



MANUEL N°6
Séminaire tenu à Lecce, Italie
9 - 20 mars 2015

Une initiative Euro-Méditerranéenne :
pour des sociétés résilientes
au climat et sobres en carbone



Descendre l'échelle de la modélisation climatique
pour des informations climatiques et une évaluation
d'impact à haute résolution



Projet financé par
l'Union Européenne



Projet implementé par
AGRICONSULTING CONSORTIUM
Agriconsulting Agrer CMCC CIHEAM-IAM Bari
d'Appolonia Pescares Typsa Sviluppo Globale



MENTION LÉGALE

Les informations et opinions contenues dans le présent document sont celles de ses auteurs, et ne représentent pas nécessairement la position officielle de l'Union européenne sur les questions qui y sont traitées. L'Union européenne ne saurait être tenue responsable, pas plus que ses institutions et organes, ni quiconque agissant en leur nom, de l'usage qui pourrait être fait des informations contenues dans le présent document.

Rédaction : l'équipe ClimaSouth, avec la contribution précieuse de Neil Ward (auteur de référence), E. Bucchignani, M. Montesarchio, A. Zollo, G. Rianna, N. Mancosu, V. Bacciu (experts du Centre de supercalcul euro-méditerranéen pour les changements climatiques (CMCC)), et M. Todorovi (de l'Istituto Agronomico Mediterraneo di Bari (IAM-Bari)).

Conception : G.H. Mattravers Messana

Modèle graphique : Zoi Environment Network

Graphisme et mise en page : Raffaella Gemma

Directeurs de projet du Consortium Agriconsulting: Ottavio Novelli / Barbara Giannuzzi Savelli

Chef d'équipe ClimaSouth : Bernardo Sala



AVANT-PROPOS

La région méditerranéenne a été classifiée en tant que zone à risque en termes de changements climatiques par le Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). La plupart des pays de la région souffrent déjà d'une élévation de la température, d'une pénurie d'eau croissante, de la fréquence accrue des sécheresses et des feux de forêt, ainsi que de l'intensification des phénomènes de désertification. La réalité qui s'impose aujourd'hui dans la région méditerranéenne est le besoin impératif de lutter contre les changements climatiques en adoptant des mesures d'atténuation mais aussi d'adaptation. Des mesures qui pourraient également s'avérer des opportunités de développement économique, tout particulièrement dans une optique de développement bas carbone.

Le projet ClimaSouth, financé par l'Union européenne (UE), appuie l'adaptation aux changements climatiques et l'atténuation de ses effets dans 9 pays du Sud de la Méditerranée, à savoir, l'Algérie, l'Égypte, Israël, la Jordanie, le Liban, la Libye, le Maroc, la Palestine et la Tunisie. Le projet aide les pays partenaires et leurs administrations dans leurs efforts de transition vers des sociétés à faible intensité en carbone tout en développant une résilience climatique et en favorisant des opportunités de développement économique et d'emploi durables. Ce projet entend également promouvoir la coopération Sud-Sud et le partage d'informations sur les questions liées aux changements climatiques dans la région, ainsi qu'un dialogue et partenariat plus étroits avec l'Union européenne.

Dans le cadre de ses efforts d'amélioration de la planification stratégique en matière de changements climatiques, le projet ClimaSouth produit une série de manuels adaptée aux besoins de la région sud-méditerranéenne. Ces manuels, basés sur des séminaires entre pairs organisés par le projet, sont

conçus pour aider les administrations nationales à développer et mettre en œuvre des politiques sur les changements climatiques ; de plus, ils aident les acteurs de la région à participer plus efficacement au cadre mondial de lutte contre les changements climatiques. Les utilisateurs principaux ciblés par les manuels ClimaSouth comprennent les départements gouvernementaux compétents aux niveaux opérationnel et politique, les équipes et comités consacrés aux changements climatiques, les décideurs, les services météorologiques, les membres de gouvernements locaux, le secteur privé et la société civile.

Ce sixième manuel capitalise sur le manuel (n° 2) produit par l'équipe ClimaSouth à l'issue du séminaire de Lecce d'avril 2014, « Améliorer les informations sur le climat », et s'attache tout particulièrement sur le double processus de descente d'échelle et de traduction des connaissances sur le climat en informations concrètes susceptibles de soutenir l'adaptation sur le terrain. Les modélisations climatiques en descente d'échelle sont essentiellement présentées dans le cadre d'une démarche de descente d'échelle dynamique, tandis que les prévisions saisonnières reposent sur une suite de techniques mises en œuvre en descente d'échelle statistique. Ces démarches respectives – dynamiques et statistiques – sont illustrées à l'appui de différents exemples. Nous espérons que ce manuel contribuera à optimiser les savoirs et savoir-faire en matière de descente d'échelle des prévisions saisonnières et des scénarios de l'évolution climatique mondiale en Méditerranée du Sud.

En vous souhaitant une lecture tout à la fois informative et intéressante,

Nicola Di Pietrantonio

Commission Européenne
Direction générale du voisinage et
des négociations d'élargissement (DG NEAR)

Matthieu Ballu

Commission Européenne
Direction Générale Action
pour le climat (DG-CLIMA)

MANUELS CLIMASOUTH

- Manuel N. 1 : Développements clés dans les politiques de lutte contre les changements climatiques
- Manuel N. 2 : Améliorer les informations sur le climat
- Manuel N. 3 : Introduction aux inventaires nationaux d'émissions de gaz à effet de serre (GES) - Mesure, Notification, Vérification (MNV)
- Manuel N. 4 : Planification à long terme des énergies de substitution (logiciel LEAP) et modélisation des Gaz à effet de serre (GES)
- Manuel N. 5 : Stratégie de développement bas-carbone (LEDS)
- Manuel N. 6 : Descendre l'échelle de la modélisation climatique pour une évaluation d'impact à haute résolution
- Manuel N. 7 : Mettre en relation la descente d'échelle, les impacts et le développement de stratégies d'adaptation

SOMMAIRE

- Mention légale..... 2
- Avant-propos 3
- Liste de certains acronymes..... 5

- 1. INTRODUCTION 7**
- 2. DESCENTE D'ÉCHELLE DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION CLIMATIQUE 9**
 - 2.1 Introduction et présentation des concepts de « descente d'échelle dynamique 9
 - 2.2 Projections d'évolution climatique dans la zone visée par le projet ClimaSouth 11
 - 2.3 Exemple de résultats de descente d'échelle dynamique 12
 - 2.4 Exercices de mise en pratique de la descente d'échelle dynamique 13
 - 2.5 Descente d'échelle statistique de scénarios d'évolution climatique à l'échelle régionale à des fins d'étude d'impact 15
 - Discussion méthodologique 15
 - Mise en œuvre de méthodes de correction des biais de la descente d'échelle (à l'appui d'exemples et exercices pratiques) 16
- 3. DESCENTE D'ÉCHELLE DE DONNÉES DE PRÉVISIONS CLIMATIQUES SAISONNIÈRES 19**
 - 3.1 Introduction aux prévisions climatiques saisonnières et aux démarches de descente d'échelle 19
 - 3.2 Présentation générale des concepts de « descente d'échelle statistique » et application aux prévisions saisonnières 21
- 4. CONCEPTS ET EXEMPLES D'UTILISATION DE DONNÉES CLIMATIQUES À HAUTE RÉOLUTION (EN DESCENTE D'ÉCHELLE) À DES FINS D'ÉTUDES D'IMPACT 26**
 - 4.1 Difficultés rencontrées dans l'évaluation des impacts climatiques à haute résolution 26
 - 4.2 Différentes utilisations des données à haute résolution sur l'évolution du climat pour la planification et la prise des mesures d'adaptation 27
 - 4.3 Exemples d'études d'impacts à haute résolution des changements climatiques 28
 - Secteur agricole 28
 - Secteur sylvicole 30
 - 4.4 Évaluer les implications d'impacts à haute résolution d'une prévision saisonnière 32
- 5. CONCLUSIONS 33**
- 6. SOURCES EN LIGNE 34**
- 7. RÉFÉRENCES 36**

LISTE DE CERTAINS ACRONYMES

RE4	4 ^e Rapport d'évaluation du GIEC
RE5	5 ^e Rapport d'évaluation du GIEC
CDO	<i>Données Climatiques Operators</i> – outil de traitement des données climatiques
FDC	Fonction de Densité Cumulative
CMCC	Centre de supercalcul euro-méditerranéen pour les changements climatiques
COSMO-CLM	Modèle de prévision météorologique opérationnel non-hydrostatique appliqué et développé par les services météorologiques nationaux joints au consortium COSMO (Consortium for Small scale MOdelling)
CORDEX	Projet expérimental de simulation climatique à l'échelle régionale – <i>COordinated Regional climate Downscaling Experiment</i>
OPC	Outil de prévisibilité climatique
MDVP	Modélisation de la dynamique de la végétation à l'échelle de la planète
CEPMMT	Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme
ERA	Réanalyse intérimaire réalisée par le CEPMMT
EURO-CORDEX	CORDEX – Europe
MCG	Modèle de circulation générale
GES	Gaz à effet de serre
IAM-Bari	Istituto Agronomico Mediterraneo di Bari
GIEC	Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat
MED-CORDEX	CORDEX – Méditerranée
MENA-CORDEX	CORDEX - Moyen-Orient Afrique du Nord

MOS	<i>Model Output Statistics</i> – statistiques de sortie de modèle
PCR	Régression sur composantes principales
FDP	Fonction de densité de probabilité
MCR	Modèle climatique régional
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> – profil représentatif d'évolution de concentration
SIMETAW	<i>Simulation of Evapotranspiration of Applied Water</i> – simulation de l'évapotranspiration de l'eau appliquée
SMHI	Institut suédois de météorologie et d'hydrologie
TSM	Température de la surface de la mer
PMRC	Programme mondial de recherches sur le climat
LI	Lien Internet

1. INTRODUCTION

ClimaSouth a organisé un atelier à Lecce (Italie), du 9 au 20 mars 2015, en collaboration avec le Centre de supercalcul euro-méditerranéen pour les changements climatiques (CMCC). L'objectif de cet atelier était d'optimiser les savoir et savoir-faire en matière de descente d'échelle des données de modélisation climatique à des fins d'études d'impacts climatiques à haute résolution destinées à soutenir les mesures d'adaptation. Cet objectif a été atteint grâce à une première phase intensive (1,5 semaine) entièrement consacrée aux concepts de descente d'échelle de données climatiques et à leur mise en œuvre, suivie d'une seconde phase (3 jours) au cours de laquelle ces concepts ont été discutés à l'appui d'exemples concrets de l'utilisation des données climatiques à haute résolution dans les études d'impacts et les mesures d'adaptation. Un expert des questions de climat de chaque pays avait été invité à participer à l'ensemble de ce programme de 2 semaines, et un représentant sectoriel de chaque pays avait été invité à rejoindre l'atelier à la seconde phase (3 derniers jours) consacrée aux impacts. L'atelier s'est concentré tout particulièrement sur le secteur de l'agriculture/ la sylviculture et le secteur de l'eau.

Cette initiative était née à l'issue de discussions lors de l'atelier régional ClimaSouth d'avril 2014 à Lecce, « Améliorer les informations sur le climat » (voir l'e-manuel ClimaSouth n° 2¹¹). La capacité à produire des données

climatiques en descente d'échelle a été reconnue comme étant une lacune significative dans le processus de traduction de nos connaissances sur le climat en informations concrètes susceptibles de soutenir l'adaptation sur le terrain. L'atelier de 2014 s'était terminé sur le constat qu'une gestion améliorée de l'adaptation devait impérativement s'appuyer sur un éventail de données climatiques en descente d'échelle telles que la surveillance en temps réel, les



prévisions saisonnières et des scénarios de l'évolution climatique mondiale. De plus, l'atelier avait conclu qu'améliorer les savoir et savoir-faire dans la région visée par le projet ClimaSouth en matière de descente d'échelle des prévisions saisonnières et de scénarios de l'évolution climatique mondiale était un élément crucial.

C'est ainsi que l'atelier de mars 2015 sur la descente d'échelle des données de modélisation climatique dont rend compte le présent manuel a été consacré à ces prévisions et scénarios (dans le présent manuel, voir section 2, Descente d'échelle des scénarios d'évolution climatique, et section 3, Descente d'échelle de données de prévisions climatiques saisonnières).

L'atelier d'avril 2014 avait également abouti au constat que les démarches dynamiques et statistiques de la descente d'échelle avaient, les unes comme les autres, un rôle important à jouer. Par souci d'équilibre de notre présentation, la descente d'échelle des scénarios d'évolution climatique (section 2) est essentiellement présentée dans le cadre d'une démarche de descente d'échelle dynamique (et de correction des biais), tandis que les prévisions saisonnières (section 3) reposent sur une suite de techniques mises en œuvre en descente d'échelle statistique. Néanmoins, comme l'illustrent les discussions contenues dans ces deux sections, ces démarches respectives, dynamiques et statistiques, peuvent être efficacement mises en œuvre dans le contexte des données d'évolution climatique mondiale autant que dans le contexte des données de prévisions saisonnières. La section 4 reprend certains des concepts et exemples dont il

a été discuté dans le module Impacts de l'atelier.

Cette initiative contribue à la structure du projet ClimaSouth par l'amélioration et l'analyse des données climatiques pertinentes pour l'adaptation (Activité du projet 3.1.1), tout en se concentrant également sur l'utilisation des données en descente d'échelle dans les études d'impacts et en discutant options d'adaptation (Activité du projet 3.1.3). L'atelier avait été conçu de sorte à optimiser la coopération régionale, à l'appui de formations conjointes, du partage des expériences et d'exercices pratiques sous la forme d'études de cas. Le présent manuel s'adresse avant tout aux professionnels techniques et aux décideurs ayant des compétences techniques avancées des pays du projet ClimaSouth. Son objectif est de faciliter les échanges et l'action en matière d'optimisation des données climatiques à haute résolution dans chaque pays, vers l'amélioration des stratégies d'adaptation nationales.

L'équipe du projet ClimaSouth tient à remercier les intervenants qui ont contribué au succès de cet atelier, et tout particulièrement les experts du CMCC (les experts climat E. BUCCHIGNANI, M. MONTESARCHIO, A. ZOLLO, et les experts impacts G. RIANNA, N. MANCOSU V. BACCIU) et notre invité, expert en impacts agricoles, M. TODOROVIC (IAM-Bari). Outre la contribution précieuse de ces experts scientifiques, l'apprentissage et les enseignements apportés par les exercices pratiques prévus dans le cadre de l'atelier ont été rendus possibles par l'équipe informatique du CMCC qui a fait preuve d'une grande attention et d'un soutien diligent des participants.

2. DESCENTE D'ÉCHELLE DES SCÉNARIOS D'ÉVOLUTION CLIMATIQUE

2.1 Introduction et présentation des concepts de « descente d'échelle dynamique »

Le réchauffement du système climatique de ces dernières décennies est évident d'après les observations qui en sont faites, et principalement imputable à l'augmentation de la concentration des gaz à effet de serre (GES) d'origine anthropique (GIEC 2013). En conséquence, le taux de précipitation sera également modifié, en partie du fait qu'une atmosphère plus chaude contiendra plus de vapeur d'eau, entraînant des pluies plus fortes. En outre, ces processus donneront lieu à des sécheresses accrues dans certains endroits, dues en partie à une plus grande absorption d'eau du sol et de la végétation.

Le principal outil d'appréhension et de connaissance des changements climatiques futurs possible est la modélisation climatique. Les modèles climatiques sont des logiciels de modélisation climatique qui simulent le comportement des systèmes terrestres à l'appui des lois fondamentales de la physique.

Plus spécifiquement, les modèles de circulation générale (MCG) qui simulent la dynamique climatique à l'échelle de la planète constituent ainsi un instrument puissant de simulation de la réponse du système climatique mondial aux forces externes (Giorgi 2005).

Toutefois, de manière générale, les MCG ne sont pas adaptés à la simulation du climat local étant donné qu'ils se caractérisent actuellement par des résolutions généralement voisines de 100 km, voire plus grossières, alors que bon nombre de phénomènes importants surviennent à des échelles spatiales inférieures à 10 km. De plus, les MCG ne rendent pas compte de manière adéquate des variations de la végétation, de topographies et zones littorales complexes, qui sont d'importants aspects de la réponse physique qui régit le signal de changements climatiques régionaux/ locaux. C'est ainsi qu'ont été mises au point des techniques de descente d'échelle qui utilisent les prédictions à grande échelle fournies par un MCG et mettent en œuvre des méthodes permettant d'extraire les informations implicites sur les changements climatiques à des échelles plus régionales/ plus locales.

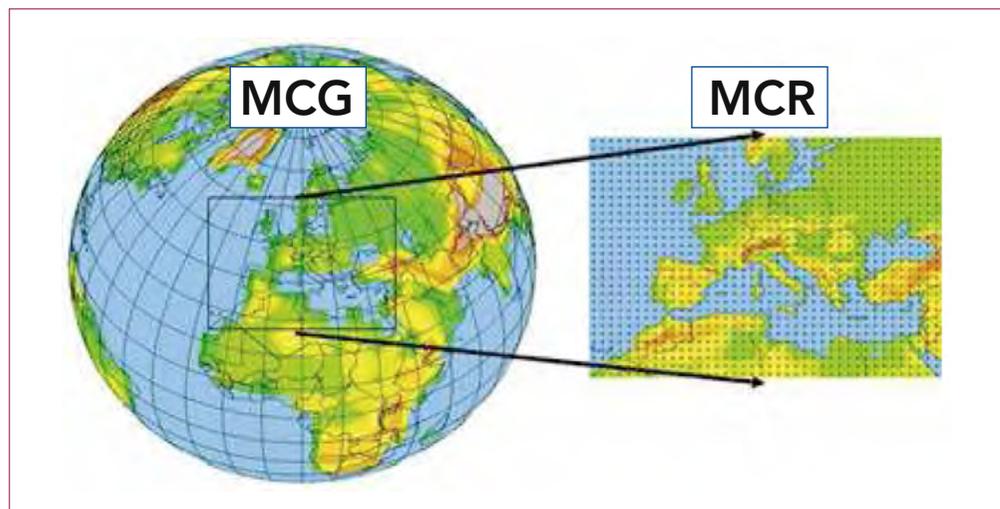


Figure 1. Représentation schématique de la technique de descente d'échelle dynamique.

Les méthodes de descente d'échelle peuvent se diviser en deux grandes catégories : les méthodes statistiques, qui appliquent les transformations aux données de sortie du MCG, à l'appui des relations calculées à partir d'observations à haute résolution, et les méthodes dynamiques, qui résolvent explicitement la dynamique physique basée sur des processus du système climatique régional à haute résolution spatiale, lorsqu'elles sont entraînées par le forçage à grande échelle et basse résolution du MCG. L'un des outils les plus efficaces, qui fournit une analyse climatique à haute résolution par une descente d'échelle dynamique, est le modèle climatique régional (MCR) (Giorgi et Mearns 1991). Les MCR ont souvent la capacité de fournir une description précise de la variabilité climatique à l'échelle locale (Figure 1). De plus, les MCR sont en mesure de fournir une description détaillée de conditions climatiques extrêmes, en ce inclus des données statistiques sur les phénomènes météorologiques extrêmes (Rummukainen 2010).

Les capacités de la génération actuelle de MCR ont été évaluées dans le cadre de plusieurs projets internationaux. Ces dernières années ont vu la mise en place du projet expérimental de simulation climatique à l'échelle régionale du PMRC (CORDEX^{L12}) (Giorgi et al. 2009), qui a vocation à coordonner à l'échelle mondiale la descente d'échelle régionale des données climatiques vers l'amélioration des politiques d'adaptation aux effets des changements climatiques et des études d'impacts. Naturellement, la descente d'échelle dynamique présente également certains inconvénients : ainsi, il s'agit d'une méthode coûteuse en moyens de calcul, qui s'appuie sur des installations informatiques de grande taille, et hautement dépendante des conditions limites fournies par les MCG (si une simulation à grande échelle produite par un MCG contient des erreurs,

ces erreurs seront transférées dans les données de sortie du MCR ; ce concept s'appelle en anglais « garbage in–garbage out », que l'on peut traduire par « données inexactes, résultats erronés ».) Par ailleurs, les MCR (à l'instar des MCG) contiennent des programmes de paramétrage semi-empiriques comme pour la convection : l'hypothèse est donc obligatoirement posée que ces programmes de paramétrage seront encore valables dans un climat futur. Autre contrainte : la résolution spatiale de la plupart des modèles de la génération actuelle est limitée à environ 1 km, notamment au regard de la quantité phénoménale de ressources informatiques et de calculs requise pour les grilles plus fines, mais également en raison de l'absence de modèles numériques adaptés pour certains processus avec de telles valeurs de résolution.

Les MCR doivent être validés relativement à des jeux de données d'observation afin d'évaluer la capacité du modèle à reproduire les conditions climatiques actuelles. Ce qui permet ensuite d'en définir les déficiences, provenant des diverses hypothèses de modélisation et de leurs incertitudes liées. Deux types de données différents peuvent être utilisés comme conditions initiales et limites d'un MCR pour évaluer sa capacité à simuler le climat actuel : (i) la réanalyse et (ii) les MCG qui étaient entraînés par le forçage radiatif actuellement observé des GES. Les réanalyses le plus couramment utilisées pour produire des simulations en MCR sont les ERA-InterimHyp^{L3}, les dernières réanalyses intérimaires atmosphériques mondiales produites par le Centre européen pour les prévisions météorologiques à moyen terme (CEPMMT). Les réanalyses représentent nos meilleures estimations du climat observé à grande échelle à un moment donné ces dernières années, ceci du fait qu'elles reposent sur des observations réelles du système climatique. Les ERA-Interim sont disponibles depuis 1979, et constamment actualisées en temps réel. Le recours à la réanalyse en tant que conditions initiales et limites des MCR permet d'évaluer la capacité du MCR à reproduire les plus importantes caractéristiques climatiques d'une région particulière. Les MCG (avec le forçage radiatif actuel des GES) ne sont pas contraints par des observations atmosphériques durant leur intégration, et, de ce fait, sont susceptibles de développer des erreurs systématiques (dérive) qui peuvent contribuer à des erreurs dans les MCR qu'ils entraînent. Néanmoins, ces expérimentations sont importantes car elles apportent une base à laquelle

comparer les expérimentations en MCR entraînées par des projections de changements climatiques en MCG (scénarios GIEC), et, de cette manière, les MCR produisent des estimations à haute résolution de projections de changements climatiques.

L'une des grandes sources d'incertitude des MCR provient du grand nombre de processus physiques paramétrés dans le modèle climatique et les paramètres du modèle non limités associés. Plusieurs études ont montré l'importance de cette « incertitude de paramètres » pour la simulation des climats actuels et futurs, en perturbant des paramètres de modèles uniques et multiples dans des fourchettes de paramètres plausibles déterminées par des experts (Giorgi et Mearns 1991). Puisque des paramètres incertains sont responsables d'une grande partie des erreurs de modélisation, l'incertitude de paramètres est généralement contenue par des méthodes de calibrage ou de réglage destinées à améliorer l'interface entre le modèle climatique et les données d'observations disponibles. Ce processus de réglage fait partie des aspects qui demandent des compétences techniques hautement spécialisées pour pouvoir garantir une mise en œuvre et une exploitation efficaces du MCR.

2.2 Projections d'évolution climatique dans la zone visée par le projet ClimaSouth

La zone visée par le projet ClimaSouth se situe dans une zone de transition entre les climats arides de la région saharienne d'Afrique du Nord / du Proche-Orient et les

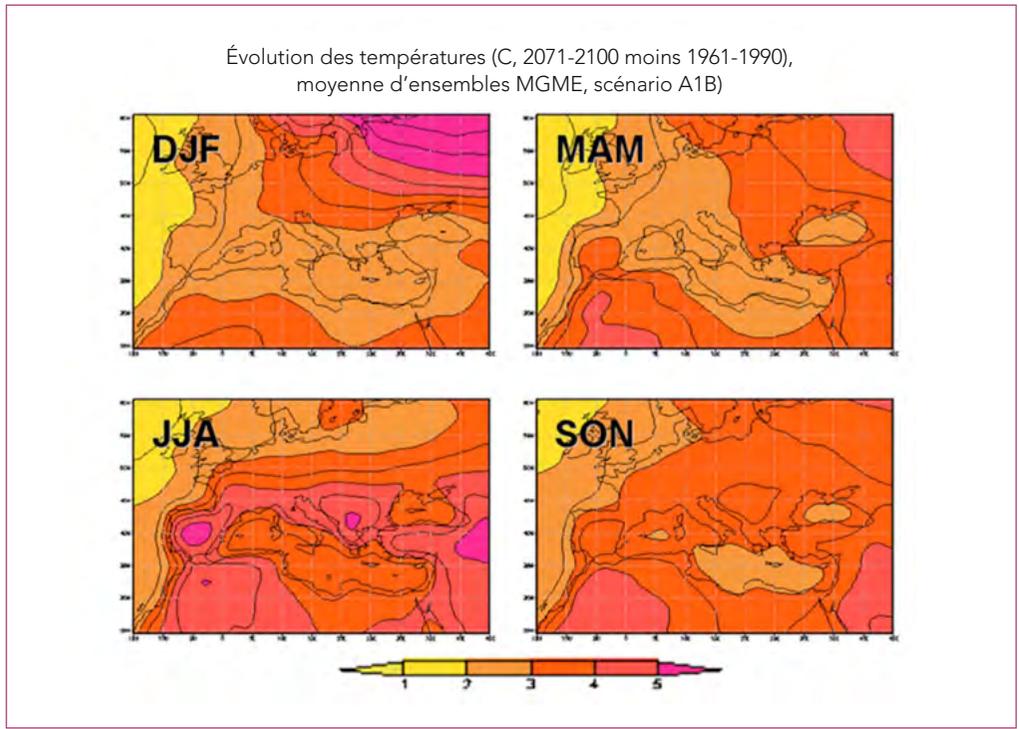


Figure 2. Évolution des températures pour les quatre saisons (2071-2100 moins 1961-1990), moyenne d'ensembles, scénario A1B (d'après Giorgi et Lionello 2008)

climats tempérés d'Europe centrale. Elle est affectée par des interactions entre processus de latitudes moyennes et processus tropicaux. Anticiper les changements climatiques dans cette région se complique encore par la présence d'une mer intercontinentale majeure, quasiment fermée (la Méditerranée) qui présente une circulation thermohaline très active, et un lien avec l'océan atlantique par le détroit de Gibraltar. Toutefois, il est d'ores et déjà très clair que la région méditerranéenne dans son ensemble est très sensible aux changements climatiques induits par l'augmentation de la concentration des GES, et elle est considérée comme une zone à risque en matière de changements climatiques futurs : l'on s'attend à y assister à des impacts importants sur la société, notam-

ment sur l'agriculture, le tourisme et les ressources en eau. De nombreuses projections d'évolution climatique MCG en Méditerranée ont été analysées dans le cadre de différents scénarios de forçage radiatif des GES, et nombre d'entre elles sont en accès ouvert^{L14, L15}. Une représentation relativement consistante a peu à peu émergé au cours des dernières évaluations du GIEC, pour se préciser dans le tout dernier rapport du GIEC, le RE5 (GIEC 2013). De manière générale, les projections vont dans le sens de conditions climatiques toujours plus sèches et plus chaudes, tout particulièrement perceptibles durant les mois d'été. La Figure 2 – reprise du RE4 – est une synthèse des températures sous forme de moyenne d'ensembles construits par Giorgi et Lionello (2008). Qui représentent à leur tour le type d'intégrations en MCG utilisées ensuite pour entraîner les MCR et évaluer les schémas des changements climatiques à une résolution spatiale plus haute.

2.3 Exemple de résultats de descente d'échelle dynamique

La descente d'échelle est tout particulièrement importante pour déterminer les changements climatiques à l'échelle régionale plus large du bassin méditerranéen, qui se caractérise par une variabilité spatiale élevée et de nombreux types climatiques. De forts contrastes entre la terre et la mer, des rétroactions positives dans l'atmosphère, des couplages air-mer intenses et des interactions aérosol-rayonnement sont certaines des caractéristiques régionales délicates à prendre en compte dans les modélisations climatiques à haute résolution de la région.

Il existe actuellement plusieurs ensembles coordonnés de simulations climatiques régionales à haute résolution pertinentes pour les pays concernés par le projet ClimaSouth. L'un d'entre eux est basé sur une taille de grille réduite à une maille de 25 km et sur la génération précédente de scénarios d'émissions (projet ENSEMBLES, Hewitt 2005). Le dernier projet CORDEX^{L12} procède à l'archivage de nombreuses simulations cruciales qui reposent sur les nouveaux scénarios d'émissions des RCP (van Vuuren et al. 2011). Les domaines concernés sont MED-CORDEX, EURO-CORDEX (soit une grande partie de la zone visée par le projet ClimaSouth à très haute résolution) et MENACORDEX (voir section suivante pour plus d'informations). L'analyse de modèles multiples et d'ensembles d'un même modèle (exécuté avec quelques petites modifications des conditions initiales) est importante pour construire une impression d'incer-

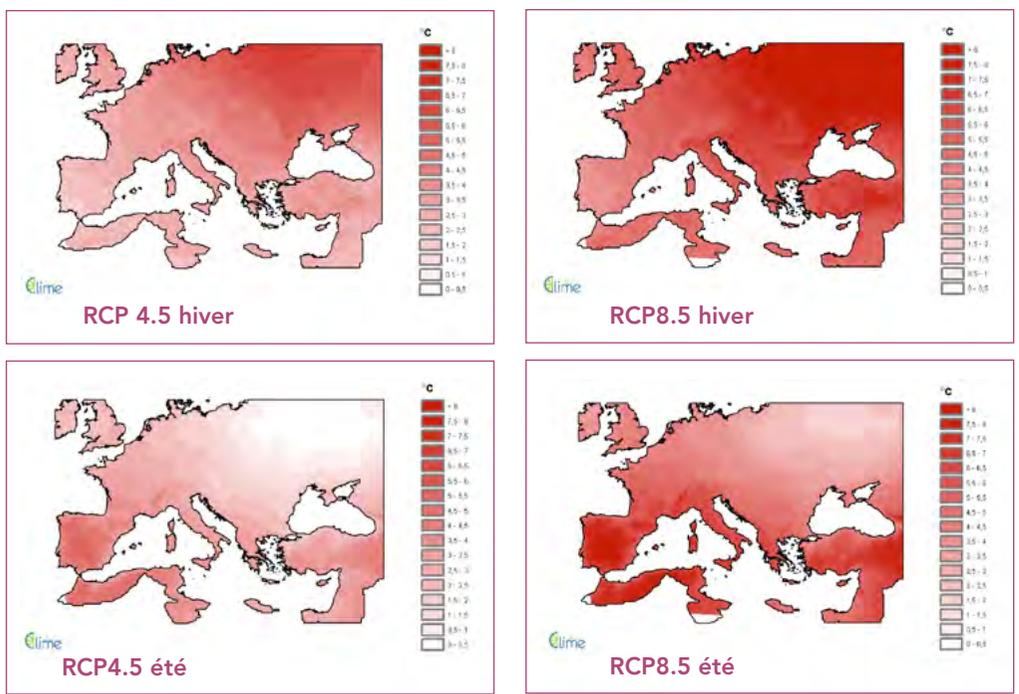


Figure 3. Projections de l'évolution des températures pour l'hiver et l'été (2071-2100 moins 1971-2000) à l'aide du COSMO-CLM.

titude, qui est une composante importante pour arriver à prendre des mesures d'adaptation appropriées (p.ex. Vermeulen et al. 2013).

L'équipe du CMCC a réalisé des projections climatiques à haute résolution (environ 14 km) sur la zone euro-méditerranéenne (en incluant également la Mer noire) au moyen du modèle climatique régional COSMO-CLM^{LI6} (Rockel et al. 2008). Plus spécifiquement, deux simulations propulsées par le modèle mondial CMCC-CM (Scoccimarro et al. 2011) ont été réalisées sur la période 1971-2100, à l'appui des scénarios d'émissions RCP4.5 et RCP8.5 du GIEC (van Vuuren et al. 2011), retenus pour leur représentativité d'un monde avec des émissions mondiales moins (RCP4.5) ou plus (RCP8.5) prononcées. La Figure 3 illustre ces résultats en montrant les projections d'évolution des températures pour la période 2071-2100 comparée à la période 1971-2000 pour les deux scénarios¹. S'agissant du scénario RCP4.5, une augmentation générale des températures est prévue pour toutes les saisons. Cette augmentation est plus prononcée en hiver, tandis qu'en été, la partie nord-est du domaine présente des variations négligeables. S'agissant du scénario RCP8.5, des anomalies de distribution semblables à celles observées dans le RCP4.5 sont relevées, mais avec des augmentations de températures plus importantes : des pics de 8° C sont relevés en hiver. Ces projections climatiques sont associées à une évolution substantielle du taux de précipitation (non représenté).

¹ La température de surface vise ici (et dans l'ensemble du manuel) à illustrer tout particulièrement le concept de descente d'échelle. Le MCR produit des projections de l'ensemble des variables climatiques, dont certaines sont jugées plus fiables que d'autres. La température de surface fait partie des variables plus fiables.

2.4 Exercices de mise en pratique de la descente d'échelle dynamique

Le COSMO-CLM (utilisé pour produire la Figure 3) s'applique à la descente d'échelle dans toutes les régions du monde et à la plupart des simulations climatiques mondiales disponibles. Il se caractérise par une formulation non hydrostatique – caractéristique clé des résolutions élevées – ce qui permet une meilleure représentation des phénomènes convectifs et des processus physiques à une échelle inférieure à la maille de la grille. La démonstration du fonctionnement du COSMO-CLM (tel qu'il a été utilisé pour produire les résultats de la Figure 3) a été faite aux participants de l'atelier, y compris la présentation du système d'exploitation informatique, des jeux de données sur le forçage aux limites fixées, des jeux de données contenant les données du MCG, et des choix de paramétrage qui doivent être faits.

Le MCR COSMO-CLM a été largement adopté dans plusieurs projets internationaux – tels que PRUDENCE (Christensen et al. 2007) et CORDEX (Giorgi et al. 2009) – et il fait preuve d'une bonne capacité de reproduction des caractéristiques climatiques moyennes des zones analysées. L'initiative CORDEX^{LI2} (présentée dans la section précédente) a été lancée pour produire des ensembles coordonnés de projections régionales en descente d'échelle, très utiles pour mieux comprendre les phénomènes climatiques pertinents et étudier les impacts des changements climatiques. Dans ce contexte, différentes institutions mettent à disposition des simulations MCR, utilisant comme forçage à la fois les réanalyses ERA-Interim et les modèles mondiaux.

Treize domaines ont été considérés pour les intégrations du modèle régional, dont EURO-CORDEX (avec des modélisations à 0,11° et 0,44° de résolution horizontale) et MENACORDEX (à 0,22° et 0,44° de résolution horizontale). Il importe de noter que les données de sortie des simulations CORDEX répondent à des spécifications particulières, concernant, pour exemple, le format des fichiers, le maillage de la grille, le nom et les attributs des variables et la fréquence temporelle.

L'atelier a été l'occasion de présenter l'un des outils de traitement particulièrement utiles pour gérer les données de sortie du modèle régional, et notam-

ment les fichiers netFDC (Network Common Data Format – format commun des données en réseau), le format de fichier standard des simulations CORDEX. L'outil de traitement présenté était le CDO^{LI7}, ensemble de différents opérateurs de la chaîne de commande utilisés pour manipuler et analyser les données de modélisation climatique. Plusieurs opérateurs ont été présentés et mis à la disposition des participants à des fins d'exercices pratiques, qui ont en outre permis d'explicitier les principales caractéristiques des fichiers netFDC.

Figure 4. Résultats de certaines des analyses effectuées dans le cadre des exercices pratiques de descente d'échelle dynamique réalisés lors de l'atelier.

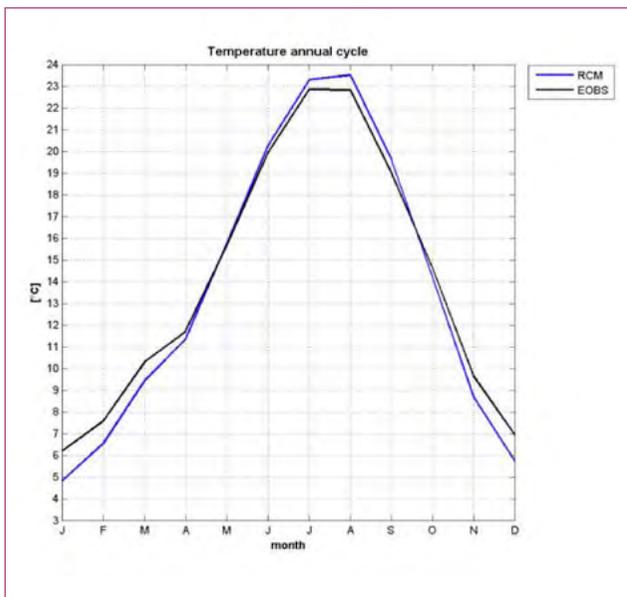


Figure 4 (a)

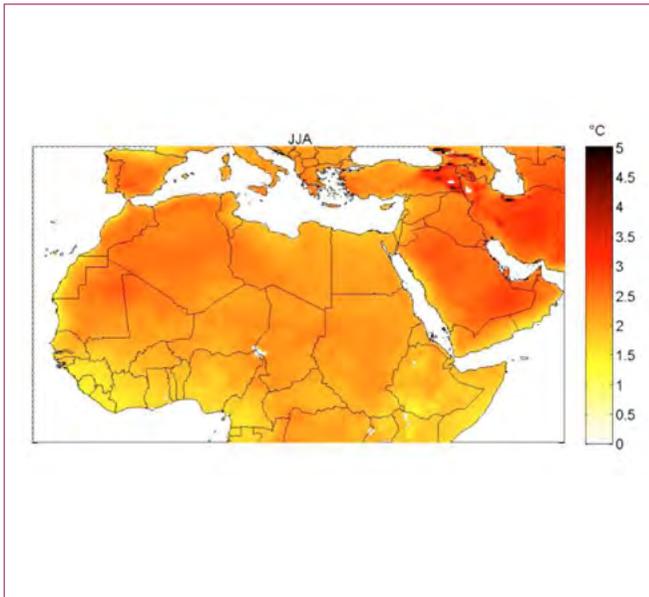


Figure 4 (b)

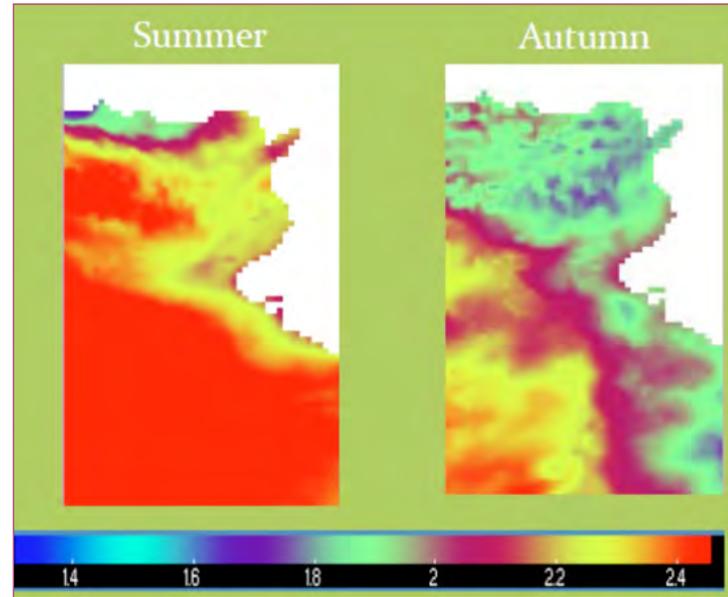


Figure 4 (c)

Figure 4 (a) : Évaluation de la capacité d'une expérimentation Euro-CORDEX reposant sur une réanalyse ERA visant à simuler les prévisions climatiques actuelles. Les lignes montrent les cycles annuels des températures des données E-OBS et d'une simulation d'EURO-CORDEX à 0,11° de résolution (simulation fournie par l'Institut de météorologie du Danemark (DMI) et réalisée au moyen du MCR HIRHAM5, forcée par de la réanalyse ERA-Interim) pour la période 1989-2010 sur la péninsule ibérique.

Figure 4 (b) : Différences de températures en été (juin-juillet-août, JJA) entre les périodes 2071-2100 et 1981-2010, en prenant en considération le scénario RCP4.5 du GIEC, pour une simulation du MENA-CORDEX à 0,44° de résolution (simulation fournie par le SMHI et réalisée au moyen du MCR RCA4, utilisant comme forçage le MCG CNRM-CM5).

Figure 4 (c) : Trame focalisée sur la Tunisie d'EURO-CORDEX (à 0,11° de résolution) pour l'évolution des températures de surface (en degrés Celsius) 2071-2100 moins 1981-2010 (produite durant l'analyse réalisée par les participants tunisiens dans le cadre des exercices pratiques). Pour consulter la liste complète des simulations CORDEX disponibles, et les coordonnées des différentes institutions contributrices et les modèles utilisés, rendez-vous sur le site Internet de CORDEX^{LI2}.

Au cours des exercices pratiques, les commandes CDO ont été utilisées pour évaluer l'erreur d'une simulation régionale relativement aux observations : des cartes de cycles annuels et de biais saisonniers ont été produites. Pour ce faire, les jeux de données observationnelles maillées EOBS^{LI8} (Haylock et al. 2008) et CRU^{LI9} (Harris et al. 2014) ont été utilisés pour valider les simulations respectives EURO-CORDEX et MENA-CORDEX. En outre, les projections climatiques ont été analysées pour produire des cartes de projections saisonnières pour la période 2071-2100 comparée à la période 1981-2010, en prenant en considération le scénario RCP4.5 du GIEC. La Figure 4 rend compte de certains des exercices pratiques réalisés à l'aide des données CORDEX.

2.5 Descente d'échelle statistique de scénarios d'évolution climatique à l'échelle régionale à des fins d'étude d'impact

Discussion méthodologique

De manière générale, les données de sortie des MCG ne peuvent être utilisées directement à des fins d'études d'impact à l'échelle régionale/ locale, et ce en raison de deux problèmes principaux : elles sont biaisées par rapport aux observations et leur échelle spatiale est trop grossière. La descente d'échelle statistique des données de sortie des MCG est l'une des solutions à ce problème (les différentes démarches possibles sont débattues à la section 3 relativement aux prévisions saisonnières). À défaut,

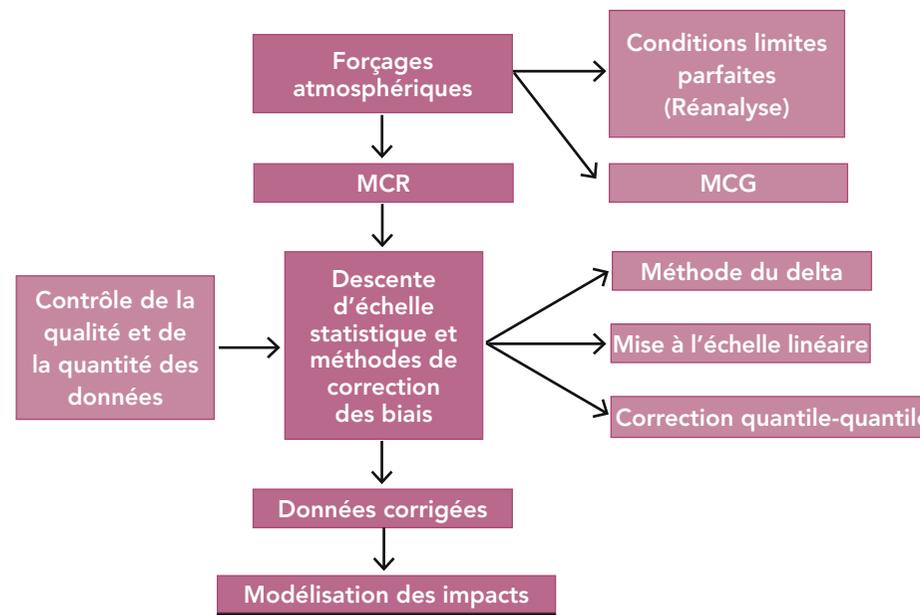


Figure 5. Représentation du processus de modélisation climatique à l'appui d'une démarche hybride dynamique-statistique à des fins d'études d'impact.

les MCR peuvent être appliqués à la descente d'échelle dynamique des données de sortie des MCG (section 2.4).

Les MCR fournissent des séries temporelles de variables climatiques à une plus petite échelle, et, partant, des informations détaillées à l'échelle régionale.

Toutefois, l'utilisation directe des simulations MCR dans les études d'impact reste relativement difficile : en effet, les modèles d'impact demandent en général une résolution spatiale plus haute que celle dont les MCR sont capables, et, par conséquent, une descente d'échelle supplémentaire est souvent nécessaire. En outre, les données de sortie MCR sont également biaisées et ne fournissent souvent

pas de conditions de contrôle réalistes. Afin de combler cet écart entre les informations nécessaires aux experts d'impact et les données MCR disponibles, des méthodes de descente d'échelle hybrides peuvent être mises en œuvre, méthodes qui consistent à fusionner démarches dynamiques et démarches statistiques, en utilisant à la fois, et de manière complémentaire, les techniques MCR et les techniques statistique. L'utilisation combinée de telles démarches permet, tout au moins dans une certaine mesure, de profiter du meilleur de chacune (Zollo et al. 2015). La Figure 5 rend compte de ce type de démarche de modélisation adopté dans des études d'impact.

Les données de descente d'échelle corrigées sont, dans la plupart des cas, destinées à des « utilisateurs finaux » (Maraun et al. 2010). Il existe différentes sortes de techniques de descente d'échelle statistique/ de correction des biais, présentant des caractéristiques différentes pour répondre aux besoins différents d'utilisateurs finaux différents. Première étape dans l'élaboration de scénarios climatiques régionaux à haute résolution à des fins d'études de l'impact des changements climatiques : procéder à une analyse rigoureuse des jeux de données observationnelles (Turco et al. 2013). Cette analyse est indispensable à la fois à la validation du MCR lui-même (en d'autres termes pour vérifier la fiabilité des données simulées), et au calibrage des données de sortie du MCR, par le biais de descente d'échelle statistique ou de méthodes de correction des biais. De fait, cette tape préalable sert à contrôler la qualité et la quantité des données. Les données observationnelles météorologiques peuvent être fournies par les stations météorologiques. Toutefois, procéder à une comparaison directe entre les données de sortie d'un modèle climatique et des points de mesures est une entreprise re-

lativement ardue, en raison de ce que ces données et mesures présentent des caractéristiques différentes : les mesures sont représentatives d'un point et non d'une maille de grille (moyenne pondérée de différentes surfaces).

Autre possibilité: les jeux de données maillées obtenus par interpolation des mesures de stations. Un jeu de données maillées constitue un outil plus approprié pour la validation du modèle du fait qu'il s'agit dans les deux cas – jeu et modèle – de données surfaciques moyennées.

Toutefois, les observations maillées sont soumises à certains problèmes tels que : incertitudes introduites par la méthode d'interpolation employées ; stations situées à distances irrégulières ; séries temporelles incomplètes et hétérogènes. Il importe de toujours tenir compte de ces problèmes en appliquant des jeux de données maillées à la validation d'un modèle.

Mise en œuvre de méthodes de correction des biais de la descente d'échelle (à l'appui d'exemples et exercices pratiques)

Les méthodes de correction des biais – ou débiaisage – fonctionnent en comparant les séries temporelles maillées produites par le modèle à des séries temporelles issues d'observations. L'idée de départ des techniques de correction de biais est de corriger les données de sortie du modèle au moyen de données observationnelles. Bien entendu, la qualité et les caractéristiques générales des données disponibles affectent la qualité et la nature de la correction : étant donné le rôle important que jouent les données observationnelles dans le processus, il pourrait

être de bonne pratique d'analyser différents jeux de données sur la zone concernée (si disponibles) afin de choisir le jeu le plus fiable et le plus approprié. De plus, il importe de considérer que la correction effectuée au moyen d'un jeu de données observationnelles implique également une descente d'échelle implicite à la même échelle que les données observationnelles.

Les méthodes de correction des biais reposent sur l'hypothèse puissante que les biais entre observations et modèles sont constants, et, par conséquent, indépendants de la période de contrôle (hypothèse de stationnarité). Ainsi, selon cette hypothèse, le même algorithme de correction s'applique à la fois aux conditions climatiques actuelles qu'aux conditions climatiques futures (cette hypothèse se retrouve dans l'ensemble des démarches de descente d'échelle statistique).

Parmi les méthodes de correction des biais couramment utilisées, nous noterons notamment : La méthode du delta, la mise à l'échelle linéaire et la correction quantile-quantile. L'idée de départ de la méthode du delta est de relever les anomalies du MCR (p.ex. scénario moins période de référence) et de les appliquer aux données observées durant la période de référence. La correction est généralement effectuée à une périodicité mensuelle, avec une correction multiplicative pour le taux de précipitation et une correction additive pour la température (Teutschbein et Seibert 2012). À l'inverse, la démarche de mise à l'échelle linéaire fonctionne avec des valeurs de correction mensuelles basées sur les différences entre valeurs observées et valeurs simulées durant la période de référence. Par définition, des simulations de MCR corrigées durant la période de référence correspondront parfaitement au niveau de leurs valeurs moyennes mensuelles avec les observations. Le

taux de précipitation est corrigé au moyen d'un facteur égal au rapport entre données moyennes mensuelles observées et données moyennes mensuelles simulées, tandis que la température est corrigée au moyen d'un terme additif égal à la différence entre données moyennes mensuelles observées et données moyennes mensuelles simulées. L'hypothèse est posée que les facteurs et les termes de correction appliqués ne varient pas, même pour des conditions futures (Teutschbein et Seibert 2012). Enfin, la correction quantile-quantile vise à ajuster l'ensemble des pas de temps de la fonction de distribution de probabilités (FDP) de la variable climatique simulée. Elle estime la valeur corrigée en fonction de la valeur originale, au moyen d'une fonction de transfert calculée en forçant l'égalité entre la FDC (fonction de répartition) des variables observées et la FDC des variables simulées durant la période de référence (Piani et al. 2010). La variable corrigée est alors obtenue au moyen de l'équation suivante :

$$X^* = F_{obs}^{-1}(F_{rcm}(X_{rcm}))$$

où F_{rcm} et F_{obs} sont, respectivement, la FDC des données simulées et la FDC des données observationnelles, et X représente la variable climatique (température ou taux de précipitation). Il existe différentes sortes de méthodes de correction quantile-quantile (Gudmundsson et al. 2012) : (1) transformations sur distributions, (2) transformations non paramétriques (quantiles empiriques), et (3) transformations paramétriques. S'agissant de la méthode sur distribution, les transformations statistiques sont réalisées au moyen de distributions théoriques : la distribution la plus couramment utilisée pour représenter la FDP est la courbe de Gamma

pour le taux de précipitation, et la courbe de Gauss pour la température (Teutschbein et Seibert 2012). À l'inverse, la méthode empirique ne pose aucune hypothèse quant à la distribution des données. Les FDC empiriques sont déterminées à partir de tableaux de centiles empiriques qui peuvent être utilisés pour calculer la valeur corrigée de la variable (Berg et al. 2012). Enfin, la relation quantile-quantile peut être modélisée directement à l'appui de transformations paramétriques : les différents types de transformations paramétriques disponibles actuellement sont présentés par Gudmundsson et al. (2012), qui ont par ailleurs mis au point un package en R en accès ouvert et gratuit (qmap^{LI10}), qui met en œuvre, en langage R, l'ensemble des méthodes de correction quantile-quantile évoquées ci-dessus.

Pour pouvoir utiliser ces techniques pour soumettre des scénarios futurs à une descente d'échelle, il est également important d'en vérifier la robustesse dans des conditions de changements climatiques. L'une des vérifications consiste à analyser la consistance des signaux d'évolution du climat dans les données corrigées (débiaisées) et dans les données originales du MCR. La correction des biais ne doit pas altérer, de manière significative, le signal d'évolution du climat du MCR (le but étant plutôt d'arriver à une séquence météorologique journalière plus réaliste). En effet, Zollo et al. (2015) ont observé que, de manière

générale, ces techniques de traitement en aval permettaient de préserver le signal d'évolution climatique du MCR. Ces résultats suggèrent que les techniques hybrides de descente d'échelle proposées pourraient s'avérer fort utiles pour les études de l'impact des changements climatiques, dans lesquelles les utilisateurs requièrent des données à haute résolution où les erreurs systématiques sont réduites au minimum.

Dans la session de mise en pratique, certains exercices sur la correction des biais et la descente d'échelle à des points de niveau stations ont été proposés, qui faisaient appel à la méthode de mise à l'échelle linéaire (mise en œuvre dans le logiciel en R). Ces exercices ont permis de montrer (1) comment comparer les données observées et les données simulées, (2) comment calculer la correction des données simulées au moyen de mise à l'échelle linéaire, et sauvegarder le résultat dans un fichier Excel ; et enfin, (3), comment vérifier si le résultat est correct. La Figure 6 reprend certains des résultats obtenus dans le cadre de cette session pratique. Par ailleurs, la mise à l'échelle linéaire des données a été appliquée à un scénario de changements climatiques. Les signaux d'évolution du climat, avant et après l'application de la technique de correction des biais, ont été comparés afin d'évaluer la capacité de cette méthode à ne pas altérer le signal d'évolution climatique du MCR.

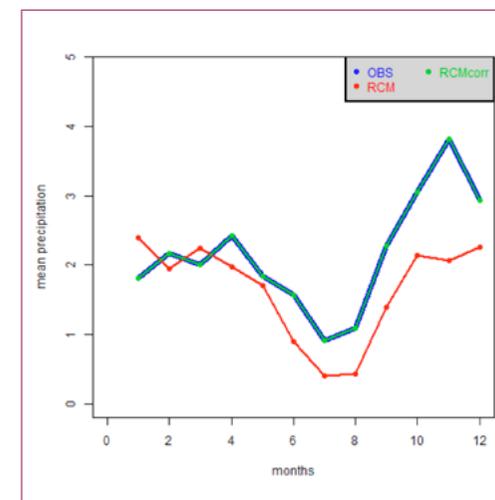


Figure 6. Exemples de résultats obtenus dans le cadre de la session pratique : cycle saisonnier observé durant la période de référence en données simulées du MCR, et en données corrigées du MCR à l'aide de la technique de mise à l'échelle linéaire. Notez la manière dont les données corrigées (points verts) ont désormais des valeurs mensuelles moyennes identiques aux valeurs moyennes des données observées de la période de référence (trait bleu).



3. DESCENTE D'ÉCHELLE DE DONNÉES DE PRÉVISIONS CLIMATIQUES SAISONNIÈRES

3.1 Introduction aux prévisions climatiques saisonnières et aux démarches de descente d'échelle

Les données sur les anomalies climatiques dont la survenue est pressentie à court terme (p.ex. risque d'une grande sécheresse) peuvent s'avérer utiles pour la gestion des difficultés d'adaptation de nombreuses sociétés. Ces données climatiques sont généralement appelées « prévisions climatiques saisonnières ». Il est possible de faire des prédictions judicieuses/ fines dans ces cas en raison de ce que les anomalies climatiques atmosphériques moyennées sur un ou plusieurs mois peuvent être influencées par des moteurs prévisibles du système climatique à grande échelle, tels que la température de la surface de la mer (TSM), les anomalies persistantes de l'humidité du sol, ou les anomalies persistantes de la couverture neigeuse.

Pour faire une prévision saisonnière dynamique, les variables climatiques observées juste avant la prévision (appelées « conditions initiales ») sont saisies dans un MCG, qui les projette ensuite dans le temps [comme une sorte de fuite en avant] généralement 1 à 6 mois dans la plupart des centres de prévisions opérationnels (l'e-manuel n° 2 ClimaSouth^{L1} reprend, à la section 5, une discussion des

initiatives de prévisions opérationnelles, aux échelles nationale et régionale). Des prévisions compétentes ne sont possible que si les conditions initiales conduisent le MCG à prévoir avec justesse et à grande échelle des traits anormaux pour les mois à venir (p.ex. El Niño), qui à leur tour entraînent des anomalies climatiques atmosphériques à l'échelle régionale. Être en mesure de prévoir des anomalies de TSM tropicale à grande échelle est particulièrement important, en raison de ce qu'elles exercent un contrôle très fort sur l'atmosphère tropicale, ce qui, là encore, peut donner lieu des anomalies dans les latitudes moyennes. Même si le domaine qui intéresse le projet ClimaSouth a souvent été à la périphérie méridionale de nombreuses études, ce qui laisse encore de la marge pour des investigations ultérieures. Les éléments dont nous disposons suggèrent toutefois qu'El Niño et d'autres schémas tropicaux de TSM n'ont qu'une influence limitée sur les anomalies saisonnières atmosphériques (p.ex. voir Rodo et al. 1997 ; Mariotti et al. 2002 ; Bolle 2003 ; Cassou et Terray 2001 ; Cassou et al. 2005 ; Kushnir et al. 2006 ; Shaman et Tziperman 2011 ; Black et al., 2010). Les TSM locales (de l'Atlantique Nord et de la Méditerranée voisines) pourraient dans certains cas ajouter une certaine prévisibilité du taux de précipitation à l'échelle locale, et particulièrement de la température de la surface du sol, maîtrise qui peut être également améliorée par un plus grand nombre de variations de température à l'échelle mondiale (à la fois s'agissant des variations interannuelles et des tendances à plus long terme). Les anomalies locales en matière d'humidité du sol pourraient également améliorer la maîtrise dans certains cas (Paolino et al. 2012 ; Materia et al. 2014). Certaines informations pourraient également être dérivées d'anomalies persistant dans la stratosphère, liées à l'oscillation quasi-biennale (p.ex. Fereday et al. 2012).

Ainsi, certaines informations utiles pour le domaine visé par le projet ClimaSouth peuvent être présentes dans les prévisions saisonnières à certains

moments et dans certains endroits. La maîtrise à attendre peut être estimée en faisant fonctionner des systèmes de prévisions sur un grand nombre d'années passées (généralement une vingtaine d'années au moins), et en vérifiant l'exactitude obtenue par le passé dans chaque endroit (concept illustré à la Figure 7b). Ceci est ensuite réputé rendre compte du degré de maîtrise à attendre des prévisions en temps réel.

Des prévisions climatiques saisonnières à haute résolution peuvent être produites à l'appui de plusieurs démarches :

(i) **MCG à haute résolution.** Si l'on dispose des ressources informatiques nécessaires, et d'un modèle mondial adapté aux prévisions saisonnières, alors les MCG peuvent produire des prévisions saisonnières à une résolution spatiale adéquate pour certaines (mais absolument pas pour toutes) les études d'impact. En effet, de manière assez répandue pour les prévisions saisonnières (moins pour les scénarios de l'évolution climatique mondiale), des MCG à résolution relativement haute sont exploités pour produire des prévisions saisonnières. Pour exemple, les prévisions saisonnières du CEPMMT^{U11} sont actuellement produites à une résolution d'environ 80 km. Un inconvénient important est que le paramétrage doit habituellement être constant sur le domaine mondial : par exemple, dans les MCR, le schéma de convection doit être réglé en fonction du domaine régional ciblé, alors que ce n'est pas le cas pour un modèle mondial.

(ii) **Descente d'échelle dynamique d'un MCG à basse résolution.** Le processus est exactement analogue à celui appliqué aux projections d'évolution mondiale (voir section 2.1). Le MCG crée une prévision saisonnière à grande échelle, et les données de sortie du MCG sont utilisées pour entraîner

un MCR sur le domaine cible. Le MCR peut également être exploité avec des conditions limites de réanalyse pour une année donnée, afin d'évaluer la performance générale du MCR et la prévisibilité potentielle maximale de l'anomalie climatique saisonnière. Une bonne estimation de la véritable incertitude des prédictions peut également être évaluée en exécutant des prévisions de MCR pour un grand nombre d'années passées et en vérifiant les prévisions – en supposant que des observations à haute résolution comparables soient disponibles (toutefois, la disponibilité d'observations à des fins de vérification constitue une contrainte importante dans la détermination de la maîtrise attendue des prévisions saisonnières à haute résolution).

(iii) **Descente d'échelle statistique des prévisions de MCG.** La descente d'échelle statistique des MCG est souvent appelée plus précisément « transformation statistique des prévisions de MCG ». Une transformation statistique est appliquée pour extraire des données plus utiles des prévisions du MCG, généralement dans l'idée d'être capable de mieux évaluer les impacts probables (p.ex. sur la production agricole, Hansen et al. 2006). Ainsi, une transformation simple peut consister à corriger un biais systématique dans le MCG (p.ex. en éliminant un biais sec général), tandis que des transformations plus complexes pourront améliorer la résolution spatiale et temporelle utile des données (une telle transformation correspondant de manière plus évidente à la terminologie de descente d'échelle). La descente d'échelle statistique des prévisions saisonnières peut appliquer soit une démarche « pronostic parfait » soit une démarche « statistiques de sortie de modèle », tandis que tous les scénarios de changements climatiques mondiaux en descente d'échelle doivent adopter la démarche « *pronostic parfait* ».

Démarche Statistiques de sortie de modèle (MOS) : les relations statistiques sont calculées entre les prévisions saisonnières du MCG pour les années passées et les observations cibles de vérification à haute résolution (p.ex. les observations des stations). Ces relations sont appliquées à des prévisions saisonnières en temps réel pour créer des prévisions MOS en descente d'échelle.

Démarche Pronostic parfait : les relations statistiques sont calculées entre les champs observés à grande échelle (p.ex. les champs de réanalyse) et les observations cibles de vérification à haute résolution (p.ex. les observations des stations). Ces relations sont appliquées à des prévisions saisonnières en temps réel pour créer des prévisions en descente d'échelle pronostic parfait. Ces relations sont presque toujours inévitablement bonnes (du fait que la circulation observée à grande échelle a une relation forte avec les observations simultanément observées par les stations cibles). La force de cette relation n'est pas un indicateur du niveau de maîtrise à attendre d'une prévision saisonnière en descente d'échelle. À l'inverse, la maîtrise obtenue par la démarche MOS peut être considérée comme une bonne estimation de la maîtrise à attendre d'une application en temps réel.

(iv) Informations directes de prédicteurs candidats. L'application d'un MCG/MCR peut être entièrement remplacée par des systèmes statistiques qui relient directement la source de prévisibilité (telle que la TSM dans une région donnée) à la variable cible à haute résolution (telle que les précipitations observées en stations). De telles démarches requièrent des ressources informatiques élé-

mentaires, mais également une application prudente et attentive pour garantir une prévisibilité authentique dans le système climatique saisi par les relations statistiques. Habituellement, une identification préalable de ces relations dans les expérimentations historiques en MCG/MCR fournira une importante justification de l'application d'un système statistique simplifié.

3.2 Présentation générale de concepts de « descente d'échelle statistique » et application aux prévisions saisonnières

Diverses transformations statistiques/ méthodes de descente d'échelle ont été largement appliquées aux prévisions saisonnières dans le but d'en améliorer l'utilité. Les prévisions saisonnières produites par les MCG peuvent, intrinsèquement, avoir une résolution spatiale médiocre. Par conséquent, évaluer l'impact d'une prévision saisonnière sur la production agricole d'un endroit donné peut exiger la transformation des données du MCG au climat implicite de la localisation d'une station voisine (c.-à-d. appliquer la descente d'échelle statistique de la prévision du MCG à la localisation de la station). En termes de résolution temporelle, les MCG peuvent produire implicitement des données à une fréquence temporelle élevée (p.ex. toutes les 15 minutes) : cependant, leur capacité à reproduire des statistiques pour des conditions météorologiques telles que des épisodes de sécheresse ou des

tempêtes extrêmes est souvent très limitée et appellent le recours à des démarches statistiques pour améliorer les données à des fins d'études d'impact.

Corrections des biais et générateurs météorologiques

Dans les prévisions saisonnières, diverses démarches de correction des biais ont été appliquées, analogues aux techniques décrites pour les scénarios d'évolution climatique à l'échelle régionale à la section 2.5 (pour les contextes de prévisions saisonnières, voir Ines et Hanson 2005 ; Piani et al. 2010). Les démarches de correction quantile-quantile peuvent s'avérer efficaces pour la transformation d'une prévision saisonnière en des données journalières adaptées à l'exécution de modèles de cultures.

Si la prévision saisonnière contient des informations utiles sur le moment de la survenue des pluies au cours d'une saison, la correction quantile-quantile préservera ces informations. Toutefois, elle repose nécessairement sur ce que le MCG contienne la structure statistique temporelle appropriée des pluies au cours de la saison. Pour exemple, si le MCG ne produit pas de séquences réalistes d'épisodes humides et d'épisodes secs, la transformation de la FDP ne résoudra pas cette lacune. Une démarche qui permet de produire la structure temporelle appropriée consiste à appliquer des générateurs météorologiques (Wilks et Wilby 1999). Pour commencer, des modèles statistiques décrivant la structure temporelle de pluies observée sont mis en place. Ensuite, ces modèles sont appliqués, sur la base du total des pluies saisonnières prédit par le MCG (ainsi, une séquence journalière de pluie pour la saison est

produite, qui répond à la fois à la structure temporelle de pluie journalière historique observée et à la prédiction du MCG pour la saison). La démarche de générateurs météorologiques est susceptible d'être mieux à même de reproduire la structure statistique météorologique tout au long de la saison.

Démarches de régression basées sur les tendances spatiales : bref aperçu

Les techniques ci-dessus s'appliquent individuellement à chaque série temporelle maillée des données de sortie du MCG. Une démarche alternative consiste à prendre en considération les tendances régionales à plus grande échelle simulées par le MCG, et à les utiliser pour fournir des informations sur les données cibles à haute résolution. Ces démarches sont souvent initialement appliquées à des moyennes temporelles mensuelles ou saisonnières en sortie de MCG pour produire des variables climatiques mensuelles ou saisonnières à haute résolution pour l'ensemble de la région cible. Ces démarches ont été appliquée dans certaines des toutes premières études en descente d'échelle (von Storch et al. 1993), et rendent très justement compte du concept original de descente d'échelle, qui posait comme hypothèse que les champs climatiques à grande échelle avait une expression statistique répétable à haute résolution spatiale dans des variables climatiques clés telles que les moyennes saisonnières de pluies et de températures.

Exemples utilisant la régression sur composantes principales

Les techniques de régression sur composantes principales (PCR) font partie de la famille ci-dessus d'outils de descente d'échelle en régression basés sur les tendances spatiales (p.ex. voir la catégorisation des outils de descente d'échelle statistique dans Fowler et al., 2007). Les PCR peuvent être utilisées dans une grande diversité de contextes pour la descente d'échelle des prévisions climatiques saisonnières. L'outil de prévisibilité climatique, disponible

en mode ouvert et gratuit (Climate Predictability Tool^{L12} OPC, de l'IRI, Université de Columbia (NYC)) peut être utilisé pour relier des champs de prédicteurs à grande échelle (champs MCG ou champs d'observations tels que les TSM) au jeu cible de variables climatiques d'un analyste (tels que les champs de précipitations maillés observés, ou au jeu d'observations de stations cibles d'un utilisateur). La méthode sur composantes principales identifie les principales tendances spatiales de variation dans un jeu de données, et calcule les indices connexes qui mesurent la variation temporelle de chaque composante principale. La régression sur composantes principales (PCR) se sert de ces indices (les composantes principales) comme prédicteurs de régression candidats. Une autre démarche liée disponible dans l'OPC est l'analyse de corrélation canonique (ACC) où des modes optimaux à la fois de prédicteur et de prédicteur sont utilisés pour construire des équations de prédiction. Ci-dessous quelques exemples de l'application de cet outil (nous nous concentrons ici sur l'utilisation de la méthode de PCR la plus simple) :

i) Pronostic parfait : fournit un diagnostic et une base pour les prédictions en descente d'échelle

Dans ce contexte, des relations semblables à celles de certaines des formulations originales de descente d'échelle statistique peuvent être évaluées (p.ex. von Storch et al. 1993). Pour exemple, la réanalyse atmosphérique de la pression au niveau de la mer en Atlantique Nord peut être reliée à des champs de précipitations à haute résolution observés en Afrique du Nord. La principale tendance de la variation atmosphérique est l'oscillation nord-atlan-

tique (ONA), dont de nombreuses études (p.ex. Lamb et Pepler 1987 ; Mehta et al. 2000) ont montré qu'elles avaient une forte relation avec des pluies simultanées observées en Afrique du Nord (p.ex. la pression au niveau de la mer en janvier est reliée aux précipitations relevées en stations en janvier). La régression sur composantes principales pour des pluies relevées dans une station donnée pourra être reliée à l'ONA en janvier (telle que représentée par la composante principale 1 de la pression au niveau de la mer en Atlantique du Nord) au moyen d'une simple équation de régression :

$$\text{Total des précipitations en janvier} = a_0 + a_1(\text{valeur de l'ONA en janvier})$$

De manière générale s'agissant de l'Afrique du Nord subtropicale, le coefficient de corrélation d'un tel modèle est d'environ $r=0,5$, et le coefficient augmente avec l'ajout d'autres composantes principales d'ordre inférieur (qui saisissent d'autres modes de variation atmosphérique, tels que la configuration est-atlantique). L'augmentation du coefficient par des prédicteurs supplémentaires sera estimée en recourant à des démarches telles que la validation croisée pour réduire l'amplitude des coefficients de régression (éviter l'« overfitting ») (voir manuel OPC^{L13}). Les modèles en PCR fournissent des données de diagnostic utiles. Ils peuvent également être appliqués pour produire une prévision en descente d'échelle des précipitations en janvier, en insérant la valeur ONA prédite par le MCG dans l'équation ci-dessus. Toutefois, sachant que les MCG ont généralement une maîtrise faible de la prédiction de la valeur de l'ONA en janvier (et d'autres tendances de circulation en Atlantique Nord/ en Méditerranée), la maîtrise réelle des prévisions saisonnières en descente d'échelle généralement atteinte en utilisant la démarche ci-dessus est faible, bien que des travaux récents laissent à penser que les MCG pourraient atteindre une maîtrise utile de l'ONA dans certains cas (Scaife et al. 2014 ; Athanasiadis et al. 2014). Des résultats semblables sont constatés lorsque d'autres mois de l'année sont étudiés.

ii) Statistiques de sortie de modèle (MOS) pour des prédictions en descente d'échelle

Dans une démarche MOS, le modèle de l'équation ci-dessus n'utiliserait pas la valeur de l'ONA observée en janvier, mais plutôt la valeur de l'ONA en janvier prédite par le MCG. Le coefficient de régression du modèle sera faible, en raison de ce que le MCG a une faible maîtrise de la prédiction de l'ONA observée dans tous les délais. Dans d'autres contextes, lorsque le MCG a une bonne maîtrise de la prédiction d'une caractéristique à grande échelle (comme c'est le cas dans de nombreux contextes dans les tropiques), la démarche MOS de descente d'échelle fournit une base solide à la fois pour estimer la maîtrise attendue des prévisions en descente d'échelle et pour fournir une méthode prévisionnelle (telle que celle utilisée dans certains forums régionaux sur les perspectives climatiques : ces forums sont décrits à la section 5 de l'e-manuel ClimaSouth n° 2^{LI1}). Dans certains cas, pour le domaine visé par le projet ClimaSouth, la démarche MOS pourra fournir certaines données utiles, bien que, concernant la température à la surface du sol, il n'apparaisse pas clairement que cette démarche apporte des informations complémentaires substantielles comparées à celles provenant directement des données de sortie de MCG, telles que les prévisions saisonnières du CEPMMT les (A. Kamga, ACMAD, communication personnelle, 2015).

iii) Données directes à haute résolution provenant de prédicteurs candidats

Dans ce contexte, le jeu de données prédicteur contient des champs d'une variable jugée être un facteur direct

des anomalies climatiques saisonnières sur le domaine cible. Pour donner vie à ce concept, plusieurs exercices pratiques durant l'atelier ont utilisé des données TSM^{LI14} (Smith et Reynolds 2003) comme prédicteur. Concernant le prédictant (à des fins d'illustration), les modèles ont utilisé des jeux de données maillées de précipitation à haute résolution (résolution à 25 km, TRMM^{LI15}, Huffman et al. 2007) ou des estimations de la température observée à la surface du sol de la réanalyse ERA^{LI3}. La Figure 7 propose une analyse à titre d'exemple, dans laquelle la TSM en janvier en Méditerranée orientale est liée à des précipitations voisines sur des surfaces terrestres. Selon l'hypothèse précédemment posée, les anomalies positives (négatives) de TSM sur ce domaine auraient pu être associées à des anomalies positives (négatives) de pluies dans certains cas (M. Wehaibe, Directeur du département libanais de météorologie, communication personnelle, 2015). Le résultat montré constitue un premier pas prometteur vers la quantification de cet effet, et doit être évalué plus complètement à l'appui de séries plus longues de relevés de pluies en station, ainsi que diagnostiqué dans des modèles dynamiques à haute résolution. En outre, cette relation semble se cantonner à certaines époques particulières du cycle annuel. Néanmoins, elle illustre le concept d'une capacité émergente à anticiper certaines anomalies climatiques dans la région sur des calendriers mensuels /saisonniers. Souvent, pour une application agricole, la distribution potentielle journalière de pluies est nécessaire pour pouvoir évaluer les implications en matière d'équilibre hydrique et de stress auquel sont soumises les cultures. En appliquant la démarche PCR pour produire un total de pluies mensuel, il est possible de la combiner avec la démarche de générateurs

météorologiques journaliers pour simuler une série de pluies journalières qui correspondent à la prédiction de pluies mensuelles (p.ex. Hanson et Indeje 2004 ; Vezzoli et al. 2013).

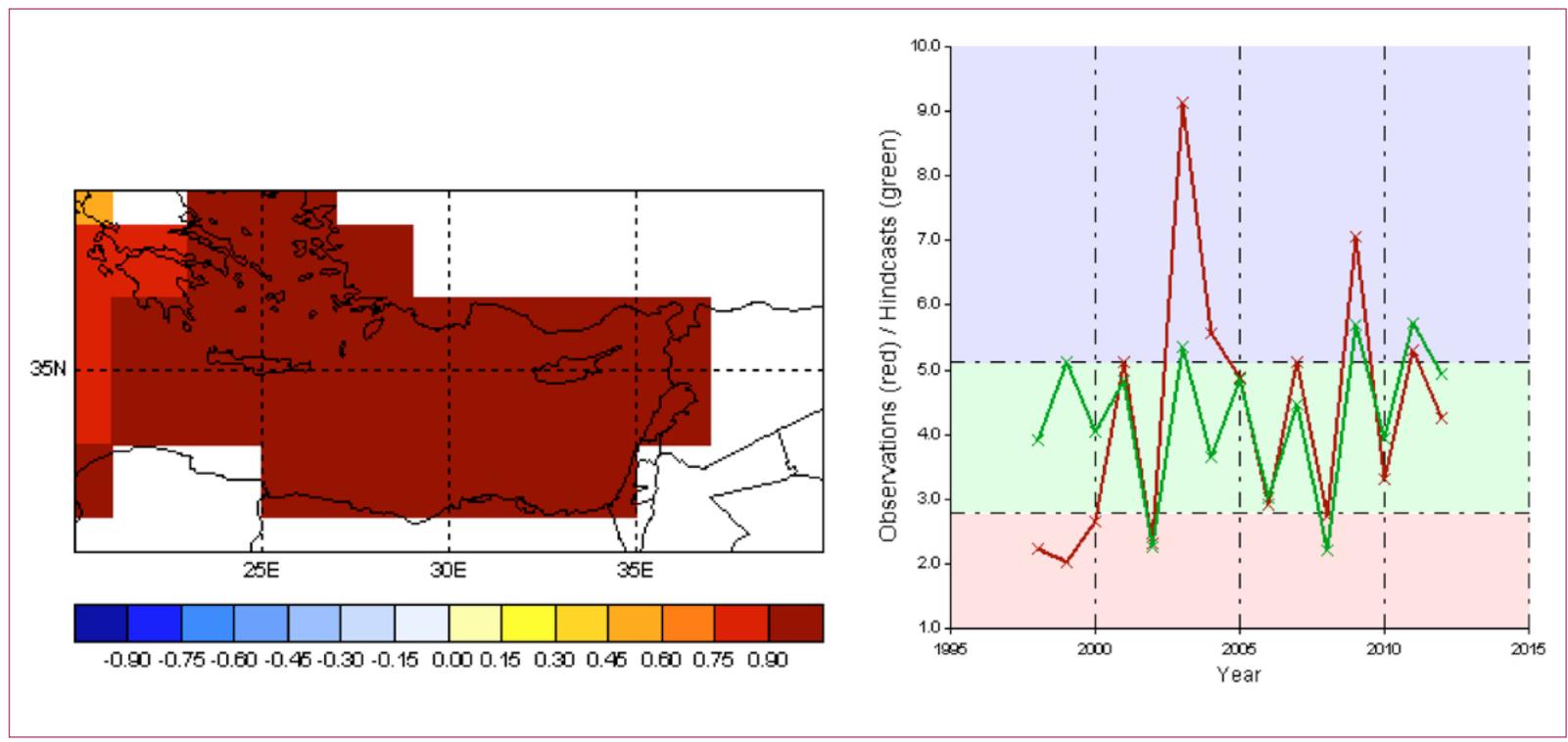


Figure 7. Prédiction des pluies pour le mois de février en utilisant une TSM en janvier en Méditerranée orientale.
 La première composante principale de la TSM de janvier ((a), **panneau de gauche**) contribue à des prédictions contre-validées des précipitations de février (mm/jour) à une maille proche de Tal Amara, Liban ((b), **panneau de droite**). Le signe de la relation est tel que les anomalies positives de TSM indiquent généralement des pluies au-dessus des normales saisonnières. Le modèle a produit une maîtrise de corrélation contre-validée de $r > 0,45$ au niveau de presque toutes les mailles sur l'ensemble du Liban. Résultats obtenus au cours des exercices pratiques sur le logiciel OPC auxquels ont pris part les participants libanais et palestiniens lors de l'atelier.



4. CONCEPTS ET EXEMPLES D'UTILISATION DE DONNÉES CLIMATIQUES À HAUTE RÉOLUTION (EN DESCENTE D'ÉCHELLE) À DES FINS D'ÉTUDES D'IMPACT

4.1 Difficultés rencontrées dans l'évaluation des impacts climatiques à haute résolution

Les connaissances sur le climat aux échelles locale et régionale sont de la plus haute importance pour modéliser de manière précise des réponses éco-systémiques, déterminer les vulnérabilités, identifier les menaces potentielles, et formuler des stratégies d'adaptation efficaces (priorité toujours plus grande pour les agences gouvernementales et les agences de l'environnement). Il est crucial de pouvoir disposer de données sur le climat crédibles, de grande qualité, et à haute résolution, quel que soit le calendrier pris en considération, des prévisions météorologiques à court terme aux projections d'évolution climatique, tout particulièrement lorsque les résultats et l'application potentielle sont destinés aux parties prenantes et aux décideurs politiques.

Les chercheurs ont depuis longtemps pris toute la mesure du problème de l'échelle spatiale : les études d'impact,



notamment celles appliquée aux régions présentant des topographies complexes, demandent souvent de l'observation climatique à l'échelle du champ, et sont extrêmement sensibles aux variations à échelle fine (Wilby et al. 2004). À ce jour, nombreux ont été, et sont encore, les efforts déployés pour arriver à disposer de données climatiques fiables : cependant, de nombreuses difficultés en matière de sélection et d'utilisation de données à haute résolution à des fins d'évaluation des impacts climatiques demandent encore à être surmontées.

Les démarches dynamiques et statistiques visant à améliorer la résolution des données ont été présentées précédemment : néanmoins, comme nous l'avons indiqué à la section 2.5 (et voir aussi Boberg et Christensen 2012), même les données de sortie d'un MCR appellent souvent une correction statistique. Ces démarches exigent que l'on dispose de données observationnelles de grande qualité pour le calibrage et la vérification du modèle. Comme le soulignent Vezzoli et al. (2013), en l'absence de grandes quantités d'observations, il est impossible de procéder à une descente d'échelle statistique et la validité des relations entre les variables devant être mises à l'échelle et les variables du modèle climatique se limite aux données de calibrage. Cette contrainte en matière de données peut être une limite abstraite dans le cadre d'une analyse idéale dans une perspective météorologique : mais elle devient vite un obstacle fondamental à

l'atteinte de l'objectif recherché dans le contexte d'une étude d'impact.

De plus, autre nécessité absolue dans le cadre d'une étude d'impact : la prise en considération des relations, du retour, et de l'effet domino entre facteurs climatiques et facteurs non climatiques, tels qu'éruption volcanique, absorption de chaleur par les eaux profondes des océans, ou encore activités humaines. Les démarches de descente d'échelle dynamique permettent de prendre en compte ces contrôles et retours sous-jacents humains-terre-surface, mais ceci emporte l'un des principaux inconvénients de ces démarches : leur formidable gourmandise en données et en calculs. Dans le même temps, l'un des principaux avantages des démarches de descente d'échelle statistique est qu'elles sont peu coûteuses en moyens informatiques. Mais elles doivent rendre compte de relations statistiques constantes dans le temps, avec une faible capacité de représentation de réponses aux différents forçages externes.

Enfin, parallèlement à l'amélioration des outils informatiques, a émergé une prise de conscience grandissante de l'importance de l'évaluation de l'incertitude. En effet, une résolution accrue ne signifie pas forcément une confiance accrue dans les projections (Wilby et al. 2004) et un certain nombre de papiers de recherche ont reconnu la valeur ajoutée des simulations multi-modèles, permettant la caractérisation des incertitudes de modélisation et encourageant les scientifiques à accompagner leurs projections climatiques de probabilités (Wilby et al. 2009). Ce qui, en retour, permet de parvenir à des estimations plus fines de la probabilité de différents impacts, et de donner lieu potentiellement à des mesures d'adaptation qui correspondent au plus près à l'état véritable des connaissances climatiques.

4.2 Différentes utilisations des données à haute résolution sur l'évolution du climat pour la planification et la prise des mesures d'adaptation

Sachant que la plupart des impacts de la variabilité climatique et des changements climatiques se manifesteront localement, les climatologues et les décideurs politiques s'attachent aujourd'hui à prendre en considération les risques et à les gérer, de l'échelle locale à l'échelle nationale (GIEC 2014). En outre, les parties prenantes, les décideurs politiques et le secteur privé de l'échelle locale deviennent chaque jour un peu plus des acteurs critiques du processus d'adaptation et de gestion des risques. Ce qui implique également que les besoins d'un territoire soient pris en considération dans l'élaboration des stratégies d'adaptation, et assiste à un déplacement du processus informationnel, qui passe d'une tradition du haut vers le bas (top-down) à une démarche du bas vers le haut (bottom-up). En d'autres termes, le choix du scénario climatique doit être enchâssé dans l'application envisagée, et prendre en considération les contraintes locales que sont le temps, les ressources et les moyens et les capacités humaines (Wilby et al. 2009). Smith et al. (2000) et Wilby et al. (2009) ont proposé une classification des mesures d'adaptation en fonction de leur demande en différents types de données climatiques (voir Tableau 1).

L'un des types d'impacts les plus étudiés, qui s'étendent de l'échelle du champ à l'échelle de la planète, est liés à

la gestion des ressources. Comme l'ont souligné un certain nombre d'auteurs, le calendrier pertinent retenu emporte également des variations, qui vont de quelques heures ou de quelques jours à des saisons et des décennies, et qui impliqueront également de modifier les réponses d'adaptation. L'ajustement ou l'atténuation des risques et de l'exposition aux phénomènes extrêmes et aux changements climatiques qui en découlent (p.ex. Salis et al. 2012) sont un autre exemple d'une mesure d'adaptation, appelée « réaménagement » (retrofitting en anglais) par Wilby et al. (2009). Dans ce cadre, la modélisation des phénomènes extrêmes et de leur intégration en planification de l'adaptation et en gestion des risques reste un défi. Un autre aspect de ce défi est constitué par les mesures d'adaptation comportementale, qui impliquent l'ensemble des démarches opérationnelles pour optimiser les performances des mesures ou des actifs existants. Cette mesure est relativement courante dans le secteur agricole (p.ex. Mancosu et al. 2013), et demande de pouvoir disposer de données fiables à haute résolution, à la fois en termes temporels et en termes spatiaux.

4.3 Exemples d'études d'impacts à haute résolution des changements climatiques

Secteur agricole

Se fondant sur les nombreuses études réalisées sur un éventail très large de régions et de cultures, le GIEC (2014) rapporte que les impacts négatifs des changements climatiques sur le rendement des cultures sont plus courants que les impacts positifs. Le système agricole assistera, entre

Tableau 1. Données climatiques à haute résolution classées en fonction de leurs besoins en ressources, de leur échelle d'application, de leurs besoins en entrants/ apports et des mesures d'adaptation.

Tableau adapté du tableau de Wilby et al. (2009).

MÉTHODES	DEMANDE EN RESSOURCES INFORMATIQUES ET EN CALCULS	APPLICATION SPATIALE	BESOINS EN ENTRANTS/ APPORTS	APPLICATIONS À LA PLANIFICATION DE L'ADAPTATION
Dynamiques	Forte	Local-régional-mondial	MCG hôte, données climatiques observationnelles de grande qualité	Communication, finances, comportementales, gestion des ressources, nouvelle infrastructure
Statistiques	Limitée-modeste	Locale-Régionale	Données climatiques observées	Réaménagement, comportementales, gestion des ressources, communication, institutionnelles, sectorielles

Nouvelle infrastructure = analyse coûts-avantages ; Gestion des ressources et des moyens = évaluation de la disponibilité des ressources naturelles ; Réaménagement = étude préliminaire pour identifier les risques et réduire l'exposition ; Comportementales = mesures destinées à optimiser la planification des performances des infrastructures existantes ; Institutionnelles = réglementation, surveillance, rapports ; Sectorielles = planification économique, restructuration du secteur, directives et normes ; Communication = risques de communication pour les parties prenantes et la planification ; Finances = service de transfert des risques, incitations et assurances

autres, au déclin du rendement des grandes cultures (p.ex. Mereu et al. 2015), à des changements dans les zones de cultures (p.ex., Ciscar et al. 2011), à l'amenuisement des ressources en eau et à l'appauvrissement des sols (Manco-su et al. 2015a). En outre, en raison également de la croissance démographique mondiale, la demande en denrées alimentaires va aller augmentant, et de nombreuses études se penchent actuellement sur cette question dans l'intention de proposer des recommandations qui permettent de prendre en charge ces besoins en alimentation, tout particulièrement dans les pays en développement (p.ex. Mereu et al. 2014).

L'équipe du CMCC a décidé d'utiliser un ensemble de projections climatiques à haute résolution (dérivées des simulations à haute résolution du COSMO-CLM et des ses cinq « perturbations ») pour étudier les impacts des changements climatiques sur le rendement des cultures en Afrique subsaharienne, prenant également en compte de l'incertitude (Mereu et al. 2015). Le progiciel DSSAT^{L116} a été mis en œuvre pour considérer les multiples combinaisons de cultures, de sols, de variétés des plantes/ des semences et de gestion des cultures. Les résultats ont montré que, à moyen terme, même si les prévisions faisaient état d'une augmentation des précipitations, le rendement des cultures (et notamment des cultures céréalières) continuera probablement de baisser en raison de l'augmentation des températures. À l'inverse, il semble que les effets à court terme (2020) soient plus incertains, avec une augmentation probable des récoltes de manioc et de millet. Les auteurs ont par ailleurs souligné que, de manière générale, l'effet direct de l'augmentation du dioxyde de carbone dans l'atmosphère (CO₂) n'atténuera qu'en partie la baisse des rendements (Figure 8).

Tout récemment, dans le cadre du projet CLIMAFRICA, le CMCC a utilisé trois MCG (CanESM2, GFDLES2M et MIROC5) en descente d'échelle à l'appui de démarches statistiques (SOMD - Self-Organizing Maps Downscaling, Hewitson et Crane (2006)) et de démarches dynamiques (SMHI-MCR) pour forcer le modèle d'équilibre hydrique du sol SIMETAW^{L117} (Simulation of Evapotranspiration of Applied Water – simulation de l'évapotranspiration de l'eau appliquée, Snyder et al. (2004), voir Figure 9). L'objectif était de prédire les impacts des changements climatiques sur l'évapotranspiration réelle (ET_c et ET_a), sur les besoins en irrigation (ET_{aw}), et sur le rendement des cultures (réduction du rendement dans des conditions d'irrigation optimales) au cours de la saison de croissance des grandes cultures des 6 pays africains étudiés.

Cette analyse a fait ressortir des différences importantes dans les résultats de modélisation en fonction du MCG et de la méthode de descente d'échelle, avec à l'occasion des signaux contraires sur les cultures selon les projections climatiques considérées. Parmi les pays étudiés, c'est au Kenya qu'ont été relevés les besoins les plus importants en irrigation, ou les valeurs les plus élevées d'évapotranspiration de l'eau appliquée (ET_{aw}), suivi du Malawi, du Togo et du Ghana. En outre,

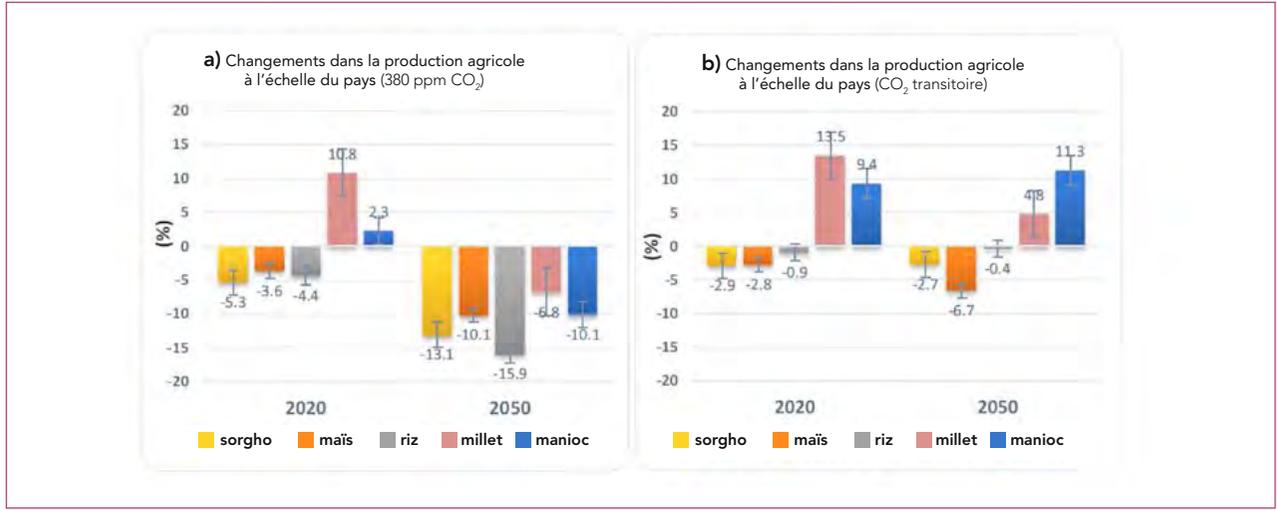


Figure 8. Changements dans le rendement agrégé des cultures au Nigeria pour 2020 et 2050, comparés à l'année de référence (1990) avec concentration constante de CO₂ dans l'atmosphère (a) et concentration accrue de CO₂ dans l'atmosphère (b). Source : Mereu et al. (2015).

il s'est avéré que l'augmentation des valeurs ETwa relevées au Kenya était imputable aux changements climatiques prévus pour les données de descente d'échelle statistique comme pour les données de descente d'échelle dynamique, tandis que très peu de changements, voire aucun changement, n'avaient été relevés dans les autres pays quant à leurs besoins en irrigation. De manière générale, une demande en irrigation plus élevée ressortait de la simulation réalisée à partir de données en descente d'échelle dynamique (Figure 10).

Les résultats ont mis en lumière l'importance de considérer plusieurs modèle climatiques et démarches de descente d'échelle, pour progresser en matière de détermination de l'incertitude dans les impacts attendus. Les participants de l'atelier ont exprimé un intérêt très vif pour l'application de modèles d'équilibre hydrique du sol tels que le SIMETAW# mis en œuvre dans cette étude qui avait pour objectif d'étudier les impacts à haute résolution des changements climatiques sur l'agriculture.

Secteur sylvicole

Les changements climatiques et les forêts interagissent fortement. D'une part, la température de l'air, le rayonnement solaire, les pluies, et les concentrations de CO₂ dans l'atmosphère sont les grands moteurs de la productivité et de la dynamique de la forêt. De l'autre, le climat est également contrôlé par les forêts par le biais d'un certain nombre de caractéristiques telles que le rôle de la forêt en tant que puits de carbone ou de source de carbone (à savoir, éliminer ou absorber le carbone de l'atmosphère), de rafraîchisseur par le biais de l'évapotranspiration, etc. Les

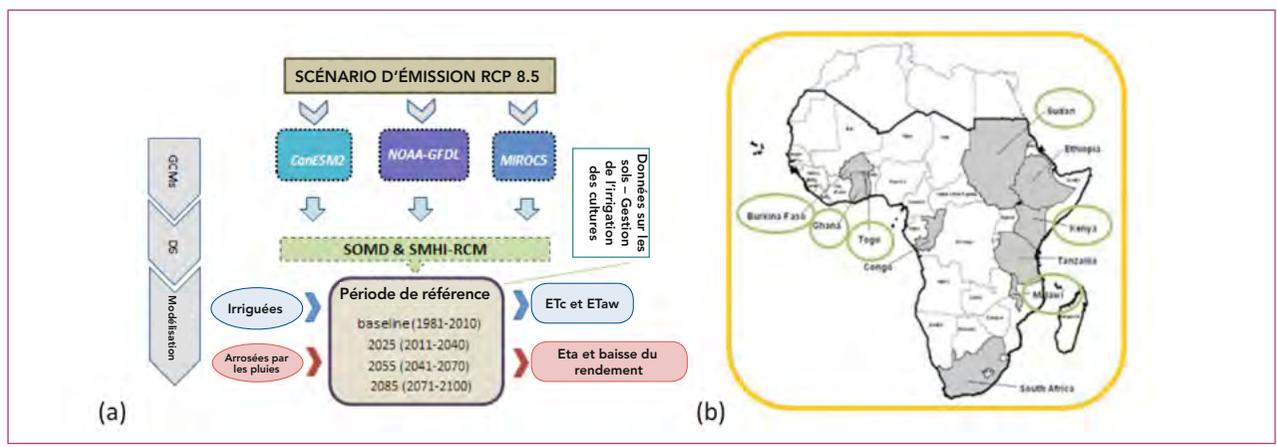


Figure 9. Flux de données (a) appliqué au projet CLIMAFRICA pour étudier les impacts sur, et évaluer les mesures d'adaptation dans, 6 pays d'Afrique subsaharienne (b). Les données de sortie, d'entrée et les échelles temporelles du modèle appliqué sont spécifiées. Source : Mancosu et al. (2015b).

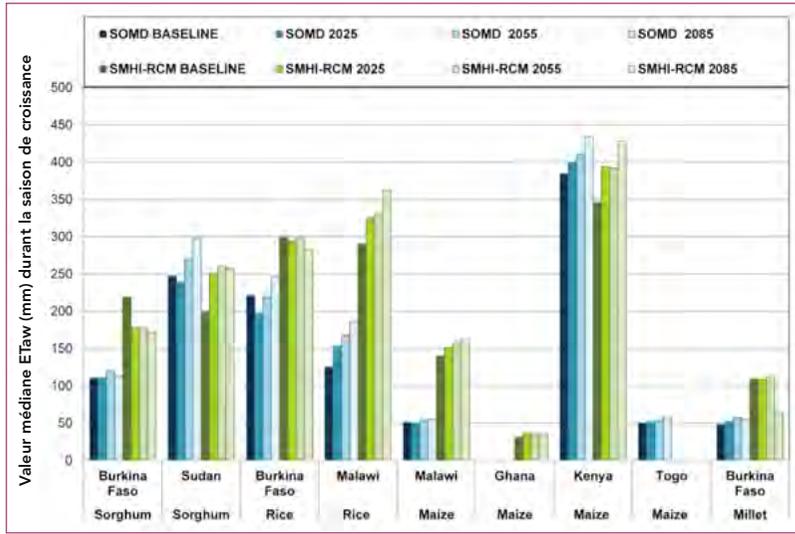


Figure 10. Synthèse des besoins en irrigation des cultures, en supposant une efficacité optimale (ETaw, mm) durant la saison de croissance pour la période de référence et trois périodes futures (2025, 2055, et 2085), et deux méthodes de descente d'échelle (SOMD et SMHI-MCR) mises en œuvre dans chaque pays étudié. Source : Mancosu et al. (2015b).

feux de forêt impactent fortement sur la dynamique forestière dans de nombreuses régions du monde, mais en raison des changements récents et prévus (tels que le nombre accru de jours durant lesquels le risque de départ est élevé, l'allongement de la saison des feux, et la fréquence et la gravité des feux), les prévisions vont dans le sens de pertes plus lourdes encore et d'une envolée des coûts de lutte contre les feux de forêt. C'est pourquoi un certain nombre de chercheurs ont orienté leurs travaux sur le potentiel des activités futures liées au feu, à différentes échelles temporelles, dans un contexte d'environnement en évolution.

L'équipe du CMCC a utilisé trois grandes catégories d'outils pour estimer les dangers, les risques, les activités et les caractéristiques liées au feu : systèmes d'évaluation des risques d'incendies ; propagation et comportement du feu ; et modélisation de la dynamique de la végétation à l'échelle de la planète (MDVP).

Les systèmes d'évaluation des risques d'incendies, qui combinent des variables météorologiques pertinentes en des indices adaptés, constituent généralement des outils précieux pour identifier des conditions potentiellement dangereuses (intensité du feu, grands feux), et pour aider les services de prévention et de lutte contre les risques de feux de forêt pour prévenir et répondre de manière efficace aux dangers prévus. Récemment, la simulation à haute résolution du COSMO-CLM dans le cadre du scénario d'émissions A1B a été utilisé pour évaluer les impacts des dangers présentés par le feu (au moyen de la méthode canadienne de l'indice forêt météo – IFM) dans l'ensemble de la région euro-méditerranéenne (Figure 11). Les projections de l'IFM ont fait apparaître une augmentation de la moyenne annuelle des dangers liés au feu, tout particulièrement dans le sud-ouest de l'Europe. En outre, l'aug-

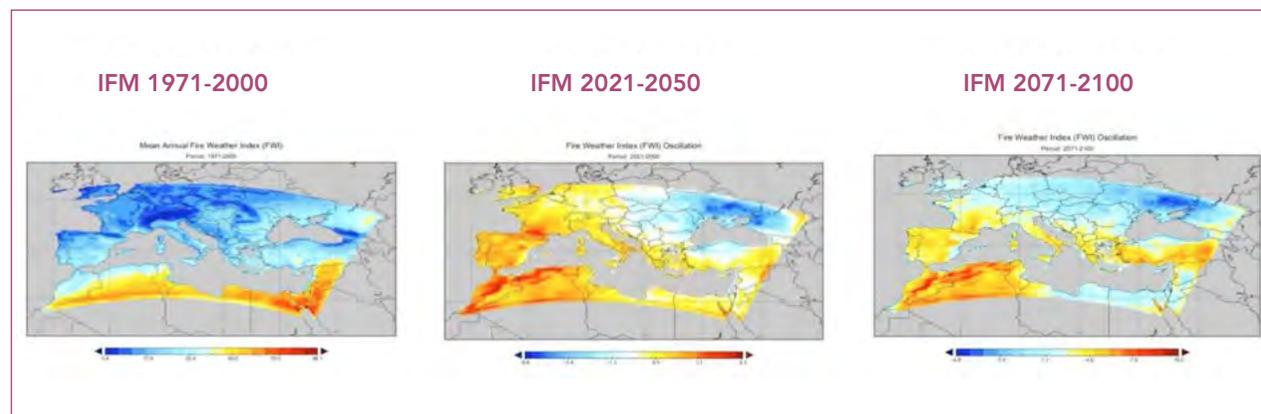


Figure 11. Valeurs moyennes annuelles de l'IFM dans les conditions climatiques actuelles (1971-2000) et pour deux périodes futures (2021-2050 et 2071-2100).

Source : Sirca et al. (2013).

mentation du nombre de phénomènes extrêmes a été également évaluée par le calcul du 75e centile de l'IFM. Les résultats (non montrés) ont mis en lumière une plus grande variabilité, avec une augmentation marquée de la survenue de feux extrêmement dangereux durant le printemps et l'été.

Des ensembles de projections climatiques multi-modèles ont été utilisés par Santini et al. (2014) dans leur application du LPJ-MDVP^{LI18} (Sitch et al. 2003) à l'exploration des incertitudes dans les prédictions des impacts des feux futurs dans la région euro-méditerranéenne. Ainsi, vingt simulations du passé et du futur ont été exécutées, basées sur des combinaisons de différentes données climatiques d'entrée (obtenues à partir de cinq projections climatiques différentes réalisées pour le projet CIRCE en 20C3M (Meehl et al. 2007) et en A1b (Gualdi et al. 2013), ainsi que différents paramétrages, et configurations, de modèles de végétation. Les résultats, évalués en associant un degré de probabilité conforme à la terminologie du GIEC la plus récente, ont montré que presque les deux-tiers du domaine euro-méditerranéen devaient se préparer à souffrir d'une augmentation de la fréquence des feux (Figure 12).

4.4 Évaluer les implications d'impacts à haute résolution d'une prévision saisonnière

Dernièrement, plusieurs groupes de chercheurs ont investis des efforts soutenus dans la conception de systèmes qui couplent prévisions saisonnières à études d'impacts. Dans un contexte de feux de forêt, pouvoir prédire l'influence de la météo sur les départs de feux et la propagation des feux est une nécessité opérationnelle (Roads et al. 2010), qui pourrait contribuer à concevoir et orienter les stratégies à moyen terme de gestion des feux et des combustibles à l'échelle locale/ régionale. L'un des premiers travaux sur cette question (Roads et al. 2005) suggérait que les indices d'évaluation des dangers des feux pourraient être prévus de manière dynamique au moyen d'un modèle expérimental de prévisions saisonnières mondiales-à-régionales (soit une version antérieure du modèle mis au point par les centres nationaux de prévision environnementale des États-Unis (NCEP)). Un tel système de prévisions saisonnières assurerait la disponibilité en continu des données, dans toutes les situations de terrain, avec une couverture spatiale complète. La difficulté cependant est que les prévisions climatiques saisonnières sont chargées d'erreurs systématiques (déficiences du modèle, conditions limites, élévation de terrain, etc.), autant d'aspects qui ont été discutés dans les sections précédentes dans le cadre des projections d'évolution climatique, la correction des biais représentant par conséquent un problème pour les études d'impact présentant des prévisions saisonnières également.

Depuis 2013, le centre commun de recherche de la Commission européenne (CCR/JRC) a mis au point un système

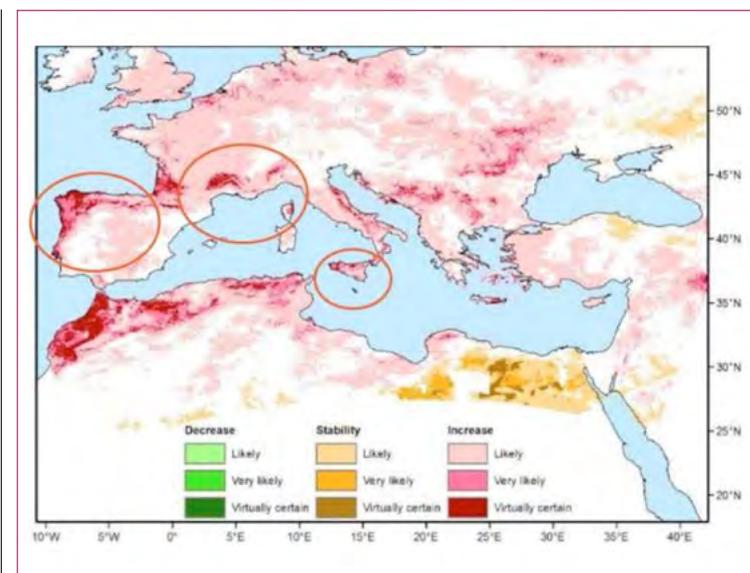


Figure 12. La carte rend compte d'un consensus de prévision des tendances entre différentes simulations (augmentation, diminution et stabilité) d'évolution de la fréquence des feux de 1971-2000 à 2021-2050. N.B. : les tendances sont rapportées uniquement pour les unités cartographiques présentant un degré de probabilité acceptable (probable, très probable, pratiquement certain : donc, un consensus fort). Source : Santini et al. (2014).

expérimental de prévisions à long terme des conditions météorologiques propices aux départs et à la propagation des feux^{L19}, en utilisant les prévisions saisonnières du CEPMMT appelées S4 (Spessa et al. 2015). En parallèle, le CMCC a entrepris d'évaluer la capacité du CMCC-SPS (système de prévisions saisonnières du CMCC, version actualisée du système décrit par Alessandri et al. (2010), puis par Borrelli et al. (2012)), à prévoir les dangers liés au feu. Sirca et al. (2010) ont évalué la réponse du système de prévisions aux échelles annuelle et mensuelle, révélant une maîtrise prometteuse.

5. CONCLUSIONS

La descente d'échelle est un concept qui permet des dimensions et interprétations multiples. À un certain niveau, nous trouvons un concept scientifique, dont l'objectif est d'extraire une expression climatique à haute résolution à l'échelle locale de régimes de circulation régionaux à grande échelle (p.ex. von Storch et al. 1993). À un autre niveau, une définition reposant sur des motivations : il s'agit d'extraire les données climatiques les plus utiles possibles à partir de modèles climatiques pour alimenter et orienter les études d'impact. La première définition, scientifique, respecte, en partie mais pas complètement, la définition motivationnelle.

L'atelier s'est penché sur les deux démarches. Les présentations et exercices pratiques ont exposé les participants aux concepts et méthodes classiques de la descente d'échelle dynamique et statistique. Une attention particulière a par ailleurs été accordée à l'extraction des meilleures données pour nourrir et guider les études d'impacts et l'adaptation : ainsi, il a été montré que même des données de sortie d'un MCR en descente d'échelle dynamique à haute résolution bénéficiaient grandement d'une transformation/ d'un calibrage statistique supplémentaire si elles étaient destinées à être utilisées de manière optimale pour exécuter les modèles d'impacts et sous-tendre les études d'impacts.

L'atelier a permis aux participants de découvrir la possibilité d'avoir accès à des produits de scénarios de changements climatiques à haute résolution qui peuvent s'avérer très utiles pour les études d'impacts dans l'ensemble du

domaine qui intéresse le projet ClimaSouth. De plus, un certain nombre de techniques ont été explicitées, qui permettent de transformer encore des produits à l'aide des données de calibrage mises à la disposition par les stations dans chaque pays. Dans le même temps, l'atelier a été l'occasion d'échanges sur le potentiel d'utilisation des données climatiques nationales pour construire des systèmes d'information et de prévision climatique saisonnière à haute résolution. En outre, il est clair qu'il existe toujours une demande pour la mise en œuvre de modèles de descente d'échelle dynamique qui requièrent des capacités importantes en moyens informatiques et compétences humaines pour traiter certains domaines nationaux et des questions propres à certains secteurs. Les participants de l'atelier ont appris comment fonctionnaient ce type de modèles, et ont pu se familiariser avec les jeux de données, les jugements scientifiques et les capacités informatiques et de calcul requis. Les participants « climat » auraient souhaité pouvoir faire des exercices pratiques supplémentaires pour arriver à maîtriser les compétences de descente d'échelle dynamique et statistique. Les participants « impacts », quant à eux, ont exprimé le vœu de pouvoir se familiariser plus avant avec la modélisation climatique et la descente d'échelle, pour retirer des connaissances suffisantes qui leur permettent d'interpréter de manière précise les données climatiques qui alimentent les modèles d'impacts et les études d'impacts, ces derniers étant mieux à même de sous-tendre les mesures d'adaptation.



6. SOURCES EN LIGNE

DESCENTE D'ÉCHELLE DYNAMIQUE DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES ET VALIDATION

^{L12}Information CORDEX et données MCR : <http://www.cordex.org/>

^{L14}données du RE4 GIEC : http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/SRES_AR4/index.html

^{L15}données du RE5 GIEC : http://www.ipcc-data.org/sim/gcm_monthly/AR5/index.html

^{L16}modèle climatique et informations sur la communauté COSMO-CLM :
<http://www.clmcommunity.eu/index.php?menuid=1>

^{L17}page d'accueil CDO : <https://code.zmaw.de/projects/cdo>

guide de l'utilisateur de CDO : <https://code.zmaw.de/projects/cdo/embedded/cdo.pdf>

Carte de référence CDO : https://code.zmaw.de/projects/cdo/embedded/cdo_refcard.pdf

^{L18}Données E-OBS observées maillées à haute résolution sur les précipitations et les températures :
<http://www.ecad.eu/download/ensembles/ensembles.php>

^{L19}Données observées maillées à haute résolution CRU : <http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>

^{L10}Package logiciel en R qmap : <https://cran.r-project.org/web/packages/qmap/index.html>

Logiciel en R (en accès ouvert et gratuit) de calcul statistique : <https://www.r-project.org/>

PRÉVISIONS SAISONNIÈRES ET DESCENTE D'ÉCHELLE

^{L11}prévisions saisonnières du CEPMMT : <http://www.ecmwf.int/en/previsions/documentation-and-support>

^{L12}OPC : <http://iri.columbia.edu/our-expertise/climate/tools/cpt/>

^{L13}Tutoriel en anglais sur l'OPC (y compris discussion du PCR et ACC):
http://iri.columbia.edu/wpcontent/uploads/2013/07/OPC_Tutorial.pdf

Tutoriel en français sur l'OPC (y compris discussion de la PCR et de l'ACC) :

http://iri.columbia.edu/wpcontent/uploads/2013/07/OPC_Tutorial_French.pdf

^{U14}données TSM pour l'OPC (peuvent être téléchargées au format prêt-à-utiliser dans l'OPC) :

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCDC/.ERSST/.version3b/.anom/>

^{U15}précipitations sous TRMM NASA (résolution : 25 km) :

http://disc.sci.gsfc.nasa.gov/precipitation/documentation/TRMM_README/TRMM_3B43_readme.shtml

Observations mondiales pluie et neige de nouvelle génération de la NASA (GPM) : <http://pmm.nasa.gov/gpm>

^{U19}prévisions saisonnières des feux de forêt : <http://forest.jrc.ec.europa.eu/effis/applications/long-termforecast/>

MODÈLES D'IMPACTS

^{U16}modèle DSSAT : <http://dssat.net/>

^{U17}modèle SIMETAW# : <http://www.water.ca.gov/landwateruse/models.cfm>

^{U18}modèle LPJ : <https://www.pik-potsdam.de/research/projects/activities/biosphere-watermodelling/lpjml>

AUTRES INFORMATIONS DE CONTEXTE

^{U1}e-manuel ClimaSouth n° 2, Améliorer les informations sur le climat : <http://www.climasouth.eu/en/node/116>

^{U3}données de réanalyse du CEPMMT : <http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>



7. RÉFÉRENCES

- Alessandri A, Borrelli S, Masina P, Di Pietro A, Carril F, Cherchi A, Gualdi S, Navarra A, (2010) Le système de prévision saisonnière CMCC-INGV : Conditions initiales océaniques améliorées. *Mon. Wea. Rev.*, 138:2930–2952, 2010.
- Athanasiadis P J, Bellucci A, Hermanson L, Scaife A, MacLachlan C, Arribas A, Materia S, Borrelli A, Gualdi S, (2014) La représentation des blocages atmosphériques et la variabilité à basse fréquence associée dans deux systèmes de prévisions saisonnières, *J. Climate*, 27, 9082-9100
- Bedia J, Herrera S, San Martín D, Koutsias N, Gutiérrez J M, (2013) Projections robustes à partir de l'indice forêt météo (IFM) en Méditerranée au moyen de descente d'échelle statistique. *Climatic Change*. doi: 10.1007/s10584-013-0787-3
- Berg P, Feldmann H, Panitz H J, (2012) Correction des biais des données climatiques régionales de sortie de modèle à haute résolution. *Journal of Hydrology*, 448-449: 80-92.
- Black E, Brayshaw D J, Rambeau C M, (2010) Précipitations passées, présentes et futures au Proche Orient : ce que nous apprennent les modèles et les observations. *Phil. Trans. R. Soc. A* 368, 5173–5184. doi:10.1098/rsta.2010.0199
- Boberg F, Christensen J H, (2012) Surestimation des projections de températures estivales en Méditerranée due aux déficiences du modèle. *Nature Changements climatiques*, 2:433-436. <http://dx.doi.org/10.1038/NCLIMATE1454>
- Bolle H-J, Ed., (2003) *Le climat méditerranéen : variabilité et tendances*. Springer Verlag. ISBN 978-3-642-55657-9.
- Borrelli A, Materia S, Bellucci A, Alessandri A, Gualdi S, (2012) Système de prévisions saisonnières du CMCC. Research Papers Issue RP0147. Disponible sur : <http://www.cmcc.it/it/publications-type/presentazione-della-ricerca>
- Cassou C, Terray L, (2001) Forçage océanique de la variabilité atmosphérique à basse fréquence hivernale dans le secteur européen de l'Atlantique Nord : étude réalisée à l'appui du modèle ARPEGE. *J. Climate* 14:4266–4291
- Cassou C, Terray L, Phillips A S, (2005) Influence atlantique tropicale sur les vagues de chaleur en Europe. *J. Climate* 18, 2805–2811.
- Christensen J H, Carter T R, Rummukainen M, Amanatidis G, (2007) Évaluation de la performance et de l'utilité des modèles climatiques régionaux : le projet PRUDENCE. *Climatic Change*, 81(1), 1-6.
- Ciscar J C, Iglesias A, et al. (2011) Conséquences physiques et économiques des changements climatiques en Europe, actes de l'Académie nationale des sciences 108: 2678-2683.



- ClimaSouth (2015) Améliorer les informations sur le climat. e-manuel ClimaSouth n° 2, pp 49, produit à l'issue de l'atelier des 28 au 30 avril 2014 à Lecce (Italie). http://www.climasouth.eu/drupal/docs/E_Handbook_N2_ENG.pdf
- Dee D P, et al. (2011) La reanalyse ERA-Interim : configuration et performances du système d'assimilation de données. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137(656), 553-597.
- Fereday, D R, Maidens A, Arribas A, Scaife A A, Knight J R, (2012) Les prévisions saisonnières hivernales de l'hémisphère nord 2009/10. Environ. Res. Lett. 7. Online at stacks.iop.org/ERL/7/034031.
- Fowler H J, Blenkinsop S, Tebaldi C, (2007) Relier la modélisation des changements climatiques aux études d'impacts : dernières avancées des techniques de descente d'échelle pour la modélisation hydrologique. Int. J. Climatol., 27: 1547–1578, doi: 10.1002/joc.1556
- Giorgi F, et al. (2001) Données climatiques régionales : évaluation et projections. In: Changements climatiques (2001) The Scientific Basis. Contribution du Groupe de travail I au troisième Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (Houghton J T, et al. (eds)). Cambridge University Press, Cambridge et New York.
- Giorgi F, Mearns L, (1991) Démarches de simulation des changements climatiques régionaux : état des lieux. Reviews of Geophysics, 29(2): 191-216.
- Giorgi F, Lionello P, (2008) Projections de changements climatiques : évolution de la région méditerranéenne, mondiale et planétaire. Vol 3, pp 90-104 doi:10.1016/j.jgloplacha.2007.09.00
- Giorgi F, Jones C, Asrar G R, (2009) Répondre aux besoins de l'échelle régionale en données climatiques : le cadre CORDEX. Organisations météorologique mondiale (OMM) Bulletin, 58(3), 175.
- Gualdi S, Somot S, Li L, et al. (2013) Les simulations du CIRCE : nouveau jeu de projections de changements climatiques régionaux réalisées à l'appui d'une représentation réaliste de la mer méditerranée. Bull. Amer. Meteor. Soc., doi:10.1175/BAMS-D-11-00136.1
- Gudmundsson L, Bremnes J B, Haugen J E, Engen-Skaugen T, (2012) Note technique : Descente d'échelle de précipitations MCR à l'échelle de la station au moyen de transformations statistiques – comparaison méthodologique. Hydrology et Earth System Science, 16, 3383-3390, doi:10.5194/hess-16-3383-2012,
- Gutjahr O, et Heinemann G, (2013) Comparaison de méthodes de correction des biais des précipitations pour des simulations régionales climatiques à haute résolution en utilisant le COSMO-CLM. Theoretical et Applied Climatology, 114, 511 – 529.
- Hansen J W, Indeje M, (2004). Lier les prévisions climatiques saisonnières dynamiques à la simulation des cultures vers la prédiction du rendement du maïs dans les zones semi-arides du Kenya. Agricultural et Forest Meteorology, 125: 143–157
- Hansen J W, et al. (2006) Traduire les prévisions en termes agricoles : avancées et difficultés. Climate Research, 33(1), 27-41.
- Harris I, Jones P D, Osborn T J, Lister D H, (2014) Grilles à haute résolution actualisées des observations climatiques mensuelles – le jeu de données CRU TS3.10. International Journal of Climatology, 34(3), 623-642.



- Haylock M R, Hofstra N, Klein Tank A M G, Klok E J, Jones P D, New M, (2008) Jeu de données maillées européennes à haute résolution des températures de surface et des précipitations journalières pour 1950–2006. *Journal of Geophysical Research: Atmosphères* (1984–2012), 113(D20).
- Hewitt C D, (2005) Le projet ENSEMBLES : Fournir des prédictions des changements climatiques et de leurs impacts basées sur des ensembles EGGs Newsletter, No. 13, pp. 22–25.
- Huffman G J, et al. (2007) L'analyse des précipitations multi-satellites de la TRMM : estimations combinées des précipitations à partir de capteurs quasi-mondiales, multi-années, à fine échelle. *J. of Hydrometeor.*, 8: 38–55, doi: 10.1175/JHM560.1.
- Ines V M, Hansen J W, (2006). Correction des biais du MCG journalier sur les pluies à des fins d'études de simulation de cultures. *Agricultural et Forest Meteorology* 138, 44–53
- GIEC, 2013 : Résumé à l'intention des décideurs. In : *Changements climatiques 2013 : le fondement des sciences physiques. Contribution du Groupe de travail I au 5e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* (Thomas Stocker et Qin Dahe) G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex et P.M. Midgley (eds.)). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA.
- GIEC, 2014 : *Changements climatiques 2014 : Impact, adaptation et vulnérabilité. Partie A : Aspects mondiaux et sectoriels. Contribution du Groupe de travail II au 5e Rapport d'évaluation du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, et L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom et New York, NY, USA, 1132 pp.
- Kushnir Y, et al. (2006) Les fondements physiques des prévisions de la variabilité climatique d'une saison à l'autre et d'une année à l'autre dans le secteur atlantique. *J. Climate*, 23, 5949-5970.
- Lamb P J, Pepler R A, (1987). L'oscillation nord atlantique : concept et application. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 68, 1218–1225.
- Mancosu N, (2013) *Évaluation de la demande en eau dans l'agriculture par la mise en œuvre du modèle SIMETAW#*. Thèse de doctorat. University of Sassari, February, 18th 2013.
- Mancosu N, Snyder R L, Kyriakakis G, Spano D, (2015a) Rareté de l'eau et défis à venir pour la production alimentaire. *Water* 2015, 7(3), 975-992; doi:10.3390/w7030975.
- Mancosu N, Snyder R L, Spano, D (2015b). Les incertitudes qui pèsent sur la demande en irrigation et la productivité pour couvrir les besoins des populations futures en Afrique. Rome2015 Symposium scientifique sur le climat. November, 19-20 2015.
- Maraun D, et al. (2010) Descente d'échelle des précipitations dans un contexte de changements climatiques. Dernières avancées destinées à combler l'écart entre les modèles dynamiques et l'utilisateur final. *Rev. Geophys.* 48, RG3003.

- Mariotti A, Zeng N, Lau K-M, (2002) Les pluies dans la région euro-méditerranéenne et l'ENSO – Une relation variable selon la saison. *Geophys. Res. Lett.*, 29, 1621, doi:10.1029/2001GL014248.
- Materia S, Borrelli A, Bellucci A, Alessandri A, Di Pietro P, Athanasiadis P, Navarra A, Gualdi S, (2014): Impact de l'atmosphère et des conditions initiales surfaciques sur les prévisions saisonnières des températures de surface mondiales, *J. Climate*, 27, 9253-9271.
- Mereu V, Daccache A, Mancosu N, Gallo A, Trabucco A, Snyder R L, Spano D, (2014) Cartes d'évaluation d'une zone agro-écologique d'indices agro-climatiques, d'indices de pertinences, et de rendement des cultures pour des périodes passées récentes et dans un avenir proche ; cartes de capacités foncières pour l'agriculture en termes de caractéristiques des sols et du climat (à la fois sur la période de référence et pour des périodes futures) à l'échelle nationale. DLV n° 3.7, FP7 Climafrica Project (grant agreement 244240)
- Mereu V, Carboni G, Gallo A, Spano D, (2015) Impact des changements climatiques sur la production des denrées alimentaires de base au Nigeria. *Climatic Change*. DOI: 10.1007/s10584-015-1428-9.
- Meehl G A, Covey C, Delworth T, Latif M, McAvaney B, Mitchell J F B, Stouffer R J, Taylor K A (2007) Le jeu de données multi-modèles PMRC CMIP3 – une nouvelle ère dans la recherche sur les changements climatiques. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* 88:1383–1394
- Metha V M, Suarez M J, Manganello J V, Delworth T L, (2000) Influence océanique sur l'oscillation nord atlantique et les variations climatiques associées dans l'hémisphère nord : 1959–1993. *Geoph. Res. Lett.* 27 (1): 121- 124.
- Paolino D A, Kinter J L, et al. (2012) Impact de l'initialisation de la surface terrestre et atmosphérique sur les prévisions saisonnières avec le CCSM. *Journal of Climate* 25(3): 1007-1021.
- Piani C, Haerter J O, Coppola E, (2009). Correction statistique de biais pour les précipitations journalières dans les modèles climatiques régionaux en Europe. *Theor. Appl. Climatol.*, 99:187–192. DOI 10.1007/s00704-009-0134-9
- Rodo X, Baert E, Comin F A, (1997) Variations des pluies saisonnières en Europe du Sud au cours de ce siècle : relations avec l'oscillation nord atlantique et l'oscillation australe-El Niño (ENSO). *Climate Dyn.*, 13, 275–284.
- Roads J, Fujioka F, Chen S, Burgan R, (2005) Prévisions saisonnières des dangers de feux pour les États-Unis. *International Journal of Wildland Fire* 14, 1–18. doi:10.1071/WF03052
- Roads J, Tripp P, Juang H, Wang J, Fujioka F, Chen S, (2010) Prévisions mensuelles à saisonnières des dangers de feux, produites par les NCEP-ECPC américains. *International Journal of Wildland Fire*, 19:399-414
- Rockel B, Will A, Hense A, (2008) Le modèle climatique régional COSMO-CLM (CCLM). *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4):347–348.
- Salis M, Laconi M, Ager A, Arca B, Alcasena Urdirroz F, Dettori S, Cillara M, Spano D, (2015) Évaluation des compromis entre stratégies concurrentes de traitement des combustibles vers la maîtrise des pertes causées par les feux de forêt : le cas du Nord de la Sardaigne, en Italie. Actes de la 11e Conférence internationale sur les risques et les comportements du feu ISBN 978-88-97666-05-9.

- Salis M, Ager A A, Arca B, Finney M A, Bacciu V, Duce P, Spano D, (2012) Évaluation de l'exposition des valeurs humaines et écologiques aux feux de forêt en Sardaigne, en Italie. *International Journal of Wildland Fire*, 22(4):549-565. DOI: 10.1071/WF11060.
- Santini M, Collalti A, Valentini R, (2014) Impacts des changements climatiques sur le cycle végétal et aquatique dans la région euro-méditerranéenne, étudiés dans le cadre d'une démarche de probabilité. *Reg. Environ. Change*, DOI 10.1007/s10113-013-0582- 8.
- Scaife A A, et al. (2014) Prédiction prudente à long terme des hivers européens et nord-américains. *Geophys. Res. Lett.*, 41, 2514–2519.
- Scoccimarro E, Gualdi S, et al. (2011) Effets des cyclones tropicaux sur le transport de chaleur par les océans dans un modèle de circulation générale couplé à haute résolution. *Journal of Climate*, 24, 4368-4384.
- Shaman J, Tziperman E, (2011) La télé-connexion atmosphérique entre l'ENSO et les précipitations en Europe du sud-ouest. *J. Climate*, 24, 124–139.
- Sirca C, Bacciu V, Salis M, Arca B, Duce P, Alessandri A, Borrelli A, Navarra A, Spano D, (2010) Prévisions saisonnières des dangers de feux de forêt dans la région euro-méditerranéenne. In : 29e Conférence de météorologie agricole et forestière, Keystone, Colorado (É-U)
- Sitch S, Smith B, Prentice I C, Arneeth A, Bondeau A, Cramer W, Kaplan J, Levis S, Lucht W, Sykes M, Thonicke K, Venevski S, (2003) Évaluation de la dynamique éco-systémique, de la géographie des plantes et du cycle du carbone terrestre dans le modèle de végétation dynamique LPJ. *Glob. Change Biol.*, 9:161–185
- Smit B, Burton I, Klein R J T, Wandel J, (2000) Anatomie de l'adaptation aux changements climatiques et à la variabilité. *Climatic Change* 45: 223–251.
- Smith T M, Reynolds R W, (2003) Reconstruction étendue des températures mondiales à la surface de la mer à l'appui des données COADS 1854-1997. *J. Climate* 16, 1495–1510.
- Spessa A C, Field R D, Pappenberger F, Langner A, Englhart S, Weber U, Stockdale T, Siegert F, Kaiser J W, Moore J (2015) Prévisions saisonnières des feux dans la région de Kalimantan, en Indonésie. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 15, 429- 442, doi:10.5194/nhess-15-429-2015.
- Steppeler J, Doms G, Schättler U, Bitzer H W, Gassmann A, Damrath U, Gregoric G, (2003). Prévisions à l'échelle méso-gamma en utilisant le modèle non hydrostatique LM. *Meteorology et Atmospheric Physics*, 82(1-4), 75-96.
- Teutschbein C, Seibert J, (2012) Correction des biais des simulations climatiques régionales en sortie de modèle aux fins de l'étude des impacts des changements climatiques hydrologiques : examen et évaluation de différentes méthodes. *Journal of Hydrology* 456–457:12–29. DOI: 10.1016/j. jhydrol.2012.05.052
- Turco M, Zollo A L, Ronchi C, de Luigi C, Mercogliano P, (2013) Évaluation des observations maillées pour des précipitations journalières extrêmes dans les Alpes, avec une focale particulière sur le nord-ouest de l'Italie. *Natural Hazards et Earth System Sciences*, Vol. 13 (6), pp. 1457-1468 (2013).



- van Vuuren D P, et al. (2011) Profils représentatifs d'évolution de concentration (RCP) : vue d'ensemble. *Climatic Change*, 109:5-31.
- Vermeulen S J, Challinor A J, Thornton P K, et al. (2013) Comment traiter l'incertitude dans la planification de l'adaptation pour l'agriculture. Actes de l'Académie nationale des sciences des États-Unis d'Amérique ; 10:8357–8362.
- Vezzoli R, Pecora S, Manzi M P, (2013) Recours à des générateurs météorologiques pour simuler des scénarios de précipitations journalières à partir de prévisions météorologiques saisonnières. *Research Papers Issue RP0176*. Disponible sur <http://www.cmcc.it/it/publications-type/presentazione-della-ricerca>
- von Storch H, Zorita E, Cubasch U, (1993) Estimations de l'évolution climatique mondiale descendues à des échelles régionales : application aux pluies dans la péninsule ibérique en hiver. *J. Climate*, 6: 1161–1171, doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<3505:OTUOII>2.0.CO;2.
- Wilby R L, Charles S, Mearns L O, Whetton P, Zorito E, Timbal B, (2004) Directives sur la manière d'utiliser les scénarios climatiques mis au point à partir de méthodes de descente d'échelle statistique, Équipe spéciale pour les données et les scénarios servant à l'analyse du climat et de ses incidences (TGICA) du GIEC. Hyperlien : http://www.ipccdata.org/guidelines/dgm_no2_v1_09_2004.pdf.
- Wilby R L, Troni J, Biot Y, Tedd L, Hewitson B C, Smith D M, Sutton R T, (2009) État des lieux des informations sur les risques climatiques à des fins de planification de l'adaptation et du développement. *Int. J. Climatol.*, 29: 1193–1215. doi: 10.1002/joc.1839.
- Wilks D S, Wilby R L, (1999) Le grand jeu de la fabrication météo : examen des modèles météorologiques stochastiques. *Progress in Physical Geography*, 23, 329-357.
- Zollo A L, Mercogliano P, Turco M, Vezzoli R, Rianna G, Bucchignani E, Manzi M P, Montesarchio M, (2012) Architectures et outils d'analyse de l'impact des changements climatiques sur les risques hydrogéologiques dans les 32 régions méditerranéennes. *Research Papers Issue RP0129*. Disponible sur <http://www.cmcc.it/it/publicationtype/presentazione-della-ricerca>
- Zollo A L, Turco M, Mercogliano P, (2015) Évaluation des techniques hybrides de descente d'échelle pour les précipitations sur le bassin versant du Po. *Engineering Geology for Society et Territory*, Vol. 1, 193-197.



