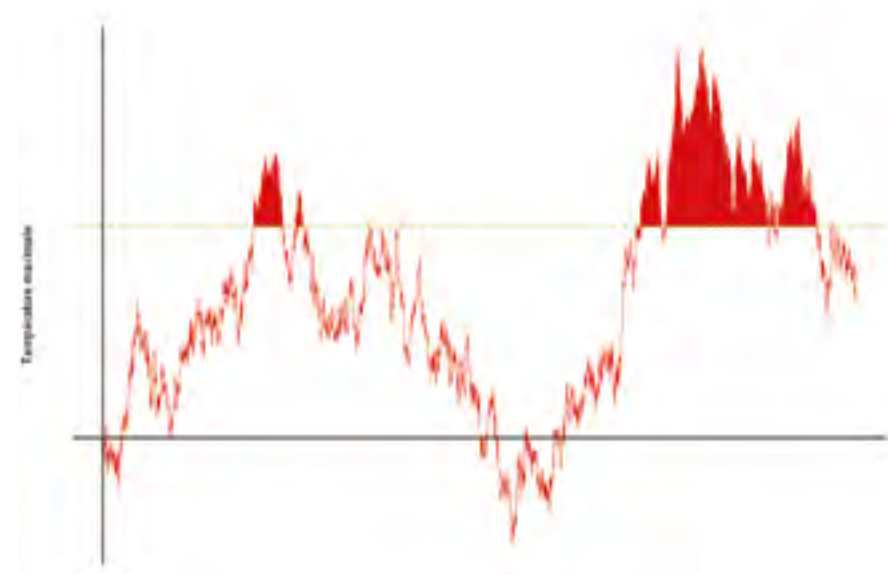


Figure 4 – Exemple de mesure de risque (aire en rouge)

Dans sa thèse Koch (2014) a proposé une mesure de risque spatiale définie comme l'espérance ou la variance de l'intégrale d'une fonction de coût dépendant d'une variable climatique sur une région donnée. L'interprétation que l'on peut donner à une telle mesure de risque est de la voir comme le montant des pertes économiques agrégées sur une région donnée causées par une variable climatique. Les résultats théoriques obtenus montrent que cette mesure de risque est valable et pourrait être utilisée dans le futur pour remplacer des mesures de risque telles que la VaR (Value at Risk) ou le niveau de retour.

Impact sur l'assurance

La dernière partie du projet concernait l'impact du changement climatique sur les compagnies d'assurance. Pour cela, nous avons étudié l'évolution de la solvabilité des compagnies d'assurance dans un contexte où les sinistres deviendraient potentiellement plus importants et plus fréquents. En effet, les normes prudentielles demandent aux compagnies d'assurance de contrôler leur probabilité de ruine à un niveau égale (ou inférieure) à 0,005.

La probabilité de ruine se traduit comme la probabilité qu'à un instant donné, la compagnie ne puisse plus faire face à ses engagements envers ses assurés. Dans la figure 5 nous avons tracé un exemple de trajectoire des réserves d'une compagnie d'assurance. Elle commence son exercice avec un capital initial u . Au cours du temps, elle récupère les primes versées par ses assurés ce qui fait croître ses réserves. A l'instant u_1 elle doit rembourser un sinistre d'un montant x_1 , et ainsi de suite. A l'instant u_4 , elle se trouve en ruine car ses réserves chutent en dessous de 0 et ne peut donc pas rembourser intégralement le quatrième sinistre. Dans Kortschak et al. (2015), nous avons travaillé sur un modèle qui suppose que les sinistres arrivent de plus en plus fréquemment et que les montants sont de plus en plus élevés. Ce modèle nous permet de calculer explicitement le niveau de départ u nécessaire à une compagnie d'assurance dans les années à venir pour s'assurer une probabilité de ruine égale à 0,005. Ce surplus correspond ainsi au coût du changement climatique pour une compagnie d'assurance.

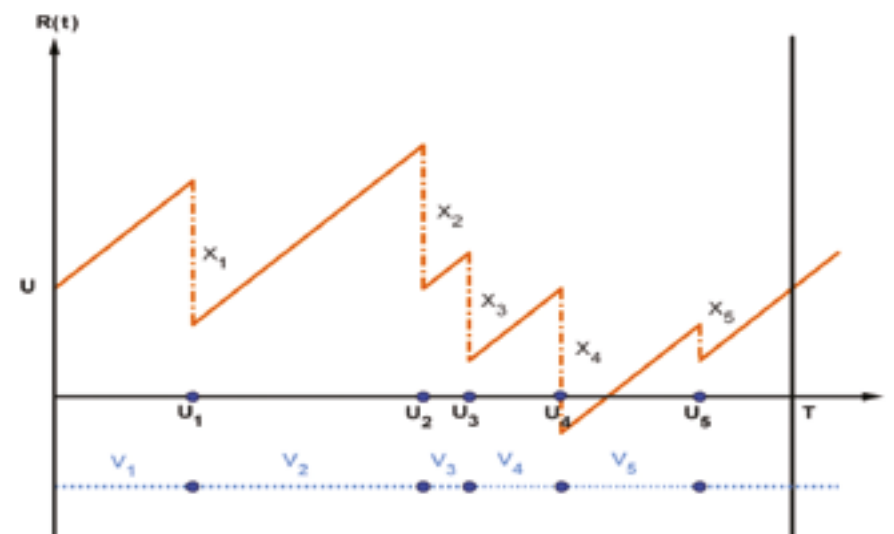


Figure 5 – Exemple de trajectoire du processus de réserve d'une compagnie d'assurance

CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Le projet a permis de répondre aux questions et aux problématiques de départ mais surtout d'un point de vue théorique. Il reste encore à travailler sur l'application de ces méthodes, à les rendre plus accessibles à la communauté et plus interprétables. Les résultats obtenus sur le coût du changement climatique pour les compagnies d'assurance sont intéressants et doivent être utilisés pratiquement et étendus à d'autres garanties comme la santé ou l'automobile.

APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

En décembre 2014, Erwan Koch a reçu le prix des jeunes docteurs Actuariat France de la SCOR qui récompense des « travaux académiques riches en idées, méthodes ou projets innovants ayant des applications potentielles dans la gestion du risque ». Cette récompense montre l'importance qu'accorde le monde de l'assurance aux résultats obtenus dans sa thèse.

En effet, pour quantifier l'impact de catastrophes naturelles, il faut pouvoir transformer des variables environnementales telles que la vitesse du vent, la quantité de précipitations ou la température en un coût économique (ou assuré). Cette quantification se fait habituellement via l'utilisation de fonctions de vulnérabilité. Mais cela ne donne que le coût en un point donné pour un bien donné. Il faut donc prendre en compte l'exposition au risque en chaque point de la région d'intérêt. Erwan Koch présente donc une notion de mesure de risque dans le cadre spatial afin d'introduire dans la mesure de risque « classique » les caractéristiques spatiales des dommages liés à des phénomènes environnementaux. Il développe le concept de mesure de risque spatiale, fondé sur la perte économique ou assurée, agrégée spatialement et propose une axiomatique adaptée. Les axiomes proposés sont liés à la fois à la notion de diversification spatiale et à la sensibilité de la mesure de risque vis-à-vis de certaines caractéristiques de l'espace. Ces deux notions sont cruciales tant pour les pouvoirs publics que pour les compagnies d'assurance.

Les mesures de risque proposées ne sont pas encore complètement adaptées aux problématiques climatiques puisqu'elles supposent une homogénéité de la loi de probabilité des phénomènes sur la région entière, mais ce problème sera réglé rapidement. Elles peuvent aussi apparaître la première fois comme difficilement interprétables mais à termes elles pourront jouer un rôle majeur dans la prévention et la gestion des risques.

LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

ARTICLES SCIENTIFIQUES (41 ARTICLES PUBLIÉS, 16 SOUMIS)

Dombry C., Eyi-Minko F., Ribatet M., 2013, Conditional simulations of max-stable processes. *Biometrika* 100(1), pp 111-124.

Koch E., 2014, Outils et modèles pour l'étude de quelques risques spatiaux et en réseaux: application aux extrêmes climatiques et à la contagion en finance, thèse de doctorat de l'université Lyon 1, spécialité Mathématiques appliquées, Lyon 1, 234p.

Naveau P., Guillo A., Rietsch T., 2014, A non-parametric entropy-based approach to detect changes in climate extremes. *Journal of the Royal Statistical Society, series B*, Vol 76(5), pp 861-884.

Opitz T., 2013, Extremal t processes: Elliptical domain of attraction and a spectral representation. *Journal of Multivariate Analysis*.

Robert C. 2013. Some new classes of stationary max-stable random fields. *Statistics and Probability Letters*, 83, pp 1496-1503.

Kortschak D., Masiello E., Ribereau P., 2015, Second order tail asymptotics for the sum of dependent, tail-independent regularly varying risks: Or a first try to calculate the cost of climate change for insurance companies. Soumis.

Opitz T., Bacro J.-N., Ribereau P., 2015, The spectrogram: A threshold-based inferential tool for extremes of stochastic processes. Soumis.

ARTICLES DE VULGARISATION

Koch E., Ribereau P., Robert C., 2014, Une tempête dans l'économie. Dans : Brèves de maths : Mathématiques de la planète Terre, éditions Nouveau Monde, pp 150-151

**GRADIENT ALTITUDINAL (GRAAL)
MESURE DU POTENTIEL D'ADAPTATION
DES ARBRES FORESTIERS
AU CHANGEMENT CLIMATIQUE :
APPROCHES IN SITU ET EX-SITU SUR
GRADIENTS ALTITUDINAUX À L'AIDE DE
DISPOSITIFS DE TRANSPLANTATION CROISÉE**

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: 26 janvier 2011
Montant du budget: subvention 267 000 €

Responsable scientifique du projet:

Philippe Rozenberg
INRA
INRA Val de Loire Orléans UR0588
2163 Avenue de la Pomme de Pin, CS 40001 ARDON,
45075 ORLEANS Cedex 2
philippe.rozenberg@orleans.inra.fr

Partenaires Scientifiques:

V. Guérin, L. Pâques, L. Sanchez,
M. Nardin, P. Rozenberg
INRA Val de Loire, UR 0588, unité de
recherche AGPF, Orléans

P. Poursat
(et la plupart des agents de l'UE)
INRA Val de Loire, UE 0995 GBFOR,
unité expérimentale Génétique et Bio-
masse Forestières d'Orléans

J.-P. Charpentier, F. Millier
Plateau Technique Génobois (INRA
Val de Loire Orléans et Bordeaux)

S. Oddou-Muratorio, C. Pichot,
H. Davi, B. Fady, A. Latreille
INRA PACA, UR 0629, unité de re-
cherche Forêts Méditerranéennes, Avi-
gnon INRA

J.-C. Martin, F. Jean
UE 3048, unité expérimentale Entomo-
logie et Forêt Méditerranéenne, INRA
PACA, Avignon

S. Gerber
INRA Bordeaux, UMR 1202 Biogeco,
Bordeaux et F. Salin, Plateforme Gé-
nome Transcriptome, INRA Bordeaux

J. Ladier, B. Musch, Y. Rousselle, C.
Ruth, J. Baubion
ONF, Centre PACA, direction scienti-
fique de Fontainebleau et CGAF Or-
léans

C. Rathgeber
INRA et ENGREF, UMR 1092 Lerfob,
Nancy

F. Huard
INRA, US 1116, INRA PACA, unité de
service Agroclim, Avignon

J.-P. Rossi
INRA Montpellier, UMR CBGP, Mont-
pellier

MOTS CLÉS

Adaptation biologique, gradient altitudinal, transplantation réciproque, climat, mélèze, sapin.

OBJECTIFS DES RECHERCHES

GRAAL contribue à l'étude des mécanismes de l'adaptation locale des organismes et à l'estimation de leur potentiel d'adaptation au changement climatique. A long terme, il vise à mesurer les parts respectives de la plasticité (comme mesure de la réponse individuelle - court terme) et de l'adaptation génétique (comme mesure de la réponse génétique au niveau des populations - plus long terme) dans l'expression des caractères adaptatifs. Mis en œuvre dans le cas particulier des arbres forestiers, il a également pour objectif de déterminer si ce potentiel d'adaptation, s'il existe, peut-être mobilisé par les gestionnaires pour atténuer les éventuels effets négatifs des changements climatiques. Les espèces modèles du projet sont deux espèces forestières représentatives de l'étage montagnard, le mélèze et le sapin. L'approche développée consiste à mettre en place sur plusieurs gradients altitudinaux un réseau de dispositifs d'observation à court, moyen et long terme, basé sur des observations in situ (sur arbres adultes en place) et surtout ex-situ sur des dispositifs de transplantation réciproque d'arbres issus de différents niveaux altitudinaux. Il a également pour objectif d'évaluer le cadre méthodologique utilisé pour les espèces du projet et de généraliser à d'autres espèces.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

INTRODUCTION

Les changements globaux et notamment le réchauffement climatique modifient les conditions écologiques et posent la question du devenir des écosystèmes. La combinaison des processus de plasticité, migration et adaptation (génétique), permettra dans une certaine mesure aux espèces de s'adapter. Les espèces végétales à long cycle de vie sont particulièrement vulnérables. Si les plantations comparatives (dispositifs expérimentaux de type agronomique -« common garden »- rassemblant en un seul site des arbres d'origines variées) ont permis d'évaluer la variabilité et l'adaptation au sein de l'aire naturelle des espèces à l'échelle locale, les différenciations génétiques et les potentialités d'adaptation restent insuffisamment connues.

Les arbres d'une même espèce distribués le long d'un gradient altitudinal subissent, sur une courte distance, de fortes variations environnementales. La température est beaucoup plus élevée à la base qu'au sommet du gradient, avec des variations de température moyenne annuelle supérieures à 5°C pour 1000 m de dénivelé. Cette variation entraîne ou s'accompagne d'autres changements, biotiques ou abiotiques, qui caractérisent les environnements se succédant avec l'altitude. Les arbres subissent donc le long d'un gradient altitudinal des conditions et des contraintes environnementales très variables : à basse altitude la température plus élevée et la pluviométrie généralement plus faible exposent les arbres à des dysfonctionnements hydrauliques liés à des déséquilibres entre disponibilité et demande en eau. A haute altitude le risque de blessures provoquées par le froid est élevé, particulièrement juste après le début ou juste avant la fin de la saison de végétation. Ces conditions environnementales variables affectent la survie, la physiologie, la croissance et la reproduction des arbres. L'objectif du projet GRAAL (GRAdient ALtitudinal) est de mesurer les variations phénotypiques (c'est-à-dire d'un ensemble de caractères observables) et génotypiques (c'est-à-dire d'un ensemble de gènes ou marqueurs génétiques) des arbres en place le long de gradients altitudinaux et d'installer et observer des dispositifs expérimentaux de transplantations réciproques afin d'étudier les mécanismes d'adaptation aux contraintes environnementales. GRAAL s'adresse à deux espèces de montagne étudiées sur quatre gradients altitudinaux, le mélèze d'Europe dans le Briançonnais et le sapin pectiné sur le mont Ventoux, en Issole et en Vésubie (Figure 1, carte des quatre sites expérimentaux).



Figure 1 – carte du sud-est de la France avec emplacement des quatre sites expérimentaux

MATÉRIELS ET MÉTHODES

L'étude des deux espèces repose sur une méthodologie partagée : sur les quatre gradients, la réponse des arbres aux variations du climat est étudiée de façon rétrospective à l'aide d'analyses dendro-écologiques des cernes des arbres. Les carottes de bois sont analysées à l'aide de la microdensité indirecte aux rayons X. La variation génétique des arbres en place le long des gradients est décrite à l'aide de marqueurs génétiques, microsatellites¹ et SNP² selon les cas, et à l'aide de dispositifs de transplantations réciproques. La transplantation réciproque, ou croisée, consiste à redistribuer des individus issus de plusieurs sites dans tous les sites d'origine. Deux stratégies différentes ont été utilisées pour mettre en place les dispositifs de transplantations croisées : sur mélèze, on a installé à quatre niveaux

¹ Un microsatellite est une séquence de quelques nucléotides répétée un grand nombre de fois. Le nombre de répétitions peut varier entre individus.

² Le « Single Nucleotide Polymorphism », ou polymorphisme pour un seul nucléotide, concerne la variation entre individus d'une seule paire de base d'un segment donné d'un chromosome.

altitudinaux (1350, 1700, 2000 et 2400 m) des tests clonaux avec des copies³ de 30 arbres de chaque niveau altitudinal multipliés par greffage. Dans chaque test on a placé cinq copies de chaque arbre multiplié végétativement, plantées fin 2013 et fin 2014 à des écartements compatibles avec plusieurs dizaines d'années d'observations futures. Sur sapin on a installé des tests de descendance maternelles à partir de graines récoltées sur des arbres situés à tous les niveaux altitudinaux. Ces semis représentent soixante descendance maternelles issues de semences récoltées sur vingt arbres pour chacun des trois gradients. Dans chaque test on a planté à très faible écartement un grand nombre de descendants de chaque arbre mère, afin d'observer à un stade juvénile, sur un petit nombre d'années, la réponse de ces familles. Dans chacune des forêts, les plantules élevées en pépinières ont été installées à l'automne 2009 à trois niveaux altitudinaux (bas, moyen et haut). A chaque niveau les plantules sont réparties dans cinq blocs composés de douze caisses, chacune contenant cinq descendance représentées par sept plantules sur une même ligne. Tous les dispositifs ont été équipés de stations météorologiques gérées par Agroclim (INRA Avignon).

Traits et adaptation

Sur sapin et mélèze, survie, croissance, phénologie du débourrement sont mesurées ainsi que la fructification⁴ et la microdensitométrie du bois (sur carottes pour les deux espèces, à raison de 200 arbres pour le sapin et de 800 pour le mélèze) pour les arbres adultes. Dans les dispositifs de transplantation croisée pour le sapin est également évaluée la surface foliaire et la biomasse (répartition racine/tige/feuille) sur un échantillon de semis (voir le paragraphe « marqueurs génétiques »).

Marqueurs génétiques

Le polymorphisme moléculaire est évalué :

- sur mélèze à l'aide de onze marqueurs microsatellites développés dans le cadre du projet Dendro PAF (Ministère de l'Agriculture) ;
- sur sapin à l'aide de 267 marqueurs de type SNP récemment identifiés dans le cadre du projet ERANET LinkTree ; 28 d'entre eux seraient liés à des gènes sous sélection ; sur la base du génotype des arbres adultes analysés dans un premier temps, un échantillon de 760 semis issus de vingt mères et installés sur les sites Ventoux et Issole aux niveaux Haut et Bas est également génotypé ;
- sur mélèze des marqueurs de type SNP ont été également développés. Après deux échecs successifs dus à des difficultés méthodologiques particulières aux rési-

³ Réplique génétiquement conforme issue du développement végétatif spontané ou assisté par l'homme d'une partie de l'arbre, souvent un morceau de tige, de branche ou de racine.

⁴ La fructification a été observée sur sapin seulement pour des raisons logistiques

neux en général et au mélèze en particulier, une 3^{ème} opération de développement s'est terminée début octobre 2014 en collaboration avec le projet ANR Flag et sera immédiatement suivie du génotypage de 600 arbres adultes du gradient mélèze.

Analyse des données

Les traits mesurés sur les arbres en place permettent d'évaluer la variation phénotypique inter-niveaux altitudinaux et, dans le cas des caractères microdensitométriques et de façon rétrospective, les variations inter-annuelles. Dans les deux cas, les variations phénotypiques peuvent être mises en relation avec les variations environnementales, principalement climatiques, entre niveaux altitudinaux et entre années successives.

Les marqueurs génétiques neutres permettent de mesurer la diversité génétique le long des gradients. Des méthodes associant marqueurs génétiques et caractères phénotypiques permettent de tester l'hypothèse de l'existence d'adaptations locales résultant de pressions environnementales et notamment climatiques différentielles le long des gradients.

Les dispositifs de transplantations réciproques permettent d'évaluer (et croiser) les effets des sources de graines et des clones (peuplement, altitude, mère) et ceux des sites de plantation (site de test, niveau altitudinal de plantation, bloc). Sur mélèze les dispositifs de transplantation viennent d'être plantés et seule une estimation préliminaire de la survie a été réalisée. Les semis de sapin ont été produits avant GRAAL et les dispositifs de transplantation réciproque sapin ont été plantés dès le début de GRAAL. Donc plusieurs campagnes d'observations se sont succédé durant GRAAL, dont une partie des résultats a été analysée. Les traits phénotypiques (survie, hauteur, débourrement) ont été analysés avec le modèle statistique suivant :

$$\text{Trait} = \text{site} + \text{niveau} [\text{hiérarchisé dans site}] + \text{bloc} [\text{hiérarchisé dans niveau}] + \text{peuplement} + \text{mère} [\text{hiérarchisé dans peuplement}] + \text{bloc} \times \text{mère} + \text{erreur}$$

L'interaction *bloc* × *mère* permet d'évaluer l'effet *parcelle unitaire* correspondant à la ligne des sept plantules issues d'une même mère.

Les variances génétiques et l'héritabilité des caractères sont estimées par approche bayésienne avec un modèle mixte linéaire généralisé⁵. Les semis étant structurés en familles de demi-frères, la variance associée à l'effet *mère* correspond au quart de la variance génétique additive.

La variation in situ des caractères des arbres adultes est analysée à l'aide d'analyses de variance et d'analyses multi-variables.

⁵ Bibliothèque MCMCglmm du logiciel d'analyse de données et de statistique R

RÉSULTATS

Diversité génétique et adaptative des arbres adultes (variation spatiale et temporelle in situ)

Mélèzes

Les marqueurs microsatellites (marqueurs dits neutres, c'est à dire a priori non liés à des gènes impliqués dans l'expression de caractères adaptatifs) donnent une image de la diversité génétique le long du gradient mélèze : la migration assurée par la dissémination du pollen et des graines le long du gradient redistribue très largement les gènes à chaque génération. L'analyse de la diversité neutre met en évidence entre niveaux altitudinaux une différenciation statistiquement significative (seuil de 1 pour 1000) mais très faible ($F_{ST} = 0,0152$). Cette très faible différenciation génétique indique qu'il existe de forts flux de gènes entre les différents niveaux altitudinaux.

La très faible intensité de la structure génétique spatiale associée à la faible variation d'âge sur la placette à 1350m indique d'éventuelles interventions humaines : il est possible que les arbres de cette placette proviennent d'une régénération naturelle associée à une intervention humaine ou même d'une plantation. La placette située à 2300m possède une dynamique génétique différente, avec une forte structure génétique spatiale et la présence de faibles déséquilibres de liaison. Ces données associées à un âge moyen nettement plus jeune indiquent qu'elle est certainement le résultat d'une colonisation récente.

La dérive génétique n'a que très faiblement influencé la diversité neutre le long du gradient. Elle n'a donc pas pu modéliser significativement la variabilité phénotypique le long du gradient : la variation phénotypique est potentiellement le résultat d'adaptations locales.

L'approche microdensitométrie de la réponse des arbres au climat permet d'apprécier les variations entre années des profils décrivant la variation entre niveaux altitudinaux pour les variables des cernes. Nous avons mis en évidence une grande variabilité de formes de profils annuels inter-niveaux pour les variables de largeur de cerne, surface de cerne, largeur du bois final et densité du bois final. Les variations de la forme des profils inter-niveaux sont principalement déterminées par de fortes variations entre années particulièrement favorables et défavorables aux altitudes extrêmes. Par exemple, lorsque la température augmente, la densité du bois final augmente à 2000 et 2300 m d'altitude alors qu'elle diminue à 1350 m (Figure 2, variation moyenne entre altitudes de la densité du bois initial).

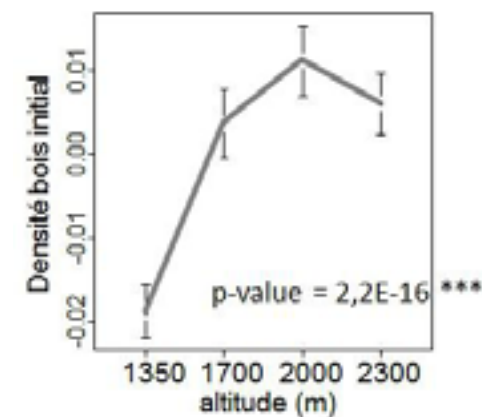


Figure 2 – Variation entre les quatre altitudes du gradient mélèze de la densité moyenne du bois initial de 41 cernes successifs (1967-2007). La valeur p-value = 2,2E-16*** signifie que les valeurs de densité du bois initial sont significativement différentes en altitudes.

L'estimation de la différenciation génétique inter-altitude, basée sur une approche dite *PST*⁶, permet de séparer les caractères phénotypiques mesurés sur les mélèzes adultes en deux groupes :

- Un groupe de caractères pour lesquels l'hypothèse d'une adaptation locale peut être raisonnablement avancée : la circonférence, la hauteur, le pourcentage d'aubier et la densité moyenne du bois initial sur la période 1967-2007 ;
- Un groupe de caractères pour lesquels nos résultats indiquent que l'action de la sélection divergente n'a pas contribué à différencier les groupes d'arbres situés à différentes altitudes : la largeur de cerne, la surface de cerne et la largeur moyenne du bois final sur la période 1967-2007.

Nos résultats montrent également un effet du réchauffement climatique sur la structure des cernes de mélèzes aux quatre altitudes du gradient : l'analyse des données Météo France de la station de Briançon met en évidence un réchauffement climatique de l'ordre de 1,5°C (moyenne annuelle de la température journalière maximale) sur la période 1967-2007. Un examen attentif de la forme de la courbe de variation de température moyenne annuelle durant cette période montre qu'il est possible de la découper en deux parties, une première période 1967-1987 plutôt fraîche et une deuxième période 1988-2007 plutôt chaude. Ce réchauffement s'observe en hiver et surtout au printemps et en début d'été mais pas en automne et au début de l'hiver. Une comparaison des cernes annuels moyens produits aux quatre altitudes durant la période 1967-1988 (fraîche) et durant la

⁶ Cette approche permet d'estimer la différenciation inter altitudes à partir de données phénotypiques seules.

période 1988-2007 (chaude) montre des différences significatives pour plusieurs de leurs caractéristiques : à toutes les altitudes le cerne moyen de la période dite chaude est significativement plus large, aussi bien dans sa partie initiale que dans sa partie finale et possède une plus forte proportion de bois final. Aux altitudes 1700, 2000 et 2300 m le bois initial est significativement moins dense et aux quatre altitudes le bois final est significativement plus dense.

Ces résultats seront complétés en 2014 et 2015 par les mesures de croissance en continu et par les analyses de micro-carottes récoltées à intervalle de temps régulier aux quatre altitudes durant toute la saison de végétation 2013. Les coupes anatomiques de toutes les micro-carottes ont été préparées durant l'année 2014 et sont actuellement en cours d'analyse dans le cadre d'une thèse.

Sapin

Des carottes de sapin ont été récoltées en 2011 et 2012, les profils microdensitométriques correspondant ont été produits en 2012 et 2013 et des analyses préliminaires de ces profils ont eu lieu en 2014. Ces analyses consistent principalement à vérifier la datation (« interdater ») des cernes à l'intérieur des séries temporelles dendro-écologiques. Les analyses se poursuivent en 2014 et 2015.

Transplantations réciproques

Mélèzes

L'installation des dispositifs de transplantation réciproque de mélèzes s'est étalée sur les quatre années du projet : en novembre 2010, après la fin de la saison de végétation a eu lieu la récolte des greffons par grimpage. En février 2011, le greffage a eu lieu à la pépinière ONF de Peyrat-le-Château dans le Limousin. Très peu de clones se sont montrés réticents au greffage. La plupart des clones ont eu besoin de deux ou trois saisons de végétation d'élevage complètes pour atteindre une taille permettant de les transplanter en toute sécurité (pépinière ONF de Peyrat-le-Château). Un petit nombre de clones a dû être regreffé début 2012. Après deux ou trois saisons d'élevage, les plants en mottes ont été transportés à Briançon juste avant le début de la saison de végétation (fin avril en 2013 et en 2014) et placés en jauge sur le gradient à 1600 m d'altitude pour s'acclimater. Puis à l'automne (début octobre en 2013 et fin septembre en 2014) ils ont été transplantés aux quatre altitudes du gradient en dispositifs expérimentaux de transplantation réciproque. Un cinquième dispositif a été planté à la pépinière administrative de Peyrat-le-Château. Il sert à la fois de conservatoire de clones pour la production de greffes et à étudier la réponse des clones au climat dans un environnement plus chaud que celui d'origine. Seuls des comptages de survie ont

eu lieu. Les premières observations et mesures, survie, croissance en hauteur et phénologie, auront lieu au printemps 2015.

Sapin

Ces résultats concernent la survie et la croissance des semis en transplantations réciproques.

Survie

La survie des plantules à cinq ans (Tableau 1) est élevée (82%) mais varie selon les sites et les altitudes de plantation, les taux les plus faibles étant observés en Vésubie et à basse altitude (50%).

Niveau \ Site	Ventoux	Issole	Vésubie
Bas	0,90	0,70	0,49
Moyen	0,89	0,77	0,69
Haut	0,97	0,89	0,75

Tableau 1 : Taux de survie des semis de sapin en fonction du site et de l'altitude de plantation.

Les trois origines géographiques (Ventoux, Issole et Vésubie) montrent des taux de survie très proches (84 %, 81 % et 82 % respectivement). En revanche les niveaux altitudinaux d'où proviennent les semences (Tableau 2) ont un effet significatif sur le taux de survie, sans pour autant qu'une relation entre survie et altitude d'origine n'apparaisse. Cet effet de l'origine est relativement stable sur l'ensemble des neuf sites/niveaux de plantations.

Niveau \ Site	Ventoux	Issole	Vésubie
Bas	0,87	0,79	0,86
Bas/moyen	0,84	0,85	
Moyen	0,84	0,76	0,76
Moyen/haut	0,85	0,79	0,79
Haut	0,75	0,82	0,82

Tableau 2 : effet de l'origine sur la survie (tous niveaux de plantations confondus)

Enfin, la variabilité du taux de survie s'exprime assez fortement entre les différentes descendance maternelles (de 61% à 92%).

Croissance

En moyenne la croissance des plantules diffère peu entre sites de plantation mais est très variable selon l'altitude. Elle est toujours plus faible à haute altitude et généralement plus forte à altitude moyenne.

Les trois origines géographiques (Ventoux, Issole et Vésubie) montrent des croissances semblables. En revanche la croissance des plantules est très variable en fonction de l'altitude d'origine des graines. Comme pour la survie, la variabilité ne correspond pas à une relation directe avec l'altitude mais semble aléatoire. D'autre part, le comportement instable de certaines origines génétiques sur l'ensemble des neuf sites-niveaux de plantations traduirait leur adaptation spécifique à des conditions particulières de milieu.

La variabilité de la croissance est également très importante entre descendance maternelles et varie du simple au double.

CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Les résultats obtenus convergent vers l'idée que les conditions sont réunies pour que des phénomènes d'adaptation locale puissent apparaître au sein de la population de mélèzes distribuée le long du gradient altitudinal. Premièrement, les analyses de dendro-écologie ont permis de mettre en évidence l'existence de variabilité phénotypique le long du gradient pour plusieurs caractères. Deuxièmement, l'analyse de la diversité neutre démontre que la variance génétique nécessaire à l'adaptation n'a pas été réduite par des processus évolutifs neutres et que la dérive génétique n'a que faiblement influencé la variabilité génétique. De plus, les résultats obtenus à l'aide de l'approche *in situ* PST permettent de suggérer l'existence d'une adaptation locale des mélèzes situés à des niveaux altitudinaux différents pour plusieurs des caractères phénotypiques étudiés (hauteur, circonférence, pourcentage d'aubier et densité du bois initial) et ce, malgré l'existence de forts flux de gènes entre les différents niveaux altitudinaux. Ainsi, notre étude suggère que l'adaptation génétique peut être un mécanisme important dans l'adaptation des arbres forestiers aux fortes variations climatiques altitudinales.

Des traces de l'effet du réchauffement climatique en cours ont été mises en évidence sur mélèze pour la période 1967-2007 (Figure 3). A toutes les altitudes, le réchauffement augmente la croissance radiale du mélèze, diminue la densité du bois initial et augmente la densité du bois final. Selon les altitudes, les conséquences de ces changements sur la densité moyenne du cerne sont faibles et variables.

Ces changements peuvent être considérés comme favorables en termes de production de bois mais auront peut-être un impact défavorable sur le fonctionnement hydraulique des arbres, notamment à basse altitude : à une densité de bois initial plus faible correspondent des cellules conductrices de sève à diamètre intérieur plus large et peut-être une plus grande vulnérabilité à la cavitation en période de sécheresse ou de forte demande en eau.

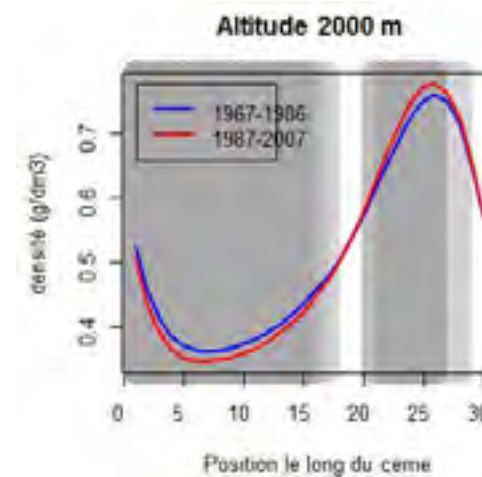


Figure 3 – Comparaison des profils moyens de cerne de mélèze formés à l'altitude 2000 m pendant la période 1967-1986 (plutôt fraîche) et pendant la période 1987-2007 (plutôt chaude). Le gris en arrière-plan indique les points du cerne pour lesquels les différences visibles sur le graphique sont significatives à 5% (gris clair), 1% (gris moyen) et 1/1000 (gris foncé).

Les résultats obtenus sur les dispositifs de transplantation croisée montrent que la provenance, l'altitude d'origine et l'altitude de plantation n'expliquent pas de façon simple la survie et la croissance des jeunes plants de sapin. Le comportement instable de certaines origines génétiques traduirait leur adaptation spécifique à des conditions particulières de milieu qui ne sont pas identifiées à ce stade.

Le projet GRAAL a permis la collecte d'une très grande quantité de données génotypiques et phénotypiques dont l'analyse commence à peine et se poursuivra au moins plusieurs années. A ce jour quatre thèses, dont une seule a été soutenue (novembre 2013, M. Nardin), sont associées à ce projet et aux autres projets qui contribuent à l'étude de ces gradients altitudinaux mélèze et sapin. GRAAL a permis l'installation et l'observation des dispositifs de transplantations croisées, outils rares et puissants pour l'analyse de l'adaptation aux variations de l'environnement, qui produiront de nouvelles données précieuses dans les années qui viennent.

APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Le projet GRAAL est un projet de recherches forestières qui associe plusieurs laboratoires de recherche et un gestionnaire forestier, l'ONE. La phase de travail de terrain associée à GRAAL a couvert les trois années du projet. L'obtention de données opérationnelles et transférables dans le contexte de GRAAL est un travail à long terme qui commence à peine à produire ses premiers résultats : les outils les plus puissants d'un point de vue statistique, les dispositifs de transplantation réciproque, commencent à donner leurs premiers résultats (sapin) et les donneront dans les années qui viennent (mélèzes).

Toutefois, dès maintenant quelques tendances se dégagent qui ont fait et feront encore l'objet de présentations et de discussions avec les gestionnaires forestiers et les porteurs d'enjeux locaux : sur mélèze et sapin, au sein d'un même versant de montagne, les flux de gènes sont forts et brassent en permanence la diversité génétique disponible. Cette diversité est redistribuée plus ou moins largement et plus ou moins fréquemment lors des épisodes de régénération naturelle, où elle est confrontée aux conditions environnementales locales du moment : si la diversité adaptative au sein de la population est suffisante, alors il est probable que des adaptations locales seront en permanence modelées et extraites de la régénération naturelle sous l'effet des pressions de sélection. Un doute subsiste actuellement concernant la pertinence de la diversité adaptative disponible à l'altitude la plus basse : il n'est pas certain que ces populations disposent d'allèles codant pour des phénotypes de caractères adaptatifs bien ajustés aux conditions environnementales de plus en plus chaudes et peut-être plus sèches rencontrées à basse altitude. Les arbres les plus exposés au changement climatique sont les arbres en place, qui subissent depuis plusieurs dizaines d'années l'augmentation de température et continueront de la subir jusqu'à la fin de leur vie. Nous montrons que ces arbres produisent des cernes à bois initial moins dense et à bois final plus dense (mélèze) : c'est une réponse plastique dont le caractère adaptatif favorable ou défavorable n'est pas encore déterminé.

Enfin en matière de gestion forestière du sapin, les premiers résultats obtenus sur les gradients des massifs du Mont Ventoux, de la forêt de l'Issole et de la Vesubie dessinent les deux recommandations suivantes : la préservation différenciée des ressources génétiques de chacun de ces trois massifs n'est pas justifiée, les pools n'apparaissant eux-mêmes pas différenciés. Le transfert de semences de bas en haut des versants ne semble pas non plus justifié, la variabilité génétique n'apparaissant pas structurée selon l'altitude.

Une à deux réunions par an de présentation du projet au personnel de terrain INRA et ONF ont été organisées. Les municipalités des communes concernées

ont non seulement fourni leur autorisation pour la réalisation des opérations de recherche, mais elles ont été également tenues au courant de l'état d'avancement des travaux et ont donné leur avis sur les modalités de mise en œuvre. Elles ont parfois fourni une assistance à la réalisation des travaux. Certains habitants des communes concernées, notamment des agriculteurs utilisateurs des forêts communales, ont été directement impliqués dans la réalisation de certains travaux. Une réunion publique d'information a été organisée avec la commune de Villard-St-Pancrace. Un article de présentation du projet a été publié dans un numéro de 2013 du bulletin municipal de Villard-St-Pancrace et un autre dans le numéro du 6 octobre 2014 du Dauphiné Libéré. Les recherches conduites sur les gradients de sapin pectiné ont fait l'objet, en juillet 2014, d'un reportage photographique de l'INRA et d'une enquête journalistique de l'agence REUTERS. Plusieurs rencontres ont eu lieu avec des responsables municipaux d'autres communes directement concernées, St-Martin-de-Queyrières et Puy-St-André. Le coordonnateur du projet a également présenté les activités de GRAAL lors d'une réunion du CREA (Centre de Recherche en Ecologie Alpine) à Chamonix le 14 juin 2012, devant un public composé de chercheurs, de gestionnaires d'espaces naturels et de particuliers intéressés par les questions traitées. Dans le cadre de la fête de la Science 2014, l'INRA PACA a tenu un atelier sur l'étude de l'adaptation locale des arbres forestiers basée sur l'analyse de gradients altitudinaux et de transplantations croisées.

LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

ARTICLES SCIENTIFIQUES

Rossi J.-P., Nardin M., Godefroid M., Ruiz-Diaz M., Sargent A.-S., Martinez-Meier A., Pâques L., Rozenberg P., 2014, Dissecting the Space-Time Structure of Tree-Ring Data Sets Using the Partial Triadic Analysis. *PLoS ONE*.

Nardin M., Musch B., Rousselle Y., Guérin V., Sanchez L., Rossi J.-C., Gerber S., Pâques L. E., Rozenberg P., "Genetic differentiation of European larch along an altitudinal gradient in the French Alps", submitted to *Annals of Forest Science*, Soumis.

Rozenberg P., Nardin M., Marin S., Guérin V., Charpentier J.-P., Sanchez L., Rossi J.-P., Gerber S., Pâques L. E., « Tree-ring response of European larch to climate warming », En préparation.

RAPPORTS

Sara Marin 2009, Etude de la variation de la réponse microdensitométrique du mélèze au climat à deux niveaux altitudinaux, Master 2 ETAH, Université d'Orléans, INRA Val de Loire.

Nathalie Mayeur 2011, Détection des dates de pullulation de la tordeuse du mélèze le long d'un gradient altitudinal par analyse microdensitométrique, conséquence sur la formation du bois, Master 2 ET, Université d'Orléans, INRA Val de Loire.

Maxime Nardin 2013, Ajustement biologique du mélèze aux variations environnementales le long d'un gradient altitudinal: approche microdensitométrique de la réponse au climat, thèse de l'université d'Orléans, ED SSBC, INRA Val de Loire.

PARTICIPATIONS AUX COLLOQUES NATIONAUX OU INTERNATIONAUX

Communications orales

Lefèvre F., Davi H., Dreyfus Ph, de Coligny F., Oddou-Muratorio S., Pichot C., 2013, Perspectives ouvertes par une approche intégrée des processus de dynamique, de fonctionnement et de diversité, le cas du Mont Ventoux. C.R.Acad. Agric. Fr., 99, n°4. Séance du 9 octobre 2013.

Lefèvre F., Oddou-Muratorio S., Pichot C., Fady B., Klein E., Davi H., Courbet, F., Dreyfus Ph., 2012, Adaptive silviculture regarding climate change: the geneticist's view. Tackling climate change: the contribution of forest scientific knowledge 21 - 24 May, 2012, Tours.

Nardin M., Pâques L., Marin S., Huard F., Sanchez L., Charpentier J.-P., Bougué B. and Rozenberg P., 2011, Plastic response to climate change in *Larix decidua* along an altitudinal gradient, Tree Rings in Archaeology, Climatology and Ecology conference, May 11-14 2011, Orléans, France.

Nardin M., Luc E., Pâques L., Sanchez L., Huard F., Charpentier J.-P., Marin S., Mayeur N., and Rozenberg P., 2012, How does climate influence the phenotypic variability of larch along an altitudinal gradient? Larch in a warm climate, the 8th international symposium of IUFRO Working Group S2.02.07 – Larch Breeding and Genetic Resources. Hallormsstad National Forest, Iceland, 11 - 13 September 2012.

Rozenberg P., Branger C., Bastien J.C., Berthier A., Bouffier L., Button C., Charpentier J.-P., Dalla-Salda G., Gaspar M. J., Gauchat M.E., Gerber S., Marin S., Martinez-Meier

A., Mayeur N., Milcent C., Nardin M., Pâques L., Ruiz-Diaz M., Sanchez L., Sergent A.S., 2012, Approche rétrospective et intégrée de l'adaptation basée sur l'étude du bois, Conférence CAQ15, 2-4 avril 2012, Nogent-sur-Vernisson, France.

Rozenberg P., Nardin M., Mayeur N., Pâques L., Sanchez L., Charpentier J.P., Roques A., Huard F., 2012, Réponse d'une forêt de montagne au réchauffement climatique: changements de croissance du mélèze durant les 40 dernières années, conférence invitée au Rendez-vous du CREA, 14-15 juin 2012 à Chamonix, France.

Nardin M., Pâques L., Sanchez L., Musch B., Guérin V., Rozenberg P., 2012, Est-ce qu'une variabilité phénotypique potentiellement adaptative peut être expliquée par des processus évolutifs non sélectifs? 34ème réunion annuelle du Groupe d'Etude de Biologie et Génétique des Populations Petit Pois Dérivé, 28-31 août 2012, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, France

Gerber S., Guérin V., Rozenberg P., Larch altitudinal gradient (Briançon, France) and some other related *Larix* stories, Alpine Forest Genomics Network Fafleralp, Lötschental, Suisse, 2014-06-26 à 28.

Poster

Latreille, A., 2014, Evaluer l'adaptation des êtres vivants à leur environnement. Fête de la science 2014, INRA PACA, Avignon, France.

Latreille A., Pichot C., Fady B., 2014, Evaluation of the adaptive potential of silver fir (*Abies alba*) along altitudinal gradients using reciprocal transplants. Le Studium Conférence: Natural and human-assisted adaptation of forests to climatic constraints: the relevance of interdisciplinary approaches, Orléans, France.

Articles de vulgarisation

Yoann Gavaille, Le Mélèzin passé au peigne fin, le Dauphiné Libéré, lundi 6 octobre 2014.

Autres

Davi H., Vauthier D., Mariotte N., Emberger C., Cailleret M., Pichot C., Fady B. 2012. Quelles ressources génétiques pour le sapin face aux changements climatiques? Forêt entreprise 204, 36-40.

P. Rozenberg, 2012, Gradiente Alpino *Larix decidua*, présentation orale lors du séminaire du groupe de génétique de l'INTA Bariloche, Argentine.

PALUCLIM
ÉMERGENCE DES VECTEURS DU PALUDISME
EN ZONE RURALE DU SAHEL ET STRATÉGIES
D'ADAPTATION, IMPACTS DES FACTEURS
CLIMATIQUES APPLICATION À LA RÉGION DE
NOUNA AU BURKINA-FASO

ASPECTS ADMINISTRATIFS ET OBJECTIFS DES RECHERCHES

ASPECTS ADMINISTRATIFS

Date d'engagement: 10/03/2011
Montant du budget: subvention de 249 400 €

Responsable scientifique du projet:

Cécile Vignolles
Centre national d'études spatiales (CNES)
18 avenue Edouard Belin, Bpi 2902, 31401 Toulouse cedex 9
cecile.vignolles@cnes.fr

Partenaires Scientifiques:

Rainer Sauerborn et Peter Dambach
Institut de santé publique de
l'Université d'Heidelberg

Christian Viel
et Jean-Michel Soubeyroux
Météo-France

Ali Sié
Centre de Recherche en Santé de
Nouna (CRSN)

Christophe Rogier
Institut Pasteur de Madagascar

MOTS CLÉS

Télé-épidémiologie, télédétection, paludisme, anophèles, risque vectoriel, changement climatique, adaptation, lutte antivectorielle, stratégie larvicide.

OBJECTIFS DES RECHERCHES

Le projet PALUCLIM a appliqué l'approche conceptuelle de télé-épidémiologie reliant climat, environnement et santé publique (CNES, 2008), au paludisme rural dans la région sahélienne de Nouna au Burkina Faso. Le projet consistait à étudier l'impact de la variabilité du climat sur le risque vectoriel, première étape biologique du risque de paludisme, et d'en analyser les conséquences sur les prévisions du risque entomologique. Les objectifs ont été les suivants:

- Produire et valider des cartes de risque entomologique de paludisme à l'échelle des villages de la région de Nouna : cartes dynamiques (spatialement et temporellement) de prédiction des gîtes larvaires et de leur productivité,
- Etudier l'impact de la variabilité du climat sur la prévision du risque de paludisme,
- Etudier la faisabilité et l'efficacité des stratégies de lutte anti-larvaire guidées par les cartes de prédiction de risque vectoriel, comme adaptation aux risques de productivité larvaire.

PRÉSENTATION DES TRAVAUX

INTRODUCTION

Le paludisme constitue un des principaux problèmes de santé publique en Afrique et plus particulièrement dans sa partie subsaharienne. Cinquante pour-cent de la population mondiale est exposée à cette maladie parasitaire transmise par la piqure de moustiques femelles infectés du genre *Anopheles*. Selon l'OMS, en 2012, 207 millions de cas de paludisme ont été enregistrés dans le monde et le nombre de décès s'élevait à 627 000. Les conséquences économiques du paludisme dans les pays endémiques, également parmi les plus pauvres de la planète, sont considérables. Le paludisme est en effet la cause majeure de pauvreté de par ses coûts directs et indirects sur les revenus des familles et sur la croissance économique de ces pays. A Nouna (Burkina Faso, zone de l'étude), la transmission du paludisme y est endémique mais avec des fluctuations saisonnières. Le complexe *Anopheles gambiae* en est le vecteur prédominant. Face à cette situation, on constate :

- le besoin des acteurs de la santé publique d'adapter leur politique de gestion et l'intérêt de mettre en place de nouveaux outils de prévision des risques face à l'émergence ou la réémergence de maladies infectieuses,
- l'importance des facteurs climatiques et environnementaux dans le déclenchement de certaines épidémies en amplifiant la dynamique de transmission et la diffusion des vecteurs porteurs des agents pathogènes,
- la difficulté de mise en place des mesures de contrôle focalisées à cause de la méconnaissance du risque à des échelles locales.

Ainsi, il existe un besoin de prévision des zones d'exposition des humains aux vecteurs du paludisme pour mettre en place des stratégies de lutte efficaces à des échelles locales.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Zone d'étude

La zone d'étude retenue est située au Nord-Ouest du Burkina Faso à la frontière du Mali dans le département de Nouna situé dans la province de la Kossi. Elle se trouve dans la zone Soudano-Sahélienne où le paludisme est endémique mais dépendant du régime des pluies. Le climat y est sahélien avec une saison des pluies allant de juin à septembre.

Des campagnes de mesures (entomologiques, météorologiques, occupation du sol, etc.) ont eu lieu pendant les saisons des pluies de 2011 et 2012 (de juin à novembre) dans chacun des dix villages retenus (Figure 1) pour l'étude afin de :

- mieux comprendre les mécanismes d'apparition, de maintien et de production des gîtes larvaires,
- mesurer la densité larvaire pour chacune des collections d'eau identifiées,
- mesurer l'abondance des anophèles adultes à l'intérieur des mêmes villages afin d'appréhender la relation hôtes vecteurs.

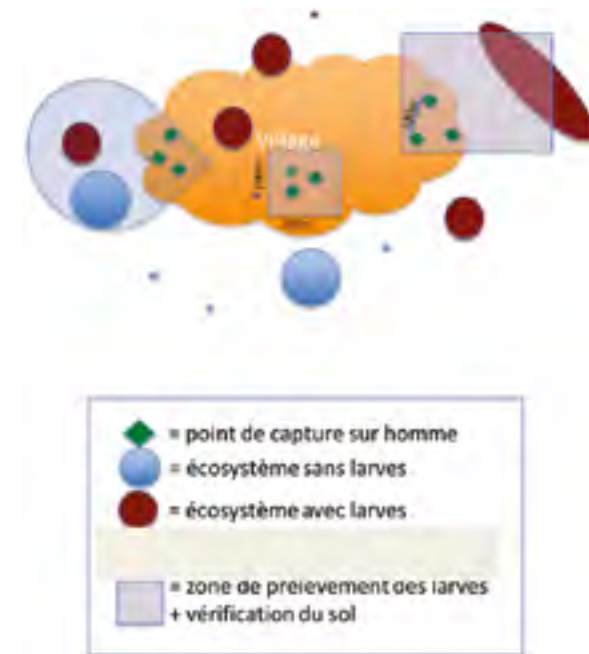


Figure 1 – Zones d'investigation pour les mesures entomologiques

La campagne 2011 (août à décembre) avait pour objectif d'obtenir les données nécessaires à l'élaboration des modèles prédictifs de productivité larvaire. La campagne de 2012 (entre juillet et décembre) avait un double objectif :

- valider les modèles entomologiques (larves et adultes) établis à partir des données de terrain de 2011 permettant l'obtention des cartes de risque vectoriel,
- démontrer qu'une stratégie larvicide ciblée basée sur les cartes de risque vectoriel à l'échelle des villages est possible (faisabilité, analyse des avantages, difficultés et limites), et vérifier qu'elle peut améliorer la situation entomologique.

Production des cartes dynamiques du risque entomologique

La méthodologie utilisée repose sur l'approche conceptuelle développée par le CNES et ses partenaires (CNES, 2008 ; Tourre et al., 2009). Elle consiste à analyser les relations "climat-environnement-santé" pour mettre en évidence les liens entre l'émergence et la propagation des maladies infectieuses (liées aux vecteurs, à l'eau et à l'air) et les changements climatiques et environnementaux en s'appuyant sur la technologie spatiale. Cette approche de recherche pluridisciplinaire appelée aussi télé-épidémiologie, couplant les sciences physiques et biologiques, permet en effet de définir les facteurs déterminants pour l'émergence et la diffusion de la maladie étudiée.

Certaines épidémies (paludisme, fièvre de la vallée du Rift, dengue...) dépendent de facteurs climatiques et/ou environnementaux dont certains peuvent être identifiés par télédétection. Les images satellites apportent donc des informations qui ne concernent pas directement les agents pathogènes (virus, bactéries, parasites) responsables de la maladie, mais leur environnement (données géographiques, météorologiques, hydrologiques...) et notamment les habitats favorables au développement et à la prolifération des vecteurs. L'apport de l'imagerie satellitaire est donc de permettre la mesure des facteurs environnementaux favorables (ou non) à l'apparition de ces maladies. Cette approche comprend trois étapes (Figure 2) :

1. Compréhension des mécanismes favorisant l'apparition et la propagation de la maladie : constituer et analyser les jeux de données de terrain nécessaires à l'identification des paramètres physiques, biologiques et socio-économiques clés associés à la maladie.
2. Développement des produits spatiaux adaptés : identification des capteurs spatiaux dont les performances (résolutions spatiale, temporelle, spectrale) sont en adéquation avec les paramètres clés identifiés précédemment et analyse des images issues de ces capteurs pour obtenir des produits spatiaux adaptés.
3. Elaboration des modèles : ajustement de modèles prédictifs par combinaison des données in situ et des produits issus du spatial afin d'établir des cartes de risque environnemental dynamiques spatialement et temporellement.



Figure 2 – Schéma de l'approche conceptuelle de télé-épidémiologie

Une première étape de la prévision du risque de maladie consiste à identifier les zones de prolifération des vecteurs car, même si les relations entre les densités de vecteurs et la prévalence des maladies ne sont pas forcément linéaires, le risque de base du paludisme est bien le risque vectoriel. La cartographie du risque d'infection peut donc se baser dans un premier temps sur l'évaluation environnementale du risque entomologique. Il est ensuite modulé par les caractéristiques des populations humaines exposées aux piqûres et fournissant le réservoir de parasites (immunité acquise, contact homme-vecteur, accès aux soins...). La télédétection fournit dans ce cadre un apport pour la cartographie des zones favorables au développement et à la survie des moustiques et l'obtention de données géo-climatiques.

L'abondance des anophèles est directement liée à la présence, la distribution et la persistance de collections d'eau. Basé sur cette connaissance, sur des travaux menés sur le paludisme urbain à Dakar (Machault et al., 2012) et sur des études préliminaires réalisées au Burkina Faso par les partenaires du projet (Dambach et al., 2009; Dambach et al., 2012), il a été décidé d'appliquer une méthodologie en plusieurs étapes : 1) cartographie des collections d'eau, sans référence à la présence ou pas de larves d'anophèles, 2) cartographie des gîtes larvaires, qui ajoute à la carte précédente la notion de présence et de densité larvaire.

Pour ces deux étapes, la cartographie est basée sur des modèles statistiques cherchant à mettre en évidence les facteurs de risque environnementaux et météoro-

logiques de i) la présence d'eau et de ii) la densité de larves dans les collections d'eau. L'ajustement de ces modèles repose sur la recherche des variables environnementales significativement associées à la variable étudiée, en s'appuyant sur des données de terrain entomologiques appropriées, sur des données météorologiques et sur des données environnementales dérivées d'images satellites d'observation de la Terre. Différentes images SPOT-5 à 2,5m de résolution spatiale, ont ainsi été acquises en 2008 et 2009 puis en 2011 et 2012 grâce au programme ISIS du CNES¹. Chaque image couvre approximativement une superficie de ~3600 km² (~60km x 60km) et est centrée sur la ville de Nouna (Figure 3). L'analyse de ces images a permis d'accéder à différentes variables environnementales telles que la présence de végétation, de zones en eau ou urbanisées en lien avec la présence d'anophèles (larves et adultes) en se basant sur le calcul de différents indices de télédétection et sur une carte d'occupation du sol obtenue par classification supervisée (méthode du maximum de vraisemblance). Des images MODIS (Moderate Imaging Spectroradiometer) ont aussi été acquises permettant d'accéder à la température de surface de jour comme de nuit.

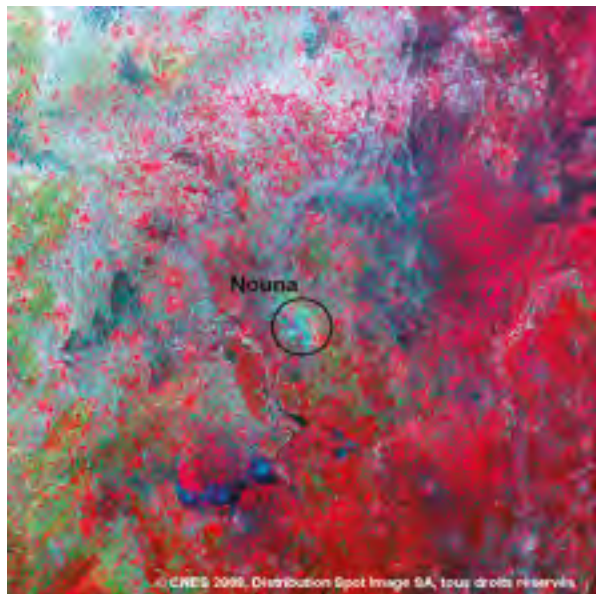


Figure 3 – Image SPOT-5 du 9 septembre 2008

¹ <http://www.isis-cnec.fr/>

Pour l'étape 1, la variable à expliquer étant une variable 0/1 (absence/présence de collections d'eau dans des carrés de 10m), des régressions logistiques ont été utilisées pour rechercher les variables environnementales significativement associées à la présence d'eau. Le pouvoir discriminant du modèle final a été évalué par le calcul de l'aire sous la courbe ROC (Receiving Operating Characteristics). L'examen visuel de la courbe ROC a permis de définir le seuil de probabilité au-delà duquel on considère vraie la présence d'eau. La prédiction de la probabilité de présence d'eau au niveau de chaque carré de 10m de la zone de 2km autour des villages a été faite en inversant le modèle statistique final.

Pour l'étape 2, la variable à expliquer étant linéaire (densité larvaire dans une collection d'eau à une date donnée), des régressions linéaires ont été utilisées pour rechercher les variables environnementales et météorologiques significativement associées à la densité larvaire. L'équation linéaire issue du modèle final a été appliquée à toutes les collections d'eau prédites à l'étape 1, grâce au calcul, des variables statistiquement associées à la densité larvaire.

Dans ces deux étapes, un effet aléatoire a été ajouté au niveau du village pour prendre en compte d'éventuelles autocorrélations spatiales. Les variables associées à la présence d'eau pour l'étape 1 et à la densité larvaire pour l'étape 2 avec une p-value < 0,25 en analyse univariée ont été retenues pour l'analyse multivariée. Une procédure de sélection *backward stepwise* a été utilisée pour sélectionner les variables. Seules les variables avec une p-value < 0,05 ont été conservées dans les modèles finaux.

Analyse du risque de paludisme en fonction de la variabilité spatio-temporelle du climat

Pour évaluer l'incidence des conditions climatiques sur le risque de paludisme dans sa globalité, il est nécessaire d'utiliser un modèle d'impact. Le modèle choisi dans cette partie s'inspire des travaux de Craig (Craig et al. 1999 ou Ermert et al., 2011), avec la modification proposée dans le cadre du projet Mapping Malaria Risk in Africa project (Tanser et al., 2003). Il consiste à calculer des indices (notés IND) de conditions favorables au développement du paludisme, avec des valeurs comprises entre 0 (état impropre, U pour « unsuitable ») et 1 (état favorable, S pour « suitable »), pour la température, les précipitations et l'humidité.

Il est admis que ce type d'indice ne peut résumer la complexité des mécanismes de la transmission, de l'infection des vecteurs et des humains et de la maladie. Les cartographies développées dans le cadre de PALUCLIM s'attachent donc à intégrer une partie de cette complexité, par la prise en compte de facteurs environnementaux aux différents stades larvaire et adulte. Au niveau des vecteurs, les facteurs environnementaux interagissent de façons complexes dépendant des espèces de moustiques et sont encore très partiellement connus. Une

telle complexité ne peut donc pas être appréhendée dans sa globalité et une simplification est indispensable. Les indices utilisés ici ne sont donc pas directement comparables, par exemple, à des mesures terrain de quantité de larves ou de moustiques adultes, ni d'agressivité. En revanche leur simplicité permet un diagnostic de l'évolution des conditions climatiques moyennes favorables à l'existence d'une transmission, toutes choses étant égales par ailleurs et pour peu que le réservoir humain de parasites la permette.

Une analyse climatique a été effectuée sur la période 1983-2011 pour la région de Nouna. Des jeux de données ont été produits en utilisant les données ARC2² pour les précipitations et ERA-interim pour les températures et l'humidité relative. Basés sur cette climatologie, et le modèle de Craig, les indices de conditions climatiques favorables à l'apparition du paludisme ont été calculés sur la même période. Ensuite, l'analyse du climat et de son impact sur le risque de paludisme a pu être réalisée aux trois échelles suivantes :

1. Variations climatiques naturelles des précipitations
2. Prévisibilité saisonnière du risque palustre
3. Vulnérabilité climatique future de la région de Nouna au paludisme

Mise en place d'une stratégie larvicide ciblée

Les objectifs de cette tâche étaient triples :

- Ajouter une approche larvicide focalisée aux mesures de contrôle actuelles.
- Montrer la faisabilité de cette approche en zone rurale.
- Évaluer l'impact sur la situation entomologique.

Il s'agissait donc de montrer que grâce aux cartes de productivité larvaires à l'échelle des villages, une stratégie larvicide peut être ciblée dans ce type de zone rurale (démonstration de la faisabilité, analyse des avantages, difficultés et limites), et de vérifier que cette stratégie peut améliorer la situation entomologique. En parallèle de la campagne de mesures entomologiques, une stratégie larvicide a donc été mise au point et testée sur 10 villages de la région de Nouna : 5 sans application de larvicide, 5 avec application de larvicide. La méthode retenue repose sur l'utilisation de la bactérie *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti) qui est un larvicide biologique dont l'efficacité et l'innocuité sont bien connues. Le contrôle des larves de moustiques avec des larvicides biologiques présente des avantages significatifs par rapport à la seule lutte contre les moustiques adultes (moustiquaires imprégnées, répulsifs, insecticides) ou la lutte contre la maladie. Les modèles entomologiques établis à partir des données de 2011 ont permis de

construire des cartes opérationnelles du risque vectoriel pour 2012 à l'échelle des villages. Les densités larvaires ont été calculées pour chacune des collections d'eau prédites pour tous les jours du 31 mai au 14 juillet 2012. La somme de toutes ces prédictions était alors considérée comme la mesure des densités larvaires à prendre en compte pour cibler l'application du larvicide. Les cartes des densités larvaires ont été générées dans des zones de 2km de rayon autour des 10 villages, pour une application effective du Bti restreinte à une zone tampon de 500m autour des 5 villages choisis pour recevoir le larvicide. Le seuil de densité larvaire était alors choisi de façon à ne traiter que 50% de la surface totale ayant été prédites comme la plus productive en larves. Les gîtes larvaires étaient ainsi classés par ordre de risque larvaire prédit, puis le seuil de 50% de la surface totale était appliqué afin de cibler les gîtes les plus à risque. Ce seuil de 50% a été choisi pour des raisons économiques et logistiques. Le but de l'intégration de cette méthode dans un projet à grande échelle, est d'optimiser le rapport coût/bénéfice.

RÉSULTATS

Production des cartes dynamiques du risque entomologique

Etape 1 : cartographie des collections d'eau

Les indices NDPI (Lacaux et al, 2007) et NDWI (McFeeters, 1996) étaient associés à la présence d'eau de façon cohérente car ils mettent en évidence de l'eau libre. La carte d'occupation du sol a aussi permis de fournir une variable permettant la détection de l'eau. Le coefficient du NDPI est négatif car cet indice diminue avec la présence d'eau. A l'inverse, le NDWI³ augmente avec la présence d'eau et est donc associé avec un signe positif. En utilisant ces variables, le pouvoir discriminant du modèle était satisfaisant.

La carte des collections d'eau résultant de l'inversion du modèle à une résolution spatiale de 10 m a été générée. On aboutit à la création de 1581 collections d'eau au total, dans les zones de 2km de rayon autour des dix villages. La figure 4 fournit un extrait de la prédiction pour le village de Goni. La carte de prédiction des collections d'eau est une carte statique, basée sur une image de saison humide à une date donnée. La carte est donc valide pour l'année de l'image, voire pour quelques années postérieures, selon l'évolution de la zone en question.

Durant l'année 2012, les visites de terrain ayant eu lieu afin de valider les cartes de prédiction des collections d'eau issues des modèles détaillés plus haut ont permis de tirer les conclusions suivantes. D'une part, 93% des collections d'eau

² ARC2 Africa Rainfall Climatology version2

³ NDPI pour Normalized Difference Pond Index et NDWI pour Normalized Difference Water Index.

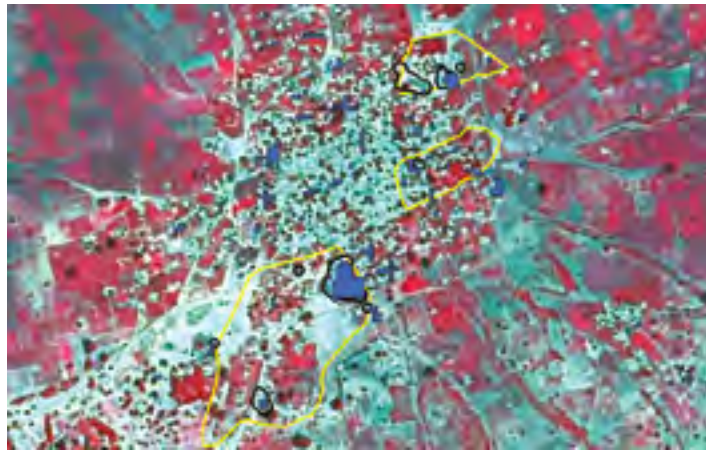


Figure 4 – Résultats de la prédiction des collections d'eau (aires en bleu, étape 1)

prédites par le modèle sont en effet des collections d'eau existant au sol. D'autre part, 75 % des collections existant réellement au sol sont correctement prédites par le modèle.

Etape 2 : cartographie des gîtes larvaires

Le NDWI McFeeters (saison humide) est associé positivement à la densité de larves. Son association avec la présence de larves d'anophèles a déjà été mise en évidence lors de la cartographie des gîtes larvaires à Dakar (Machault 2012) pour les deux raisons suivantes :

- Il était lié aux collections d'eau temporaires, plus favorables à constituer des gîtes larvaires que des collections permanentes. A Dakar les espèces vectrices du paludisme ont des préférences pour les gîtes temporaires. La distinction entre gîtes permanents et temporaires permettait donc d'obtenir une information sur les écarts de présence larvaire entre ces gîtes.
- Il était associé à la présence de sols boueux qui caractérisent des collections d'eaux persistant et donc plus susceptibles de contenir des larves. En effet, une collection d'eau doit persister suffisamment longtemps avant l'éclosion des moustiques adultes.

Dans la présente zone d'étude, les données de terrain ne permettent pas de tirer de telles conclusions mais malgré cela, il semble que l'association trouvée entre le NDWI McFeeters et la densité larvaire soit cohérente car cet indicateur a des propriétés de détection de l'eau libre.

Le cumul des pluies sur 30 jours était aussi positivement associé à la densité larvaire, en cohérence avec les résultats obtenus à Dakar. D'une part, le régime des pluies guide la disponibilité des eaux de surface nécessaires à la reproduction des moustiques. Bien que la présence d'eau ait déjà été prise en compte dans l'étape 1, la pluie pouvait, à l'étape 2, être un indicateur de la persistance des gîtes, et donc de leur propension à être des gîtes larvaires.

Le coefficient de corrélation de Spearman calculé pour valider la qualité des prédictions de densité larvaire était de 0.40, indiquant une corrélation modérée.

La carte des gîtes larvaires résultant de l'inversion du modèle ajusté lors de cette étape 2, appliqué au résultat obtenu à l'étape 1, a été générée, dans les zones de 2km de rayon autour des 10 villages de l'étude. La figure 5 fournit un extrait de la prédiction pour le village de Goni. Cette prédiction est le résultat de l'application du modèle pour toutes les dates comprises entre le 31 mai et le 24 juillet 2012. Les résultats de ces 55 prédictions étaient sommés afin de définir les 5 niveaux de risque présentés sur l'image.

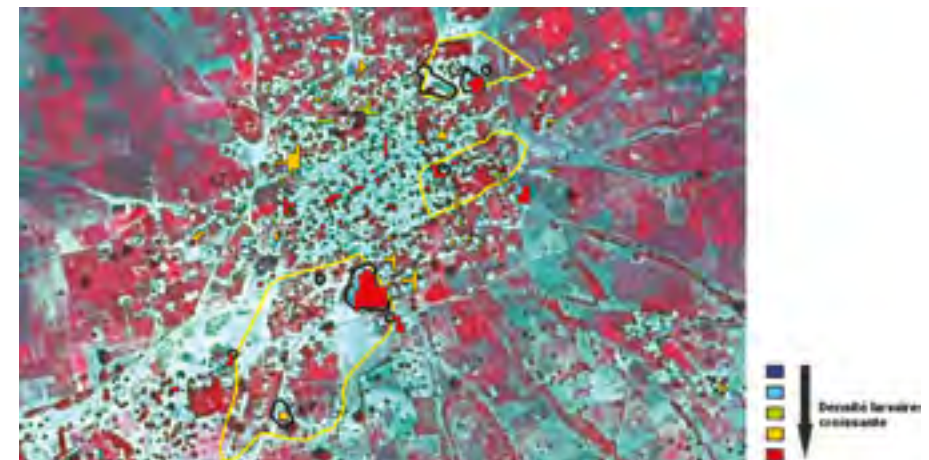


Figure 5 – Prédiction des densités larvaires d'anophèles

Analyse du risque de paludisme en fonction de la variabilité spatio-temporelle du climat

Analyse climatique du risque palustre de la période 1983-2011

La figure 6 représente la climatologie de la région de Nouna ainsi que les conditions climatiques favorables au développement du paludisme à partir desquelles, il a été possible de calculer les indices de conditions favorables au développement

du paludisme pour les précipitations (cumul mensuel), la température (moyenne mensuelle de min ou max) et l'humidité relative (moyenne mensuelle). Il ressort de l'analyse de ces indices que dans la région de Nouna, sur la période 1983-2011, la température et l'humidité relative (RH) sont toujours favorables à l'apparition du paludisme et seul le cumul mensuel des précipitations apparaît comme un facteur limitant.

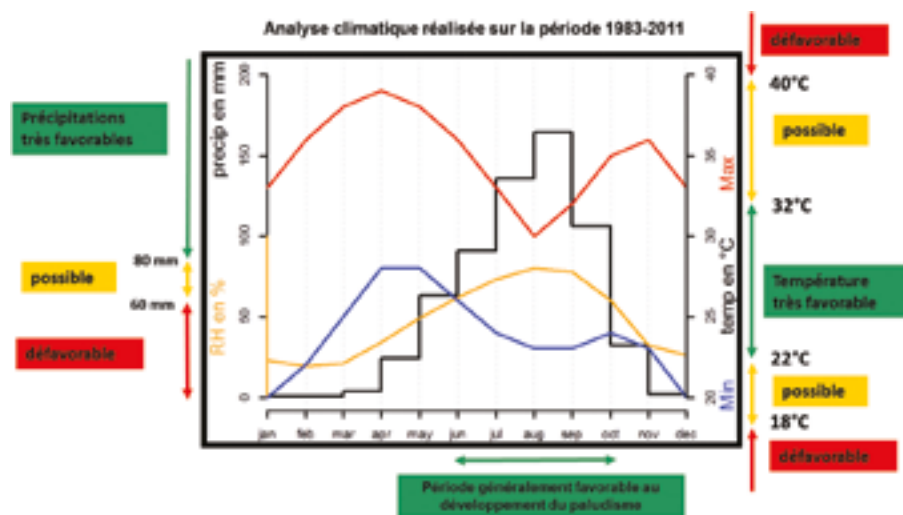


Figure 6 – Climatologie annuelle de la région de Nouna et conditions climatiques favorables au développement du paludisme

Variations climatiques naturelles des précipitations

Il est donc important, pour anticiper le risque, de connaître les influences climatiques qui font varier les cumuls de précipitations mensuels et saisonniers. Ainsi en plus de l'AMO (l'Oscillation Multi-décennale de l'Atlantique), qui est connue pour influencer les précipitations au Sahel, d'autres oscillations climatiques ont été évaluées sur les données de Nouna, au travers d'indices océaniques pour l'atlantique (NAO, NAT, SAT, TNA, TSA et indice TASI, Tourre et al., 2010) pour l'océan indien (SETIO, SWIO, WTIO et indice DMI) et pour le pacifique (NINO3.4, PDO, Zhang et al., 1997) ainsi que des indices atmosphériques (QBO, WHWP)⁴. L'analyse a consisté à calculer des corrélations décalées (décalage jusqu'à moins 9 mois) entre cette série et les indices correspondants aux facteurs à tester.

Il en ressort une forte corrélation de 0.66 (0.69) entre les précipitations de Nouna

⁴ Une description de ces indices est disponible sur le site de l'OOPC (Ocean Observations Panel for Climate) <http://ioc-goos-oopc.org/>

et l'AMO pour la séquence temporelle JAS (ASO), avec un décalage d'un mois. L'AMO⁵ a montré une tendance négative de 1960 à 1995 puis positive à partir de 1995 (Enfield et al., 2001). La tendance négative (positive) de l'AMO tend à réduire (augmenter) les précipitations au Sahel. Cette corrélation est en accord avec les deux périodes observées sur la courbe d'évolution des conditions de précipitations favorables au développement du paludisme (cf. Figure 7).

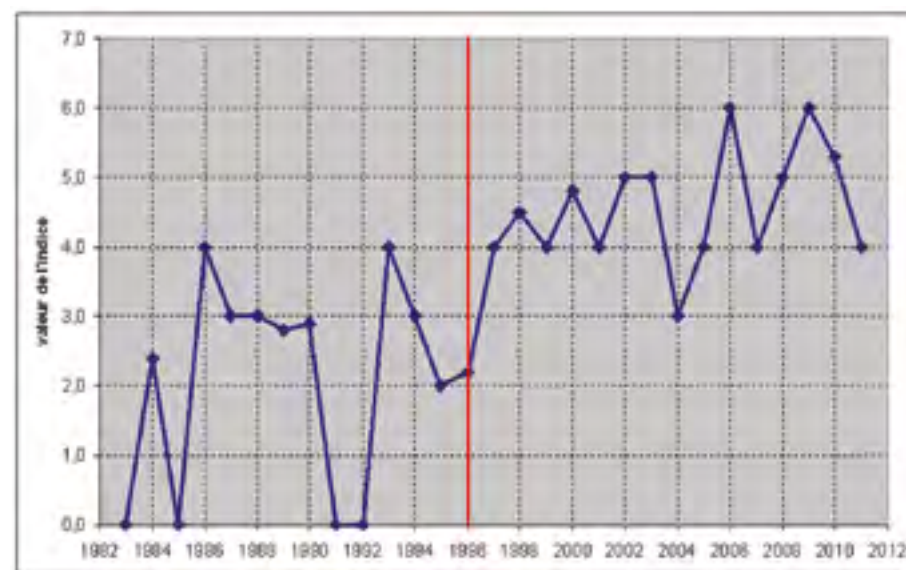


Figure 7 – Evolution de l'indice des conditions de précipitations favorables au paludisme

Prévisibilité saisonnière du risque palustre

Sur la région de Nouna, au cours de la période 1983-2011, l'indice de risque de paludisme défini précédemment montre une sensibilité au paramètre « cumul mensuel de précipitations ». La prévisibilité du dépassement du seuil mensuel de 80 mm (condition très favorable au paludisme) a donc été examinée en comparant les trois approches suivantes :

- La prévision climatologique.
- La prévision climatologique selon les phases de l'AMO.
- La prévision saisonnière à l'aide du modèle ARPEGE de Météo-France.

⁵ version décrite dans Enfield et al., 2001 ; <http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/amon.us.data>

La prévisibilité mensuelle a été évaluée, en premier lieu, en utilisant les observations de précipitations moyennées sur la zone de Nouna (période 1983-2011) pour calculer la probabilité de dépassement du seuil mensuel de 80 mm de précipitation. La prévisibilité se révèle être très bonne avec un pourcentage de prévision correcte de plus de 90% excepté pour les mois de mai, juin et septembre. La prise en compte ensuite de l'information de la phase de l'AMO a permis d'améliorer la prévisibilité des mois de juin (de 52 à 79%) et de septembre (de 69 à 76%). En revanche, celle des autres mois n'est pas modifiée par rapport à l'utilisation de la seule climatologie.

Enfin, la prévisibilité mensuelle a été étudiée en utilisant la prévision saisonnière du modèle ARPEGE. Ces prévisions ont été adaptées par une méthode statistique de régression logistique, utilisant pour prédicteurs le cumul prévu par ARPEGE et des indices climatiques (AMO et NAO). Plusieurs modèles statistiques ont été analysés considérant différentes dates d'initialisation (de mars à juin), et en prenant en compte l'AMO et/ou la NAO. Il en ressort que, quel que soit le mois d'initialisation, la meilleure prévision du dépassement du seuil de 80 mm mensuel sur la zone de Nouna (selon la valeur de l'aire sous la courbe ROC) est celle utilisant la climatologie décomposée selon les phases de l'AMO. Les modèles utilisant ARPEGE tendent à égaler la climatologie mais ils ne la surpassent pas.

Vulnérabilité climatique future de la région de Nouna au paludisme

On s'intéresse ici à la vulnérabilité future au paludisme de la région de Nouna, en termes de conditions climatiques favorables. Pour cette évaluation, des simulations effectuées dans le cadre de l'exercice de simulations du climat futur à l'échelle globale CMIP-5 ont été utilisées (Taylor et al., 2012). L'analyse s'est focalisée sur deux scénarios de forçage radiatif à savoir le RCP4.5 et le RCP8.5⁶. Une approche multi-modèles (une seule simulation par modèle) sans pondération a été employée ce qui permet d'évaluer le panel des possibilités d'évolution des conditions favorables au développement du paludisme (Knutti et al., 2010). La capacité des modèles à reproduire la valeur de l'indice de risque pour les précipitations et les températures a été montrée (ajustement individuel des données des modèles aux observations par une méthode quantile-quantile sur la période 1983-2005).

La figure 8 montre l'évolution moyenne de la valeur annuelle de l'indice des conditions favorables liées aux précipitations et aux températures. On note ainsi une forte variabilité interannuelle pour l'indice lié aux précipitations et une tendance légère, post 2040, à des conditions plus défavorables que pendant la période historique. En revanche, avant 2040, le scénario RCP8.5 semble présenter des épi-

⁶ Voir les définitions des 'Representative Concentration Pathways' RCP4.5 et RCP8.5 sur le site : <http://www.pik-potsdam.de/~mmalte/rcps/>: RCP4.5 prévoit un forçage radiatif de 4.5 W.m⁻² en 2100, une concentration de 660 eqCO₂ au niveau de stabilisation après 2100 avec une trajectoire de stabilisation sans dépassement. Le RCP8.5, quant à lui, prévoit plus de 8.5 W.m⁻² de forçage radiatif après 2100, plus de 1370 eqCO₂ en 2100 et une trajectoire croissante

sodes de conditions plus favorables plus fréquemment que le RCP4.5. Cependant, compte tenu de la très forte dispersion autour de la moyenne de l'indice lié aux précipitations, l'interprétation donnée pour ce paramètre ne peut être considérée comme très significative. A l'inverse, en ce qui concerne les indices liés aux températures, la tendance à la baisse est très prononcée, indiquant des conditions climatiques de plus en plus défavorables au développement du paludisme dans la région de Nouna. Cette forte tendance s'explique par l'évolution de la température maximale annuelle moyenne simulée par l'ensemble multi-modèle. Les scénarios RCP4.5 et RCP8.5 simulent respectivement une augmentation de la moyenne des températures maximales annuelles sur la région de Nouna d'approximativement 3°C et de plus de 5°C. Ce réchauffement, à l'échelle intra-annuelle, rapproche de plus en plus souvent les températures de la limite supérieure de 40 °C et explique ainsi la chute progressive de la valeur de l'indice « précipitations ».

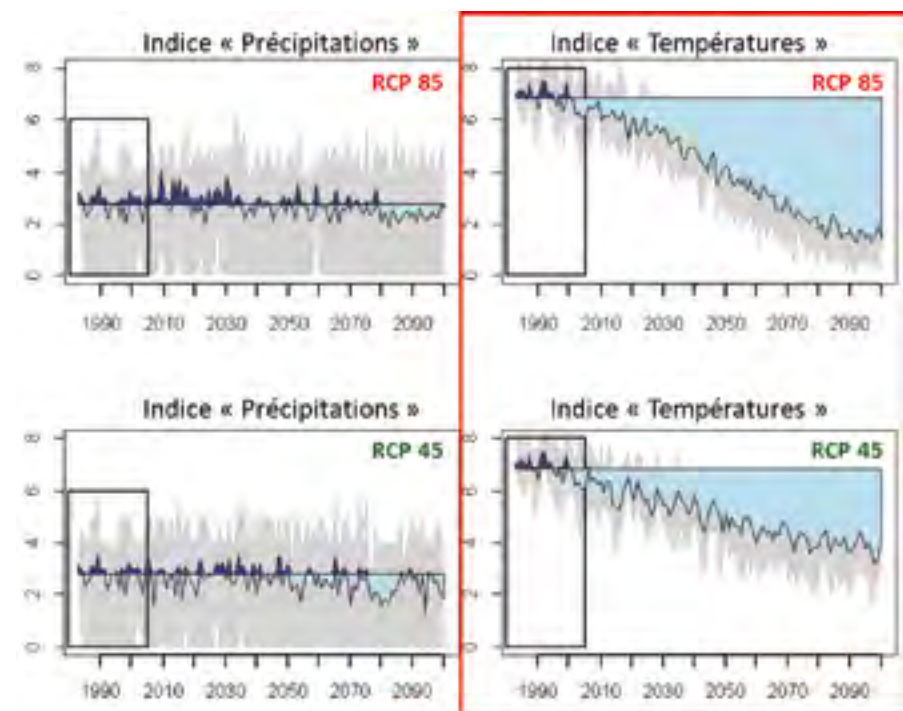


Figure 8 – Evolution moyenne (et dispersion qui l'accompagne) de la valeur annuelle de l'indice des conditions favorables de précipitation et de température au développement du paludisme de 1983 à 2100 pour les 2 scénarios de changement climatique RCP4.5 et RCP8.5. Post-2005, les évolutions sont le résultat du scénario de changement climatique RCP8.5 (haut) et RCP4.5 (bas). Les parties bleues (bleue claire) des courbes sont pour les périodes au-dessus (en-dessous) de la moyenne qui a été calculée sur la période historique 1983 à 2005.

Entre 1983 et 2011, selon le modèle de Craig, les conditions favorables ou défavorables au paludisme étaient principalement pilotées par les précipitations, qui elles-mêmes étaient très influencées par la phase de l'AMO. Les conditions de température et d'humidité relative étaient quant à elles favorables tout au long de la saison des pluies.

Selon les projections climatiques pour le 21^{ème} siècle (et les résultats préliminaires et globaux de CORDEX⁷), le contexte devrait très sensiblement évoluer. Le changement ne devrait pas concerner le risque lié aux précipitations, où les variations naturelles du climat semblent plus fortes que la tendance climatique simulée. En revanche, l'augmentation des températures devrait conduire à une réduction notable du risque. Par conséquent, selon le modèle de Craig, l'élévation de la température deviendrait le facteur limitant pour le risque palustre sur la région de Nouna, allant jusqu'à le réduire très fortement en fin de siècle par rapport à son niveau actuel.

Mise en place d'une stratégie larvicide ciblée

Comme expliqué précédemment, il s'agissait pour ce volet du projet de tester la faisabilité d'une stratégie larvicide ciblée grâce aux cartes de risque larvaire appliquée en zone rurale. Le larvicide biologique retenu était la bactérie *Bacillus thuringiensis israelensis* (Bti).

Un protocole pour trouver le dosage de Bti applicable sur les gîtes larvaires a d'abord été mis au point. Ainsi les différentes concentrations testées au cours de l'essai expérimental de 28 jours ont permis de définir qu'une application de larvicide tous les 9 à 10 jours, avec une concentration de 0,4mg/L (correspondant à 0,4kg/ha), était suffisante.

La période d'intervention larvicide s'est déroulée du 4 octobre au 19 novembre 2012. L'expérimentation devait permettre une comparaison entre les cinq villages qui ont reçu une intervention et les cinq autres qui n'en ont pas reçu et qui servaient de contrôle (villages témoins). La pulvérisation du Bti, a débuté tardivement dans la saison suite à des problèmes logistiques (larvicides livrés avec retard par le fournisseur).

Un test statistique Cochran-Mantel-Haenszel sur les rangs ($\alpha=0.05$) a été utilisé pour comparer le nombre de moustiques capturés entre les villages traités au Bti et non-traités. Le nombre de moustiques capturés entre des villages traités en fonction des cartes de risque entomologique et les villages témoins ne montre pas une diminution significative de l'abondance des vecteurs.

Les effets des applications des larvicides sur des densités vectorielles sont reportés dans de nombreuses études (e.g. Fillinger et al. 2003) ainsi que l'impact sur la réduction des cas de paludisme. Pourtant certains travaux n'ont pas trouvé d'effet en

milieu rural. Les raisons principales de l'absence de corrélation statistique peuvent s'expliquer par une période d'intervention trop courte, trop tardive. L'intervention a en effet débuté tardivement, en fin de saison des pluies 2012, période où le nombre de moustiques décroît naturellement, ce qui pourrait expliquer le faible impact du larvicide. En outre, il est possible que le choix de ne traiter que 50% des gîtes les plus productifs ait été trop bas pour mener à une diminution maximale de vecteurs. Enfin, d'autres facteurs tels que la distance de vol des moustiques, ou le non traitement de certains gîtes non prédits peuvent avoir contribué à cette absence de diminution significative du nombre de moustiques après le traitement anti-larvaire.

Il faut noter que même si au cours de cette première étude de faisabilité dans cette région, la diminution de la pression entomologique n'a pas pu être démontrée, la prise en main de cet outil innovant par les acteurs de la lutte sur le terrain a été effective et il a été démontré qu'un traitement ciblé à partir des cartes de prédiction du risque entomologique est possible.

CONCLUSIONS - PERSPECTIVES

Les partenaires du projet PALUCLIM ont mené un travail scientifique multidisciplinaire, comprenant la collecte et l'organisation des campagnes de mesures in situ, la construction d'une base de données et d'un SIG, l'analyse des images satellites, et la modélisation biomathématique du risque entomologique. Par ce travail, il a été montré :

- qu'il est possible de construire, sur la base de données satellitaires et in situ, un modèle de prédiction des gîtes larvaires permettant la mise à disposition opérationnelle de cartes dynamiques de productivité larvaire à l'échelle des villages,
- qu'il est possible de mettre en place et d'appliquer une stratégie larvicide ciblée grâce à ces cartes.

Le fait que cette stratégie larvicide n'ait pas eu d'impact sur les densités de vecteurs adultes n'est très probablement pas lié à des facteurs dépendant du processus de ciblage des interventions qui a été mis en place et ne remet pas en cause l'utilisation d'une stratégie larvaire ciblée. L'apport de ces cartes de risque entomologique a été perçu sur le terrain par les acteurs de la lutte antipaludique comme un réel outil d'aide à la décision. Si cette première étude dans la région a montré la faisabilité d'un traitement anti-larvaire ciblé s'appuyant sur ces cartes de productivité larvaire, une opération à plus grande échelle est nécessaire et prévue afin de mesurer quantitativement l'efficacité et l'efficacé d'une telle stratégie.

D'autre part, la pluviométrie étant un facteur déterminant de la densité de vecteurs (facteur pris en compte dans la construction de cartes de risque entomologique), une étude de l'évolution du risque palustre en fonction de la variabilité

⁷ <http://cordex2013.wcrp-climate.org/>

spatio-temporelle du climat a été menée. Pour évaluer l'impact des conditions climatiques sur le risque palustre dans sa globalité, il a été nécessaire d'utiliser un modèle d'impact. Le modèle retenu est une adaptation du modèle de Craig. L'analyse climatique s'est faite à différentes échelles spatio-temporelles (échelle saisonnière, échelle régionale du changement climatique, et du quasi-biennal aux basses fréquences). Il en ressort que l'augmentation des températures devrait conduire à une réduction notable du risque palustre. Par conséquent, selon le modèle de Craig, l'élévation de la température deviendrait le facteur limitant pour le risque palustre sur la région, allant jusqu'à le réduire très fortement en fin de siècle par rapport à son niveau actuel.

APPORTS AUX POLITIQUES PUBLIQUES ET ACQUIS EN TERMES DE TRANSFERT

Un des buts de ce projet était de favoriser le développement de stratégies de santé publique et environnementales locales d'adaptation utilisant les cartes de risque anophélien ou de production larvaire pour focaliser la lutte antivectorielle et maximiser son ratio coût-efficacité. La connaissance des facteurs environnementaux locaux est une partie essentielle pour les stratégies visant la réduction des risques. Comme suggéré par Yé (2005), le développement des outils de prévision et de détection précoce peut être une partie d'une stratégie complète pour aborder cette question. Tout d'abord, des modèles peuvent être employés en tant que systèmes de détection précoce pour la mise en œuvre de précautions et de mesures adéquates (Teklehaimanot et al., 2004). La préparation des centres de santé de référence pour faire face à un plus grand nombre de cas de paludisme, l'instauration de la détection active et la délivrance des traitements appropriés peuvent être des manières efficaces de réduire la morbidité et la mortalité dues au paludisme. Deuxièmement, la modélisation contribue à une meilleure compréhension de la transmission de paludisme et des facteurs environnementaux et météorologiques importants, en particulier à l'échelle locale (Yé, 2005). Troisièmement, cartographie permet d'identifier les zones à risque de paludisme et les facteurs de risque environnemental significatifs. Quatrièmement, des cartes de risque peuvent également être employées pour identifier des régions où l'éducation sanitaire est nécessaire pour réduire la création et la persistance de gîtes larvaires créés par l'activité humaine. Finalement, les cartes et modèles peuvent servir à évaluer les mesures environnementales locales destinées à réduire l'incidence du paludisme. Plus spécifiquement, les cartes de risque de paludisme peuvent être utilisées pour guider des programmes de contrôle des vecteurs efficaces par exemple par applications périodiques d'insecticide sur des gîtes larvaires ciblés. La composante tem-

porelle des modèles en association avec les cartes de risque produites par ce projet est importante pour identifier le moment propice pour de telles interventions, un élément primordial pour le contrôle des vecteurs. Par exemple, des études antérieures ayant prouvé que la transmission du paludisme est relativement basse pendant la saison sèche dans cette région, il apparaît que les efforts d'adaptation seront plus efficaces pendant la saison des pluies (Yé 2005). Cependant, l'irrégularité des facteurs climatiques tels que les précipitations, la température, le vent, l'humidité et autres peut considérablement influencer l'efficacité de telles interventions. Les facteurs environnementaux peuvent également avoir un impact significatif sur le développement larvaire des moustiques responsable du paludisme (Yé, 2005). En conséquence, les cartes de risque peuvent être un outil rentable et précis pour aider à identifier de façon optimale où et quand entreprendre des interventions de contrôle.

Si le risque vectoriel est appréhendé à des échelles locales, il est alors envisageable que les produits de la modélisation puissent être utilisés de manière concrète sur le terrain par les autorités de santé publique, comme une aide à l'application de mesures de lutte et de prévention. Ainsi deux types d'intervention de santé publique sont prévus.

• Une intervention à court terme

Les cartes développées au cours de ce projet en partenariat avec le CRSN, acteur de la lutte antipaludique dans la région de Nouna, ont permis d'identifier les zones à haut risque grâce à la prédiction de la distribution et de la productivité des gîtes larvaires d'anophèles dans les villages étudiés en se basant sur des paramètres environnementaux issus de l'analyse d'images satellitaires. A partir de ces cartes, il a alors été possible pour le CRSN, de mettre en place une stratégie larvicide ciblée, c'est-à-dire n'intervenir que sur les zones à plus haut risque. Si cette intervention à court terme a permis de montrer la faisabilité de cette lutte focalisée, elle a aussi permis à l'acteur de santé publique local de se familiariser avec ces nouveaux outils et concepts (télédétection, et télé-épidémiologie).

• Une intervention à plus long terme

L'idée maîtresse est d'utiliser de façon opérationnelle la prédiction de ces zones de distribution des vecteurs du paludisme et de contribuer ainsi à son contrôle en ajoutant une approche larvicide focalisée et guidée par ces cartes de productivité larvaire, aux mesures de contrôle actuelles. Pour cela, une étude à plus grande échelle (plusieurs dizaines de villages) est nécessaire et prévue afin de mesurer quantitativement l'efficience et l'efficacité de cette stratégie larvicide focalisée. Ensuite la sensibilisation d'autres acteurs de la santé publique dont le Ministère de la Santé pourra être effective.

LISTE DES PRINCIPALES VALORISATIONS DES RECHERCHES

ARTICLES SCIENTIFIQUES

Dambach P., Machault V., Lacaux J-P., Vignolles C., Sié A., Sauerborn R., 2012, Utilization of combined remote sensing techniques to detect environmental variables influencing malaria vector densities in rural West Africa. *International Journal of Health Geographics*, [en ligne], 11 (8), <http://www.ij-healthgeographics.com/content/11/1/8>.

Dambach P., Louis V.R., Kaiser A., Ouedraogo S., Sié A., Sauerborn R., Becker N., 2014, Efficacy of *Bacillus thuringiensis* var. *israelensis* formulation against malaria mosquitoes in Northwestern Burkina Faso. *Parasites and Vectors*, [en ligne], 7, <http://www.parasitesandvectors.com/content/7/1/371>.

Dambach P., Diboulo E., Ouedraogo S., Sauerborn R., Sié A., Louis V.R., Small scale variations in malaria vector abundance between rural villages in Burkina Faso, West Africa, *En préparation*.

PARTICIPATIONS AUX COLLOQUES NATIONAUX OU INTERNATIONAUX

Communications orales

Vignolles C., 2014, Impacts des facteurs climatiques sur la production des vecteurs du paludisme en zone rurale du Sahel et stratégies d'adaptation-application à la région de Nouna au Burkina-Faso. In: *Conférence internationale "changement climatique et sante"*, 2-3 octobre 2014, Paris-Meudon - <http://www.gisclimat.fr>.

AUTRES

Mise à disposition de la communauté des résultats de cette étude sur le site Internet d'information sur les maladies réémergentes RedGems (<http://www.redgems.eu>).

V. BIBLIOGRAPHIE

CNES, 2008, Method for tele-epidemiology. Patent pending # PCT/FR2009/050735.

Craig M. H., Snow R. W., le Sueur D., 1999, A climate-based distribution model of malaria transmission in sub-Saharan Africa. *Parasitology Today*, 15(3), 105-111.

Dambach P., Sie A., Lacaux J. P., Vignolles C., Machault V., Sauerborn R., 2009, Using high spatial resolution remote sensing for risk mapping of malaria occurrence in the Nouna district, Burkina Faso. *Global Health Action*, [en ligne], 2, DOI: 10.3402/gha.v2i0.2094.

Dambach P., Machault V., Lacaux J-P., Vignolles C., Sié A., Sauerborn R., 2012, Utilization of combined remote sensing techniques to detect environmental variables influencing malaria vector densities in rural West Africa. *International Journal of Health Geographics*, [en ligne], 11 (8).

Enfield D.B., Mestas-Nunez A.M., Trimble P.J., 2001, The Atlantic Multidecadal Oscillation and its relationship to rainfall and river flows in the continental U.S., *Geophysical Research Letters*, 28(10), 2077-2080.

Ermert V., Fink A. H., Jones A. E., Morse A. P., 2011, Development of a new version of the Liverpool Malaria Model. I. Refining the parameter settings and mathematical formulation of basic processes based on a literature review. *Malaria Journal*, [en ligne], 10(35).

Fillinger U., Knols B. G., Becker N., 2003, Efficacy and efficiency of new *Bacillus thuringiensis* var *israelensis* and *Bacillus sphaericus* formulations against *Afro-tropical anophelines* in Western Kenya. *Trop. Med. Int. Health*, [en ligne], 8(1), 37-47.

Knutti R., Abramowitz G., Collins M., Eyring V., Gleckler P.J., Hewitson B., Mearns L., 2010, Good Practice Guidance Paper on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections, Meeting Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Expert Meeting on Assessing and Combining Multi Model Climate Projections. IPCC Working Group I Technical Support Unit, University of Bern, Bern, Switzerland, 15p.

Lacaux J-P, Tourre Y.M., Vignolles C., Ndione J-A., Lafaye, M., 2007, Classification of ponds from high-spatial resolution remote sensing: Application to Rift Valley Fever epidemics in Senegal. *Remote Sensing of Environment*, 106, 66-74.

Machault V., Vignolles C., Pagès F., Gadiaga L., Tourre Y. M., Gaye A., Sokhna C., Trape J-F, Lacaux J-P, Rogier C., 2012, Risk Mapping of *Anopheles gambiae* s.l. Densities Using Remotely-Sensed Environmental and Meteorological Data in an Urban Area: Dakar, Senegal, *PLOS one*, [en ligne], 7(11).

McFeeters S.K., 1996, The use of the normalised difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425-32.

Rouse J.W., R.H. Hass, J.A. Schell, D.W. Deering, 1973, Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Third Earth Resources Technology Satellite Symposium*, December 10-14, 1973, Washington D.C, NASA SP353, Vol. 1., 309-317.

Tanser F. C., Sharp B., le Sueur D., 2003, Potential effect of climate change on malaria transmission in Africa. *The Lancet*, 362, 1792-1798.

Taylor K. E., Stouffer R. J., G. A. Meehl G. A., 2012, An overview of CMIP5 and the experiment design. *Bulletin of the American Meteorological Society*, [en ligne], 485-498.

Teklehaimanot H. D., Schwartz J., Teklehaimanot A., Lipsitch M., 2004, Weather-based prediction of *Plasmodium falciparum* malaria in epidemic-prone regions of Ethiopia II. Weather-based prediction systems perform comparably to early detection systems in identifying times for interventions. *Malaria Journal*, [en ligne], 3(44).

Tourre Y.M., Lacaux J-P, Vignolles C., Lafaye M., 2009, Climate impacts on environmental risks evaluated from space: The case of the Rift Valley Fever and its conceptual approach. *Global Health Action*, [en ligne], 2, DOI: 10.3402/gha.v2i0.2053.

Tourre Y. M., Paz S., Kushnir, Y., 2010, Low-frequency climate variability in the Atlantic basin during the 20th century. *Atmospheric Sciences Letters*, [en ligne], 11(3), 180-185.

Xu H., 2006, Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 27(14), 3015-33.

Yé Y., 2005, Incorporating Environmental factors in Modelling Malaria Transmission in under five children in Rural Burkina Faso, Inaugural Dissertation to attain the degree of Doctor scientiarum humanarum (Dr. Sc. Hum.) at the Medical Faculty of Ruprecht-Karls-University Heidelberg.

Zhang Y., Wallace J.M., Battisti D.S., 1997, ENSO-like Interdecadal Variability: 1900-93. *Journal of Climate*. [en ligne], 10 (5).

ISBN : 978-2-914770-07-1
Dépôt légal : octobre 2015
imprimé en France par Veoprint