

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/40720126>

Projet Cyprim, partie II: Impact du changement climatique sur les événements de pluie intense du bassin méditerranéen

Article in *La Météorologie* · December 2009

DOI: 10.4267/2042/30036 · Source: OAI

CITATIONS

7

READS

123

13 authors, including:



Jam Boe

Tea Research Association

13 PUBLICATIONS 488 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



V. Ducrocq

Centre National de Recherches Météorologiques

211 PUBLICATIONS 6,162 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Bruno Joly

Centre National de Recherches Météorologiques

23 PUBLICATIONS 359 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



Eric Martin

Institute of Research for Development

275 PUBLICATIONS 12,747 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



HyMeX SOP1 [View project](#)



MedECC [View project](#)

Projet Cyprim, partie II

Impact du changement climatique sur les événements de pluie intense du bassin méditerranéen

Résumé

Un deuxième thème abordé dans le cadre du projet Cyprim vise à caractériser, dans le contexte du changement climatique, l'évolution des phénomènes de pluie intense en région méditerranéenne. À cette fin, une simulation climatique de 1960 à 2099 a été réalisée à l'aide d'un modèle régional couplé océan-atmosphère sous le scénario d'émissions A2 du Giec. Différentes méthodes de descente d'échelle (jusqu'à une échelle très fine de 2 km) et de détection d'environnements synoptiques favorables aux précipitations intenses sont ensuite proposées pour estimer l'impact du changement climatique sur les précipitations et l'hydrologie du sud-est de la France, tant du point de vue saisonnier que lors des épisodes de pluies intenses.

Abstract

Impact of climate change on heavy precipitation events of the Mediterranean basin

A second topic covered by the CYPRIM project⁽¹⁾ aims to characterize the evolution of heavy precipitation events in Mediterranean in the context of climate change. To this end, a continuous climate simulation from 1960 to 2099 has been run using a regional ocean-atmosphere coupled model under IPCC A2 emission scenario. Various techniques of downscaling, down to the very fine 2 km scale, and methods to highlight synoptic environments favourable to heavy rain, have been used to estimate the impact of climate change on precipitation and hydrology over South-East France, both for the whole autumn season and the heavy rain events.

D. Ricard⁽¹⁾, A.-L. Beulant⁽¹⁾, J. Boé⁽²⁾, M. Déqué⁽¹⁾, V. Ducrocq⁽¹⁾, A. Joly⁽¹⁾, B. Joly⁽¹⁾, E. Martin⁽¹⁾, O. Nuissier⁽¹⁾, P. Quintana Seguí⁽¹⁾, A. Ribes⁽¹⁾, F. Sevault⁽¹⁾ et S. Somot⁽¹⁾

(1) Groupe d'étude de l'atmosphère météorologique (Game), Météo-France et CNRS
42, avenue Gaspard-Coriolis - 31057 Toulouse Cedex

(2) Centre européen de recherche et de formation avancée en calcul scientifique (Cerfacs-CNRS)

La zone méditerranéenne apparaît de plus en plus comme l'un des principaux « points chauds » régionaux du changement climatique (Giorgi, 2006) car les modèles climatiques globaux et régionaux (IPCC, 2007) s'accordent pour y annoncer un réchauffement plus important que dans beaucoup d'autres régions, en particulier l'été. Celui-ci s'accompagne d'un assèchement en moyenne annuelle, surtout l'été, ainsi que d'une augmentation de la variabilité interannuelle. Ces tendances prévues pour le XXI^e siècle rendent la région méditerranéenne très vulnérable au changement climatique. De plus, certaines études montrent que les précipitations intenses pourraient augmenter dans la région malgré la diminution des précipitations en moyenne (Boberg et al., 2008). L'impact du changement climatique sur la fréquence, l'intensité et la localisation préférentielle des événements de précipitations intenses qui touchent les régions voisines de la Méditerranée reste cependant encore une question ouverte.

En effet, les modèles de climat, bien qu'ayant beaucoup progressé au cours des dernières années, tant en résolution qu'en représentation des processus, ont encore beaucoup de difficultés

à rendre compte avec un niveau de réalisme et de confiance suffisant des événements convectifs intenses. Pour palier cette déficience, des méthodes de descente d'échelle des simulations climatiques sont développées. Dans le cadre du projet Cyprim⁽¹⁾, une méthode originale de descente d'échelle statistico-dynamique est élaborée. Elle tire profit des connaissances acquises et des outils de modélisation à haute résolution utilisés dans les autres thèmes du projet. D'autres méthodes statistiques de descente d'échelle ont aussi été appliquées à des sorties de modèles de climat et ont traité jusqu'à l'impact hydrologique, fournissant ainsi un autre moyen de critique et de comparaison.

Cette étude cherche à poser les bases méthodologiques permettant d'étudier l'évolution possible des événements de pluie intense dans leur fréquence, leur saisonnalité, leur intensité, leur positionnement géographique, leur durée et leur impact hydrologique. Pour cela, une méthodologie innovante fondée sur l'association de méthodes de descente d'échelle dynamique et statistique

(1) Part I, La Météorologie, 8^e série, 66, 18-28.

(1) Voir aussi le projet Cyprim partie I, La Météorologie, 8^e série, 66, 18-28.

(figure 1) a été mise en place et testée. Tout d'abord, des simulations climatiques ont été réalisées avec un modèle régional couplé selon le scénario A2 du Giec (Somot et al., 2008). Ensuite, l'impact hydrologique a été estimé en utilisant deux méthodes statistiques de descente d'échelle (Boé et al., 2006 ; Déqué, 2007). Puis une méthode de descente d'échelle statistico-dynamique a été mise en œuvre pour étudier l'évolution de l'intensité des événements fortement précipitants en Méditerranée, en particulier dans le sud de la France, dans le contexte du climat futur de la fin de ce siècle. Cette méthode commence par l'identification, puis la sélection de situations choisies dans des classes d'environnements synoptiques favorables au déclenchement d'épisodes de pluies intenses (Joly et al., 2007), à la fois dans le climat présent (1961-1990) et dans le climat futur (2070-2099). Ensuite, ces cas sont simulés à l'aide d'un modèle à haute résolution capable de représenter de façon détaillée les mécanismes conduisant à la formation d'événements précipitants. La sélection d'un ensemble limité de situations à simuler avec le modèle à haute résolution est nécessaire compte tenu du coût numérique élevé de telles simulations. En revanche, avec un modèle à résolution kilométrique, on a une bien meilleure représentation des processus convectifs et donc de l'intensité des événements de pluie intense. L'évolution de la fréquence est pour sa part évaluée à travers celle des environnements propices aux événements de pluie intense.

Les simulations climatiques couplées

Les simulations climatiques à partir desquelles la méthode a été appliquée ont été réalisées à l'aide d'un modèle de climat régional couplé océan-atmosphère. Ce modèle, nommé Samm (Sea-Atmosphere Mediterranean Model), est le premier du genre pour l'étude du bassin méditerranéen : il est à la fois régional, c'est-à-dire qu'il représente le climat méditerranéen et ses forçages (relief, traits de côte, îles, vallées), à haute résolution pour un modèle de climat (50 km), et il est aussi couplé afin de tenir compte des interactions entre l'atmosphère régionale et la mer Méditerranée. Ce couplage est réalisé entre : le modèle Arpège-Climat, un modèle global d'atmosphère qui possède la capacité d'être zoomé sur

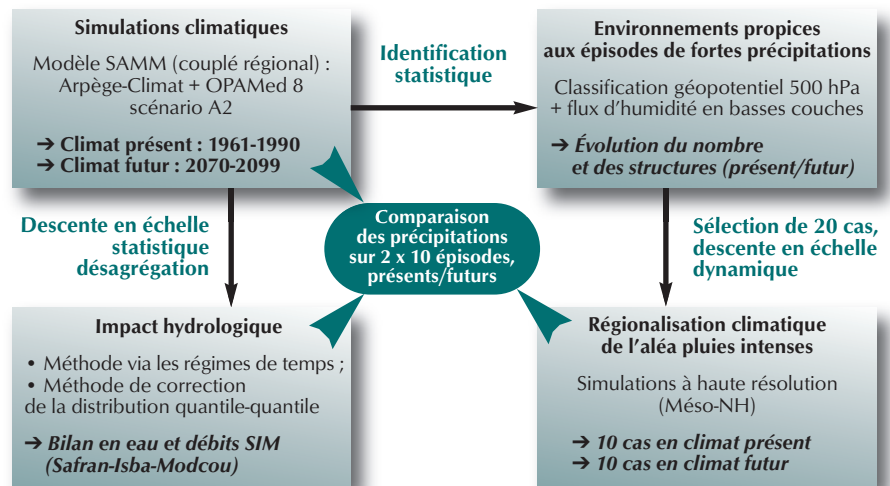


Figure 1 - Schéma présentant les différents modules de la méthode proposée (voir le texte de l'article pour les explications relatives à chaque module).

une zone d'étude particulière (ici la zone méditerranéenne représentée à 50 km de résolution) ; et Opamed8, un modèle régional océanique de la mer Méditerranée à 10 km de résolution.

Le modèle Samm est décrit en détail dans Somot (2005). Dans le cadre du projet Cyprim, une simulation continue de 1960 à 2099 a été réalisée. Ses forçages externes (concentration des gaz à effet de serre, concentration en aérosols, température de la mer hors Méditerranée, fleuves méditerranéens, caractéristiques de la mer Noire et du proche Atlantique) correspondent aux observations jusqu'en 2000 ; l'hypothèse du scénario d'émission A2⁽¹⁾ est ensuite appliquée au cours du XXI^e siècle. On la désigne par la suite **simulation Cyprim** ou **Samm/Cyprim**.

Impact du changement climatique sur la zone méditerranéenne en automne

Les résultats de cette simulation, en particulier le changement climatique simulé en été et en hiver, sont décrits dans Somot et al. (2008). On s'intéresse ici plus particulièrement à la saison automnale, en termes d'impact moyen du changement climatique dans un premier temps. On examine l'évolution des paramètres moyens sur les mois d'automne (en général de septembre à novembre, certains résultats sont présentés pour la période septembre-décembre) entre deux périodes de 30 ans que l'on désigne par la suite par **climat présent** (1961-1990) et **climat**

futur (2070-2099). Le modèle Samm diffère des modèles régionaux classiques par sa capacité à simuler l'évolution de la température de surface de la mer Méditerranée à haute résolution. L'élévation de la température prévue pour la fin de ce siècle par rapport à aujourd'hui (figure 2a), est ainsi comprise entre +2,5 °C et +3,5 °C pour l'automne avec un maximum localisé au large des côtes françaises.

Les figures 2b, 2c, 2d montrent respectivement l'intensité régionale du changement de pression au niveau de la mer (anomalie anticyclonique de 2 hPa centrée sur le nord-ouest de la France), du réchauffement à 2 m, et la diminution des pluies dans la partie ouest de la Méditerranée et leur augmentation dans la partie est. En comparant la simulation Cyprim couplée régionale à une simulation jumelle réalisée sans couplage (Gibelin et Déqué, 2003), c'est-à-dire avec le modèle Arpège-Climat seul, on peut conclure que l'introduction du couplage n'a pas d'impact significatif sur la moyenne saisonnière en automne pour la France.

Impact du changement climatique sur les extrêmes de pluie en automne dans le sud-est de la France

Analysons maintenant les résultats de la simulation climatique en termes d'impacts sur les extrêmes de pluie. Pour cela, on définit un événement de pluie

(1) Scénario d'émission A2 provenant du « Special Report on Emissions Scenarios (SRES) » (Nakicenovic et al., 2000) défini et utilisé dans les 3^e et 4^e rapports d'évaluation du Giec, par exemple, pour le dernier : IPCC (2007).

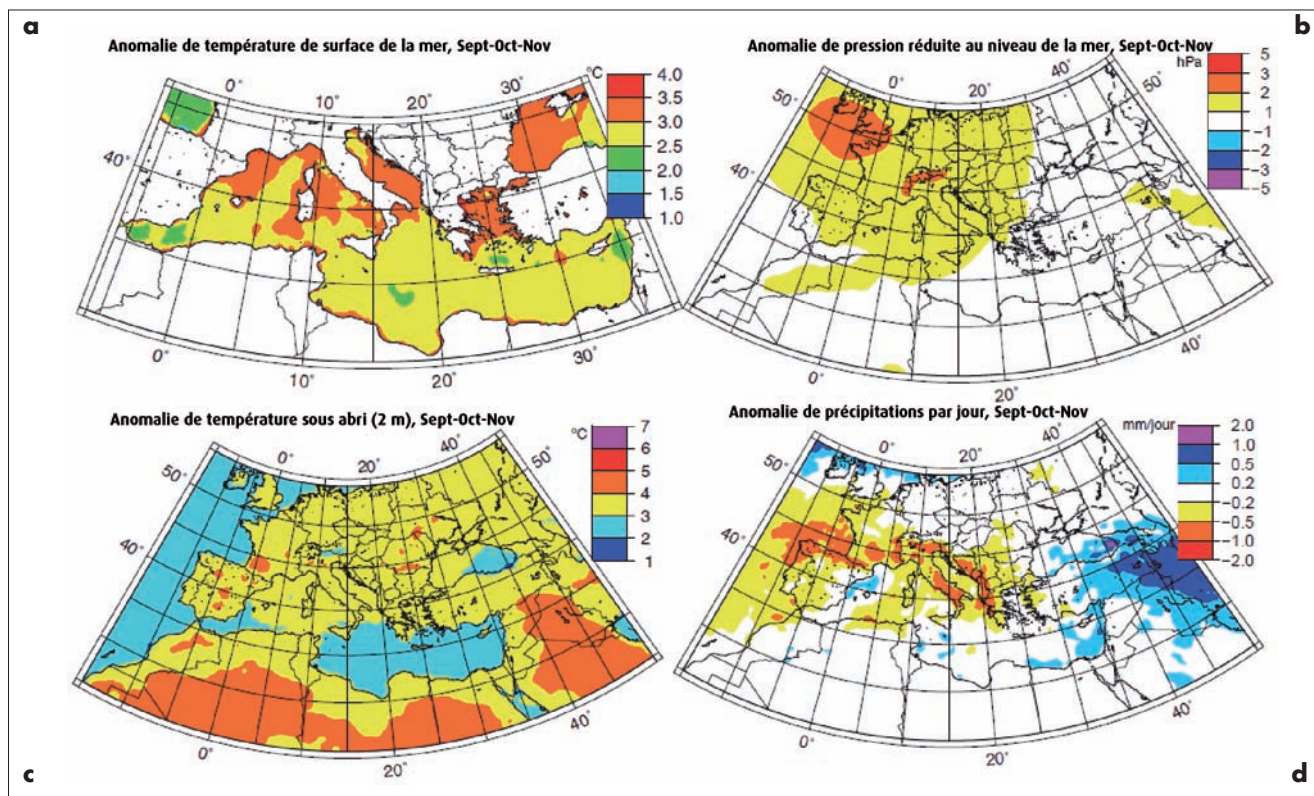


Figure 2 - (a) Anomalies de température de surface de la mer (°C) ; (b) de pression réduite au niveau de la mer (hPa) ; (c) de température de l'air à 2 m (°C) et (d) de précipitations quotidiennes cumulées (mm/j), pour l'automne (septembre, octobre, novembre) entre la fin du XXI^e siècle (2070-2099) et la fin du XX^e siècle (1961-1990) pour la simulation Cyprim au moyen du modèle couplé Samm.

extrême dans les simulations climatiques comme tout événement pluvieux dont le cumul quotidien est supérieur à la valeur du quantile 99 % ou 99^e centile (parfois abrégé en **Q99** par la suite) de la distribution quotidienne du maximum spatial de pluie sur terre sur une zone couvrant le sud-est de la France (40,7° N - 45,7° N ; 1,2° E - 7,9° E). Pour se donner un ordre de grandeur, notons que le 99^e centile défini ci-dessus pour l'automne se produit en moyenne une fois par saison (en moyenne 1 jour sur 100). Il doit également correspondre approximativement au maximum annuel des pluies quotidiennes puisque celui-ci se situe la plupart du temps en automne.

Nous avons tout d'abord examiné comment la simulation climatique du temps présent se comportait en termes de simulation des événements de pluie extrême tels que définis ci-dessus. Pour cela, l'analyse Safran (décrite dans l'encadré ci-contre) fournit une référence observée pour le climat présent. Les champs de précipitations issus de l'analyse Safran et de la simulation Cyprim sont comparés à la même échelle spatiale, en moyennant les précipitations de Safran sur des pavés de 50 km. La valeur moyenne des précipitations pour les mois d'automne est calculée, la valeur maximale sur le domaine d'étude est extraite à la fois pour les

simulations climatiques et l'analyse Safran. On en déduit la valeur du quantile 99 % pour chacune des distributions de maximum spatial de précipitations sur la zone d'étude. Les résultats sont synthétisés dans le tableau 1 pour la simulation Cyprim et également pour la simulation avec Arpège-Climat non couplé. Cette dernière permet d'analyser l'impact du couplage océan-atmosphère sur la simulation des pluies extrêmes.

Le tableau 1 permet de tirer plusieurs conclusions :

- Par rapport à l'analyse Safran, la simulation climatique Cyprim simule correctement la valeur moyenne des précipitations sur la zone d'étude, mais

sous-estime fortement les extrêmes (Q99 et au-delà). On en conclut donc que le modèle climatique régional n'est pas capable de représenter la population des événements précipitants intenses en Méditerranée. Cela justifie pleinement l'application de la méthode de descente d'échelle statistico-dynamique appliquée plus loin. La simulation Arpège-Climat non couplée a un comportement similaire à la simulation couplée régionale de Cyprim, même si les extrêmes sont légèrement plus forts. À noter que le fait d'utiliser des périodes de 30 ans différentes pour le modèle de climat (1961-1990) et l'analyse Safran (1970-2000) n'a pas d'impact sur les résultats, vu les défauts importants du

La chaîne SIM : Safran-Isba-Modcou

Il s'agit d'une chaîne de modèles, composée :

- d'un système d'analyse météorologique, Safran, (Quintana-Seguí et al., 2008) qui utilise principalement les données d'observation en surface pour en déduire les variables et flux météorologiques à la surface ;
- d'un modèle décrivant les échanges d'eau et d'énergie à la surface, Isba, (Noilhan et Planton, 1989) ;
- d'un modèle hydrogéologique, Modcou, (Ledoux et al., 1989).

La résolution du modèle de surface est de 8 x 8 km, la résolution du modèle hydrologique est variable en fonction du relief et des limites entre bassins versants, entre 1 x 1 et 8 x 8 km. L'ensemble de la chaîne SIM a été validée par comparaison avec des observations météorologiques, de hauteur de neige, hauteur piezométriques et débits sur l'ensemble de la France par Habets et al. (2008).

Tableau 1 - Valeur moyenne, valeur du quantile 99, moyenne des valeurs au-dessus du quantile 99 et valeur maximale de la distribution quotidienne du maximum spatial des précipitations cumulées, en mm/j, dans la zone d'étude [40,7° N - 45,7° N ; 1,2° E - 7,9° E] en automne (septembre à décembre) pour les analyses Safran, la simulation Samm/Cyprim couplée et pour la simulation Arpège-Climat non couplée. Les pourcentages indiquent des variations entre des lignes du tableau indiquées dans la colonne des moyennes.

Données	Moyenne (mm/j)	Quantile 99 (mm/j)	Moyenne du quantile 99	Maximum (mm/j)
Safran 1970-2000	13,7	100,0	129,00	225,2
Cyprim 1961-1990	12,6 (-8 % par rapport à la ligne 1)	56,1 (-44 %)	66,7 (-48 %)	105,6 (-53 %)
Cyprim 2070-2099	10,9 (-13 % par rapport à la ligne 2)	58,8 (+5 %)	74,9 (+12 %)	112,2 (+6 %)
Arpège-Climat 1961-1990	12,2 (-3 % par rapport à la ligne 2)	58,9 (+5 %)	70,2 (+5 %)	95,8 (-9 %)
Arpège-Climat 2070-2099	10,8 (-11 % par rapport à la ligne 4)	63,6 (+8 %)	81,7 (+16 %)	124,6 (+30 %)

modèle de climat dans sa reproduction des extrêmes de pluie dans le sud-est de la France.

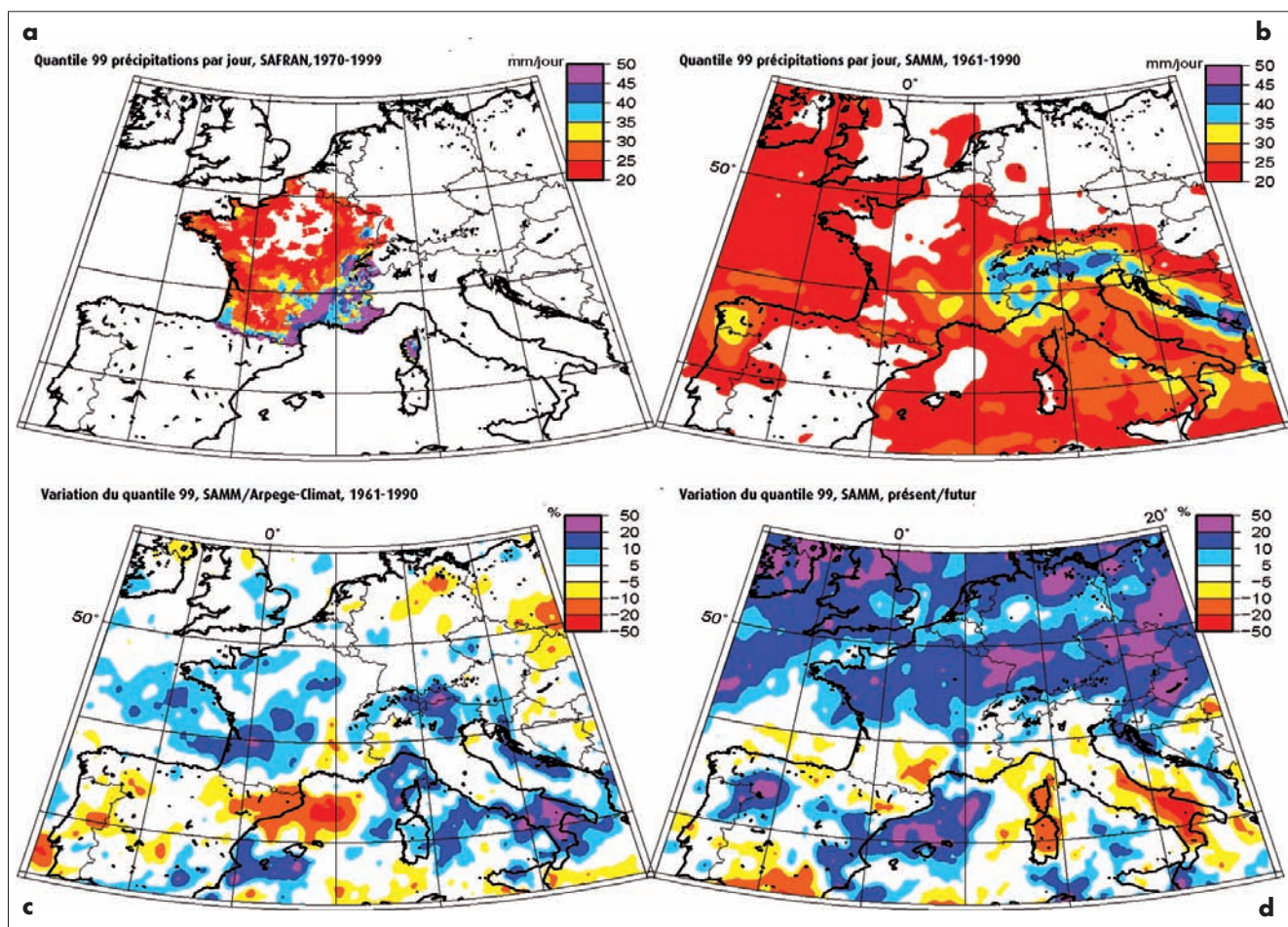
- Les précipitations sur la zone diminuent en moyenne à la fin du XXI^e siècle. Le couplage océan-atmosphère a un impact non significatif sur ce résultat.
- Les précipitations extrêmes (Q99 et au-delà) augmentent légèrement à la fin du XXI^e siècle. Cette augmentation est sensiblement plus marquée pour les précipitations les plus extrêmes. Cela confirme les résultats obtenus dans le projet Prudence (Boberg et al., 2008). Cette augmentation est sensiblement plus faible dans la simulation avec la Méditerranée interactive (simulation Cyprim). Le couplage interactif de la mer Méditerranée semble donc avoir

une rétroaction négative sur l'augmentation des extrêmes de pluie simulée par les modèles régionaux classiques.

Bien qu'ayant le mérite de fournir une information synthétique, le tableau 1 ne rend pas compte de la structure spatiale des différences entre simulations couplée/non couplée et entre climat futur/climat présent. La figure 3 permet d'appréhender la distribution spatiale du quantile 99 %. La comparaison du quantile 99 %

pour l'analyse Safran (figure 3a) et pour la simulation Cyprim en climat présent (figure 3b) montre que la structure spatiale du quantile 99 est particulièrement bien représentée par le modèle couplé en climat présent. De manière quantitative, le modèle montre un bon comportement dans les zones de faible valeur du quantile, mais sous-estime fortement les valeurs fortes sur les reliefs, et dans la zone des Cévennes, confirmant les résultats du tableau 1. La figure 3c montre la

Figure 3 - (a) Moyennes sur 30 ans du quantile 99 % des précipitations cumulées quotidiennes (mm/j) pour la référence Safran ; (b) la simulation Cyprim pour 1961-1990 ; (c) la variation de valeur des quantiles 99 (en %) entre la simulation Cyprim et la simulation Arpège-Climat non-couplée pour la période 1961-1990 et (d) de la variation de quantile 99 (en %) dans la simulation Cyprim entre les périodes 2070-2099 et 1961-1990 pour les saisons automnales.



différence entre la simulation couplée Cyprim et la simulation Arpège-Climat non couplée en climat présent. La structure spatiale mise en évidence par cette figure s'explique en partie par celle de la différence de température de la mer entre simulation couplée régionale (Cyprim) et simulation non couplée (figure 4). Dans la simulation couplée, la zone plus froide au large du golfe du Lion est la signature de la zone de convection océanique profonde représentée dans Opamed8, mais pas dans le forçage basse résolution des simulations climatiques classiques.

Enfin, la figure 3d montre l'impact du changement climatique dans la simulation Cyprim et, en particulier, la variabilité spatiale de l'impact du changement climatique sur les pluies intenses qui était masquée dans les résultats du tableau 1. Dans notre région d'intérêt, on voit aussi bien des zones d'augmentation des extrêmes (vallée du Rhône, Pyrénées-Orientales) que de diminution (Cévennes, Alpes). Cependant, l'utilisation d'un test statistique (méthode dite du bootstrap, test non paramétrique) sur les différences de quantile 99 (figures non montrées) indique que ce n'est significatif que pour de petites zones très localisées. Cependant, la différence notable entre la figure 3d et la figure 2d fait voir que les extrêmes ne réagissent pas comme la moyenne dans la région méditerranéenne. Ces résultats pointent aussi la nécessité de réaliser des ensembles de simulations pour augmenter la robustesse des conclusions sur l'évolution des précipitations intenses en Méditerranée ou tout au moins quantifier leurs incertitudes. C'est le propos du projet Medup en cours (<http://www.cnrm.meteo.fr/medup/>).

En résumé, l'analyse des résultats de la simulation climatique Cyprim sur la région sud-est de la France à la fin du XXI^e siècle révèle des changements différents lorsque l'on s'intéresse aux extrêmes de précipitations plutôt qu'à la moyenne. Concernant les extrêmes, ces changements ne sont pas forcément significatifs et montrent une structure spatiale complexe avec une diminution sur les Cévennes et les Alpes et une augmentation sur les Pyrénées-Orientales et la vallée du Rhône. Leur saisonnalité ne varie pas. Les changements concernant la durée des événements intenses n'ont pas été évalués. Il faut également signaler que

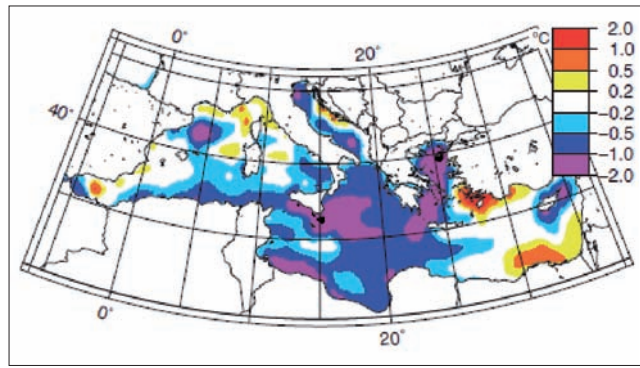


Figure 4 - Différence de température de surface de la mer (en °C) entre la simulation couplée Samm/Cyprim et la simulation Arpège-Climat non couplée pour l'automne (septembre à novembre) et la période 1961-1990.

les extrêmes de pluie dans cette région de la France sont fortement sous-évalués par le modèle. Cette sous-estimation générale des modèles de climat, même régionaux, justifie la démarche du projet Cyprim de recourir à des méthodes de descente d'échelle spatiales statistiques (chapitre suivant) ou statistico-dynamiques (deux avant-derniers chapitres p. 25 à 28) pour apporter des éléments de réponse à la question de l'évolution des événements de pluie intense dans le climat futur.

Impact hydrologique du changement climatique

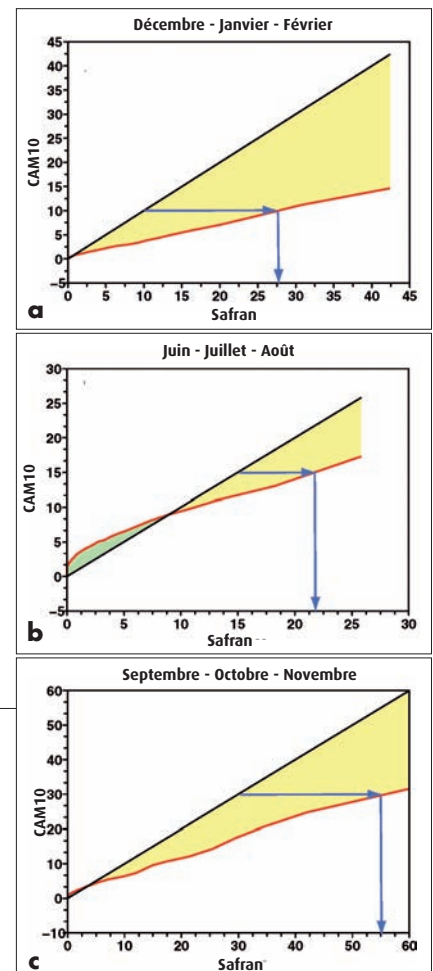
L'impact du changement climatique sur l'hydrologie régionale a été évalué grâce à la chaîne Safran-Isba-Modcou, SIM, (Habets et al., 2008). L'utilisation de cette chaîne dans le cadre du projet Cyprim offre la possibilité de simuler en continu les bilans d'eau ainsi que les débits associés. Même si le projet a utilisé des simulations climatiques à haute résolution (50 km), une étape supplémentaire de descente d'échelle est, comme on l'a vu, nécessaire pour passer de l'échelle du modèle de circulation générale à celui du modèle d'impact (SIM dans ce cas). Deux méthodes de régionalisation ont ainsi été utilisées :

- Une méthode statistique fondée sur les différents types de temps observés sur la France, développée par Boé et al (2006).

Figure 5 - Exemple de correction quantile-quantile pour une maille Safran dans les Cévennes (près d'Alès) pour trois saisons : (a) hiver, (b) été, (c) automne. En abscisse : précipitation Safran (en mm/j) ; en ordonnée : précipitations du modèle de climat (en mm/j). La courbe noire correspond au cas idéal de correspondance parfaite entre les distributions de précipitation et la courbe rouge à la correspondance constatée sur la simulation avec une sous-estimation des précipitations modérées à fortes.

Cette méthode repose sur des types de temps discriminants du point de vue des précipitations, 9 pour l'automne et l'hiver, 10 pour le printemps et l'été. Pour prendre en compte la variabilité au sein de chaque type de temps, des indices de précipitations et de températures sont calculés. Pour les précipitations, il s'agit des valeurs moyennes journalières obtenues par régression à partir des champs météorologiques de grande échelle sur une grille de 300 km sur la France. Pour les

températures, il s'agit d'une valeur moyenne sur une zone de la taille de la France, obtenue également par régression. Les données météorologiques à échelle fine (qui seront utilisées par le modèle hydrologique) seront celles d'une journée de la base d'analyse Safran qui présente le même type de temps avec des indices aussi proches que possible de ceux de la journée simulée. Si l'indice de température de la journée obtenu est très inférieur à celui obtenu par régression à partir du modèle de circulation générale, une correction uniforme est appliquée (cas des journées les plus chaudes de la fin du XXI^e siècle).



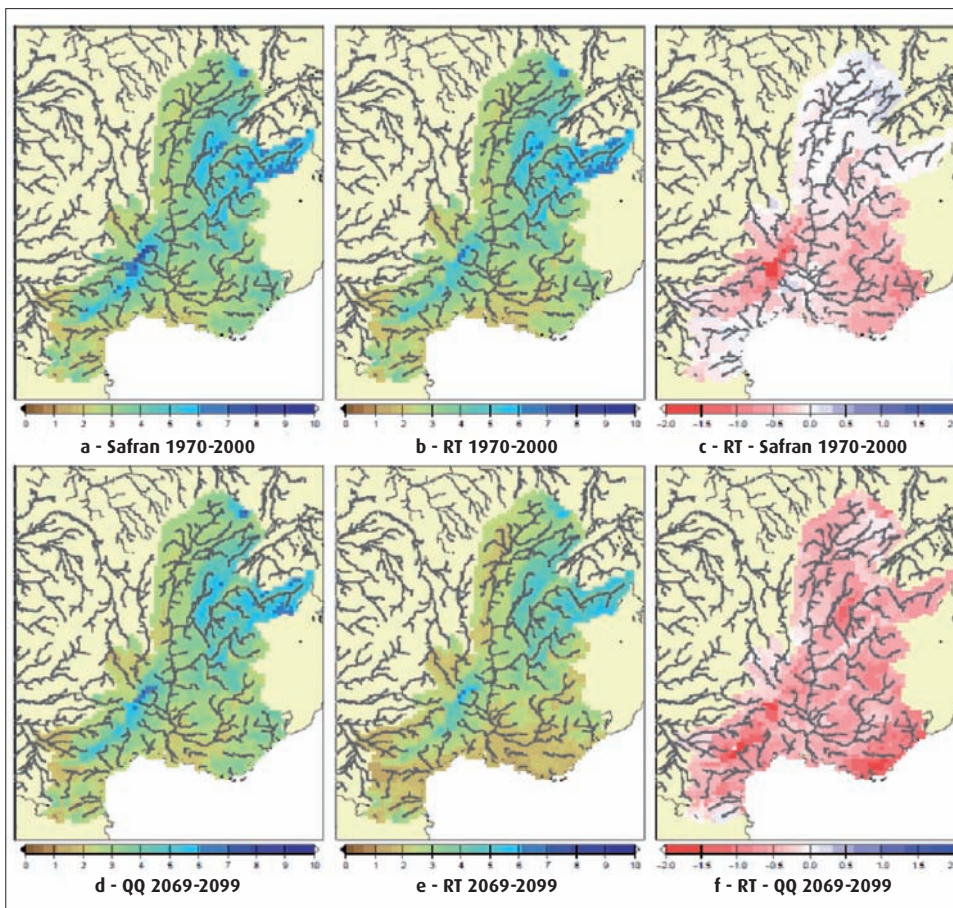
• Une méthode de correction de biais quantile-quantile pour laquelle la distribution des variables simulées par le modèle dans le climat futur tient compte des erreurs sur les distributions statistiques de la période de référence 1970-2000 (période à laquelle les analyses Safran sont disponibles). Cette méthode a déjà été utilisée dans le projet Imfrex (<http://medias.cnrs.fr/imfrex/web/projet/index.fr.php>) et est résumée dans Déqué (2007). La figure 5 illustre cette méthode de correction pour un point dans les Cévennes près d'Alès pour plusieurs saisons.

L'utilisation de deux méthodes de descente d'échelle permet d'appréhender l'incertitude associée à ces méthodes.

La figure 6 montre les précipitations moyennes régionalisées pour les périodes 1970-2000 et 2069-2099 sur la période propice aux événements précipitants intenses : les mois de septembre à décembre. Il a été choisi de ne représenter que le bassin versant méditerranéen, élargi à quelques têtes de bassins versants atlantiques, afin de couvrir

correctement les massifs montagneux des Cévennes, de la Montagne Noire (Massif central) et des Pyrénées-Orientales. Intéressons-nous d'abord à l'application des méthodes à la période correspondant au climat présent. Hormis les zones des Alpes du Nord et du Jura, les plus fortes précipitations sont localisées sur la zone de relief allant des Cévennes à la Montagne Noire. La méthode de correction de biais quantile-quantile est très proche de la climatologie Safran, par construction, les corrections de biais étant faites par saisons météorologiques. La méthode par régime de temps (figure 6b) fournit des précipitations moins élevées sur cette zone ainsi que sur les Alpes du Sud. Cette différence entre méthodes (figure 6c) peut s'expliquer, d'une part, par des performances générales moins bonnes sur la région pour la méthode par régime de temps (le lien entre circulation générale à grande échelle et temps à l'échelle locale étant moins fort que pour d'autres zones de France) et, d'autre part, par les biais du modèle Arpège dans sa représentation de la circulation générale.

Figure 6 - Précipitations quotidiennes moyennes de septembre à décembre pour le climat présent (1970-2000) et la période 2069-2099 (en mm/j). En haut : climat présent. De gauche à droite : analyse Safran, désagrégation par l'intermédiaire des variations de fréquence de régimes de temps, différence entre ces estimations. En bas : période 2069-2099. De gauche à droite : désagrégation des données de la simulation Sams/Cyprim par correction quantile-quantile, désagrégation par régime de temps, différence entre ces estimations. Pour le climat présent, la méthode de désagrégation quantile-quantile donne, par construction, des résultats identiques aux données Safran.



Pour la période correspondant au climat futur, on constate une baisse générale des précipitations. Néanmoins, des variations régionales apparaissent. Ainsi, la méthode par régime de temps (figure 6e) montre des baisses plus fortes que celle des quantiles (figure 6d) sur la Montagne Noire et sur la zone couvrant le Var et les Alpes-Maritimes.

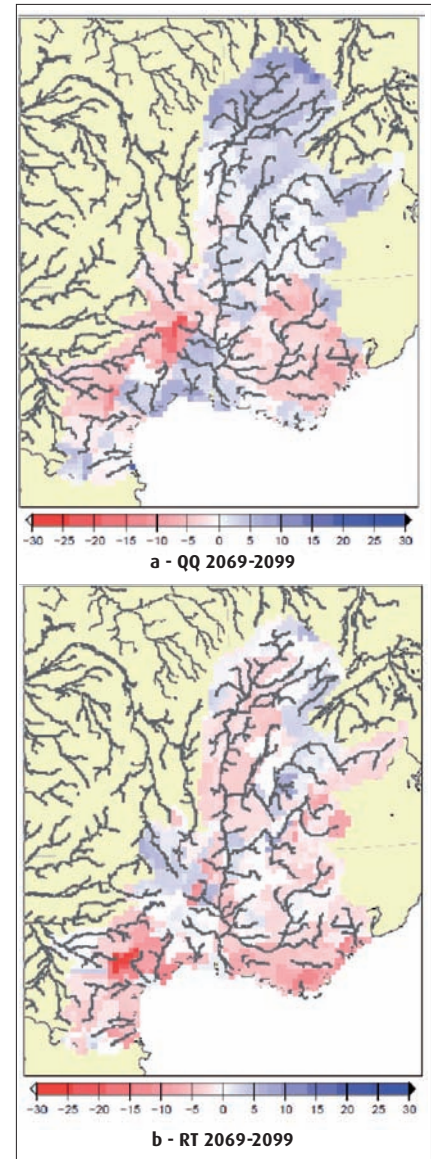


Figure 7 - Pourcentage de variation du quantile 99 % des précipitations entre le climat présent (1970-2000) et le climat futur 2069-2099. En haut : désagrégation par correction quantile-quantile. En bas : désagrégation par les variations de fréquence de régimes de temps.

Pour le quantile 99 des précipitations (figure 7), les variations pour les deux méthodes de descente d'échelle ne sont pas cohérentes. Parmi les différences les plus marquantes, on peut noter que la méthode par régime de temps indique une diminution sur la Montagne Noire principalement (ainsi que sur le Var et les Alpes-Maritimes), alors que la méthode de correction de biais

quantile-quantile montre une diminution sur l'Ardèche et une augmentation surtout près de la côte à l'ouest du Rhône. Par construction, la figure 7a (méthode quantile-quantile) montre une structure spatiale des changements en accord avec la figure 3d calculée à partir des pluies du modèle régional.

L'impact sur les débits reflète les changements sur les précipitations en les accentuant en raison de la prise en compte de l'évapotranspiration. Il apparaît clairement que l'impact du scénario climatique A2 de la simulation Cyprim se traduit par une baisse assez générale des débits moyens des rivières méditerranéennes sur la période étudiée (figure 8) pouvant être très forte : plus de 50 % de diminution pour certaines rivières (comme par exemple pour l'Aude)

Figure 8 - Variation (en %) du débit moyen sur la période septembre à décembre. En haut : désagrégation par correction quantile-quantile. En bas : désagrégation par régimes de temps.

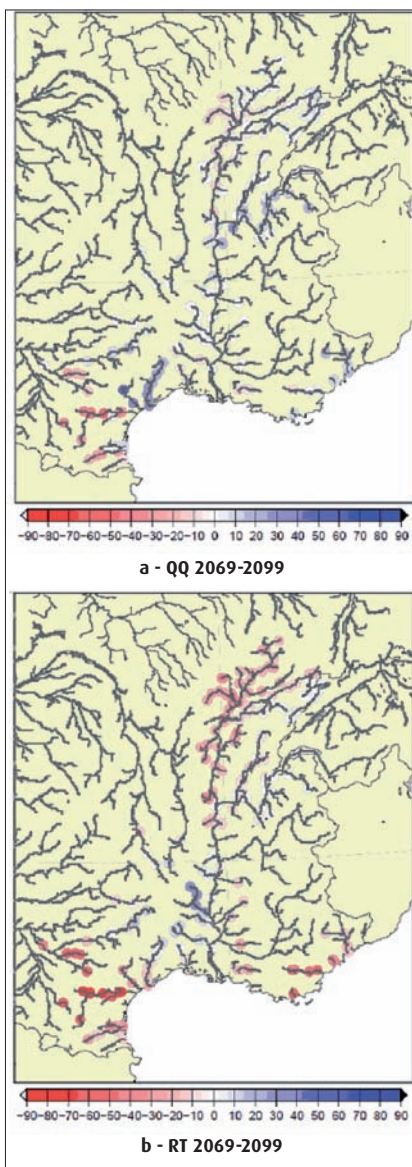
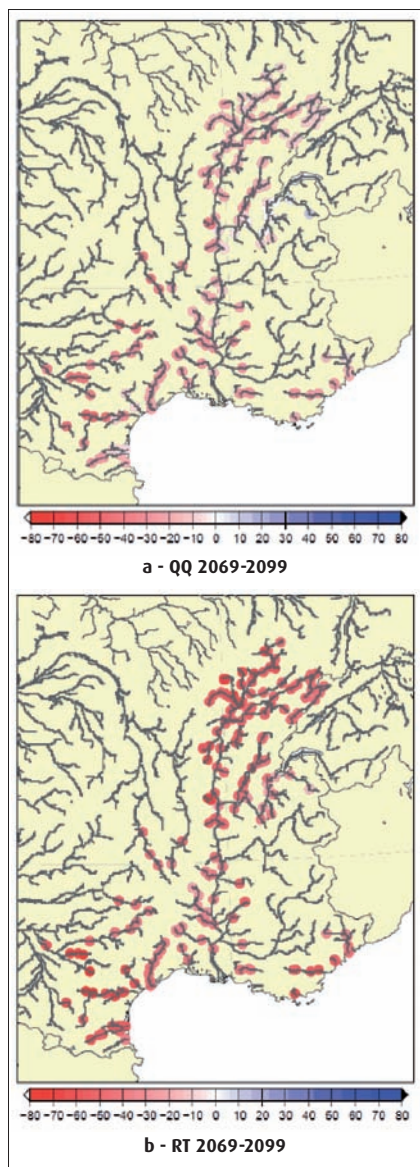


Figure 9 - Variation (en %) du quantile 99 % du débit sur la période septembre à décembre. En haut : désagrégation par correction quantile-quantile. En bas : désagrégation par régimes de temps.

dans la méthode par régime de temps. Les débits les plus forts (quantile 99 %) ne présentent pas la même distribution spatiale. Ainsi, les deux méthodes donnent des augmentations de débit pour certaines rivières (figure 9), malgré la baisse des débits moyens. À ce niveau, les incertitudes sont très grandes, à la fois sur la valeur de l'augmentation et sur la localisation précise des zones concernées. En tout cas, c'est un résultat tout à fait important qui montre que l'augmentation attendue de la variabilité du climat en région méditerranéenne peut se traduire par des crues éclair plus fortes qu'aujourd'hui.

Du point de vue méthodologique, il faut noter que l'incertitude associée à la régionalisation des résultats de scénarios climatiques est très importante. Le signal apparaît peu clair sur les précipitations et débits forts (quantile 99), sur l'amplitude des changements et la localisation. Pour aller au-delà, il vaudrait mieux prendre en compte les incertitudes liées à la méthode

de régionalisation et au scénario climatique en utilisant plusieurs modèles de circulation générale et plusieurs scénarios, cela afin d'évaluer la robustesse de ces résultats.

Évolution des environnements propices aux épisodes de pluie intense

Si les précipitations simulées par la simulation climatique Cyprim ne sont pas de qualité suffisante pour permettre une évaluation directe de l'évolution des précipitations intenses, une plus grande confiance est accordée à la représentation des champs d'échelle synoptique en altitude. On peut alors aborder la question de l'évolution de la fréquence des événements de précipitations intenses sous l'angle de l'évolution des régimes de temps et des environnements à grande échelle qui sont propices à ces événements de pluie intense.

Environnement suffisant pour un épisode de pluie intense

Cette partie découle de l'étude des environnements synoptiques des épisodes de pluies intenses présentée dans un précédent article (Boudevillain et al. 2009, référencé dans la suite par Cyprim I). On se reportera à la partie « Environnements synoptiques » de cet article⁽¹⁾ pour plus de détails sur les résultats que l'on se contente ici de résumer. En utilisant la réanalyse ERA40, d'une part, et les séries pluviométriques du réseau climatologique d'État, d'autre part, un lien statistique entre l'occurrence d'épisodes de pluies intenses quelque part dans le sud de la France et certaines configurations préférentielles du flux de grande échelle a été mis en évidence. Ce lien a été établi sur la période 1960-2001. Une méthode objective de classification automatique du champ de géopotential à 500 hPa a trié les champs associés aux jours de

(1) La Météorologie, 8^e série, 66, p. 19 à 22.

fortes pluies en quatre classes. Parmi celles-ci, trois classes comptent des jours d'épisodes intenses, mais deux seulement en regroupent 70 %. On nomme ces deux classes Thalweg de Gascogne [TG] et Thalweg Dorsale [TD] (voir la figure 4 de Cyprim I⁽¹⁾). Un thalweg se prolongeant de l'Irlande au détroit de Gibraltar domine le géopotential à 500 hPa de la classe TG. Un tel thalweg, davantage centré sur le golfe de Gascogne, animé par un flux moins rapide, existe dans la classe TD. Mais, dans cette dernière, une dorsale très marquée s'étend de la Sicile à la mer Baltique.

Avec pour objectif de développer un outil pour identifier le risque de ces épisodes de pluies exceptionnelles à partir de modélisations d'échelle synoptique supérieure à celle des phénomènes observés, comme la réanalyse ERA40 et la simulation Cyprim, la question est posée de savoir si ces deux caractérisations de la haute troposphère sont à elles seules suffisantes pour anticiper l'occurrence d'épisodes de pluies exceptionnelles.

Partant cette fois du géopotential dans ERA40 (et non plus des jours de pluie), on sélectionne maintenant toutes les dates qui présentent une faible distance avec les centres des classes d'environnements identifiés TG et TD, et l'on

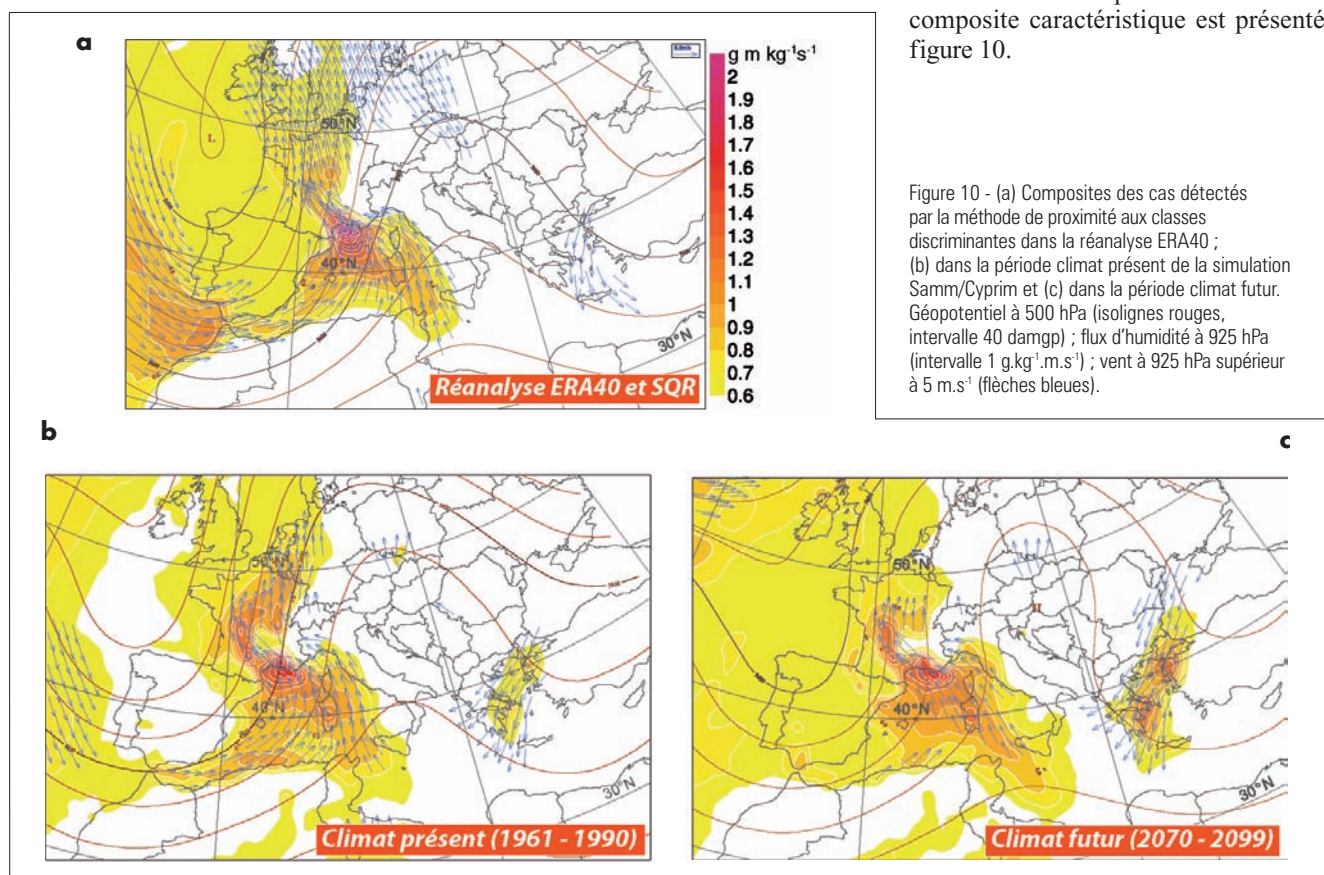
examine alors les précipitations observées à ces dates. La proximité est évaluée par le calcul de la distance de corrélation avec les composites des classes TG et TD. Avec un seuil de proximité fixé à 60 %, on a environ 20 % de jours de fortes pluies dans les dates ainsi sélectionnées à partir du géopotential à 500 hPa. S'il est supérieur à la fréquence observée de cas de fortes pluies (près de 5 %), on est bien loin des 70 %, et ce taux ne suffit pas à qualifier ces configurations synoptiques de suffisantes. On décide alors de compléter cette sélection sur le géopotential à 500 hPa en prenant en compte d'autres champs représentatifs de la circulation en basses couches observée dans les épisodes intenses. Dans Cyprim I, on a montré, entre autres, que ces situations de pluie intense présentaient un flux d'humidité en basses couches caractéristique. Sur la base des composites de flux d'humidité liés aux cas intenses observés, on en vient à définir un critère relatif à l'amplitude minimale du flux d'humidité (pris ici à 925 hPa) et à sa direction qui, dans la zone géographique englobant le golfe du Lion, doit être de sud-ouest à sud-est. Avec cette nouvelle combinaison de champs et critères (géopotential à 500 hPa et composantes du flux d'humidité à 925 hPa), quarante-six situations météorologiques favorables aux épisodes pluvieux sont détectées a priori dans la réanalyse ERA40 par mesure de

proximité aux composites de référence. Cette fois, 80 % d'entre elles correspondent en effet à des événements intenses. On a bien, à ce stade, une condition suffisante et un outil pouvant servir à identifier le risque d'épisodes de pluies intenses avec l'analyse ERA40 seule.

Évolution des épisodes de pluie intense en climat futur

Avant d'appliquer cette méthode à la projection climatique, il apparaît nécessaire de vérifier au préalable dans quelle mesure la simulation du climat présent reproduit la variabilité des environnements synoptiques obtenus dans ERA40. Cela permet de valider d'emblée la méthode de sélection d'environnements propices ou d'en déduire une correction à appliquer aux simulations, dans le même esprit qu'avec la méthode quantile-quantile ci-dessus. L'application de la méthode de sélection sur la partie climat présent (1961-1990) montre qu'après introduction d'un débiaisage adapté des champs (correspondant au retrait de l'erreur moyenne par saison par rapport à ERA40), Arpège-Climat reproduit, en moyenne et par rapport à ERA40, un nombre similaire d'environnements synoptiques propices aux événements de pluie intense dont le composite caractéristique est présenté figure 10.

(1) La Météorologie, 8^e série, 66, p. 20.



La méthode de sélection a ensuite été appliquée à la période correspondant au climat futur, 2070-2099. Le débiaisage mis au point sur le climat présent est aussi appliqué à la période de climat futur. La fréquence des environnements propices détectés augmente de +16 % (quarante-deux cas en climat présent à comparer aux quarante-neuf cas en climat futur), ce qui est une hausse statistiquement significative dans l'intervalle de confiance 5-95 %, selon le test de comparaison des fréquences.

Concernant la structure spatiale des environnements, le composite des cas obtenus en climat futur montre que, entre les deux branches d'alimentation de basses couches, la branche sud-est semble devenir prépondérante (figure 10). Les événements détectés en climat futur présentent ainsi un flux de basses couches de sud-est plus marqué, mais aussi plus rapide qu'en climat présent. Cela s'explique par le fait qu'en climat futur, parmi l'ensemble d'environnements propices détectés, nous avons un plus grand nombre de configurations du champ de géopotentiel à 500 hPa de type TD (figure 11), dont le composite de basses couches est caractérisé par un flux de sud-est marqué.

On peut tirer plusieurs enseignements de l'application de la méthode de sélection à la simulation climatique Cyprim. Tout d'abord, cela montre la faisabilité et la robustesse d'une méthode de sélection des environnements propices aux événements intenses. Concernant les épisodes pluvieux méditerranéens en climat futur, cette méthode a permis d'obtenir un jeu d'une cinquantaine d'événements sur 30 ans : cela est un nombre important au vu du caractère exceptionnel de ce phénomène. Des évolutions significatives ont ainsi pu être mises en évidence, comme une légère augmentation de la fréquence de ces environnements très favorables aux épisodes intenses ou encore la transition vers une configuration plus marquée du type de celle de la classe TD : un flux de basses couches orienté depuis la Méditerranée orientale domine dans ces cas futurs. Cet aspect a peut-être un lien avec l'augmentation constatée de la température sur cette zone du domaine (voir plus haut). Il resterait à pouvoir aussi évaluer l'évolution des épisodes de pluies indépendants de ces familles de contextes très favorables aux cas extrêmes pour pouvoir généraliser les évolutions obtenues. À l'intérieur de cette famille, toutefois, la démarche a été prolongée

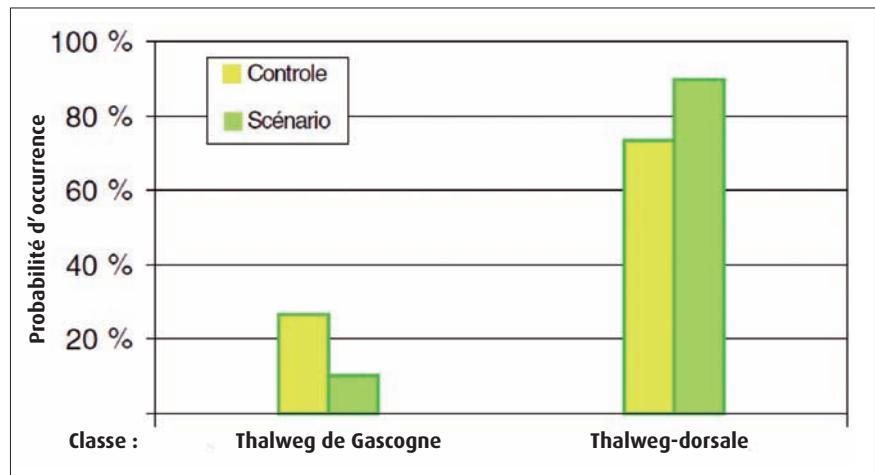


Figure 11 - Probabilité pour un cas détecté de faire partie de la classe TG (jaune) ou TD (vert) en climat présent (colonne de gauche) et en climat futur (colonne de droite). La structure de ces classes apparaît dans la figure 4 du premier article de la série (Boudevillain et al., 2009).

par les simulations d'échelle très fine pour évaluer cette fois l'évolution en termes, non plus de fréquence mais d'intensité.

Régionalisation climatique de l'aléa pluie intense avec le modèle MésO-NH

La méthode précédente fondée sur le géopotentiel à 500 hPa et le flux d'humidité en basses couches a permis d'identifier une centaine de situations propices à la formation de fortes précipitations dans les sorties du modèle de climat couplé. Le coût en temps de calcul des simulations numériques à haute résolution ne permet pas de simuler l'ensemble de ces situations, une réduction de la taille de l'échantillon s'impose. Parmi la centaine de situations, les plus proches des centres de chaque classes en termes de distance de corrélation spatiale, soit une vingtaine d'entre elles, ont été sélectionnées. Ces situations ont été ensuite simulées avec le modèle MésO-NH (Lafore et al., 1998) aux résolutions de 10 km et 2,5 km dans une configuration de deux domaines emboîtés. Une résolution de quelques kilomètres est notamment nécessaire pour décrire avec suffisamment de réalisme les processus convectifs et microphysiques impliqués dans les systèmes méditerranéens fortement précipitants. La configuration du modèle est la même que celle utilisée avec succès pour simuler des cas d'étude de pluie intense en Méditerranée (Ducrocq et al., 2002, 2008 ; Chancibault et al., 2006 ; Nuissier et al., 2008). Seules les conditions initiales et aux limites diffèrent : ici, elles

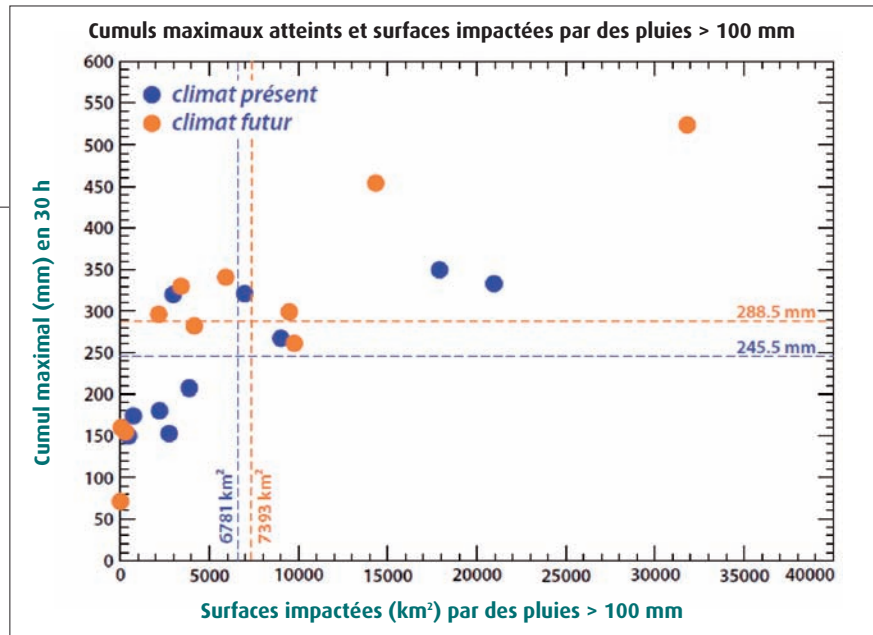
proviennent des simulations climatiques du modèle Sams disponibles à la fréquence de 6 heures. Les simulations MésO-NH démarrent à 00TU le jour sélectionné et se prolongent jusqu'à 06TU le lendemain.

Pour l'ensemble de la vingtaine de situations sélectionnées, équitablement réparties entre le climat présent et le climat futur, les simulations MésO-NH produisent toutes des systèmes fortement précipitants. Les cumuls de précipitations après 30 heures de simulation dépassent tous les 100 mm sur le domaine MésO-NH à 2,5 km, sauf pour un cas dont le maximum de précipitations se trouve hors du domaine. Ces cumuls sont généralement de l'ordre de 300 mm et atteignent pour certains cas plus de 400 mm. Ces résultats confirment ainsi la pertinence de la méthode statistique pour identifier et sélectionner des environnements propices aux événements de pluie intense. La méthode dynamique de descente d'échelle forcée par le modèle de climat pour les jours sélectionnés montre pour sa part sa capacité à reproduire des systèmes précipitants caractéristiques des événements méditerranéens intenses.

À partir de la sélection des environnements propices aux événements de pluie intense dans le climat présent et le climat futur, nous avons pu apporter des éléments de réponse sur l'évolution de la fréquence de ces événements. Avec la méthode dynamique de descente d'échelle développée ici, nous pouvons aborder la question spécifique de l'évolution de l'intensité de ces événements de pluies intenses dans le climat futur. Tout d'abord, examinons les caractéristiques des pluies simulées par MésO-NH sur les deux échantillons. La figure 12 présente

Figure 12 - Cumuls maximaux de précipitations (mm) sur 30 heures simulés par Méso-NH à 2,5 km de résolution horizontale en fonction des surfaces impactées par des pluies supérieures à 100 mm pour le climat présent (points bleus) et pour le climat futur (points oranges). Les points représentent les différents cas et les lignes pointillées correspondent aux valeurs moyennes.

les maxima de cumuls de précipitations atteints sur chacune des situations du climat présent et du climat futur (axe des ordonnées) ainsi que les superficies des zones ayant reçu plus de 100 mm en 30 heures (axe des abscisses). Les maxima de cumuls atteints en climat futur sont globalement plus élevés qu'en climat présent, atteignant, pour un cas, plus de 500 mm. De plus, les surfaces impactées par les forts cumuls de pluies sont légèrement plus importantes en climat futur. Les composites de cumul de pluie réalisés sur chacun des échantillons (figure 13) montrent une plus grande variabilité spatiale des pluies intenses dans le climat futur ; elles affectent aussi davantage la région Languedoc-Roussillon. Cette évolution est à relier à l'évolution des environnements propices dans le climat futur avec un plus grand nombre dans le climat futur de configurations du géopotential à 500 hPa de type TD. Cette classe est favorable à un flux de composante sud-est marqué en basses couches qui dirige l'air humide vers les régions Languedoc-Roussillon. On retrouve cette caractéristique dans les composites des situations simulées par Méso-NH pour le paramètre flux d'humidité de basses couches. Celui-ci est plus fort (de presque 20 %) en moyenne pour le climat futur, ainsi en accord avec un flux de sud-est en basses couches plus marqué en climat futur. Il faut toutefois nuancer la portée de ces résultats compte tenu du faible nombre de cas simulés et de l'utilisation d'un seul scénario climatique dans cette étude.



Synthèse et discussion

La méthode statistico-dynamique de descente d'échelle semble donc indiquer pour la fin du XXI^e siècle une diminution des précipitations sur le Massif central et les Alpes au profit d'une augmentation sur la région du Languedoc-Roussillon dues en particulier à une plus grande variabilité de la localisation des zones impactées par les fortes précipitations. Cette évolution, bien que s'appuyant sur un nombre restreint de cas simulés avec le modèle Méso-NH à haute résolution, est en accord avec l'évolution des conditions synoptiques associées aux événements fortement précipitants qui privilégie pour le climat futur les événements associés à la classe TD affectant de préférence la région du Languedoc-Roussillon. La figure 14 (que complète la figure 13) propose une synthèse pour ce

même échantillon de cas des différentes estimations de précipitations obtenues par la simulation climatique et les méthodes statistique et dynamique de descente d'échelle. Bien que sous-estimant la valeur des précipitations, la simulation climatique situe les deux zones de maxima de précipitations sur les reliefs des Alpes et du Massif central en climat présent. Pour les cas en climat futur, elle indique une forte baisse des précipitations et ne parvient pas à discerner le maximum sur le Languedoc-Roussillon. La méthode de correction de biais quantile-quantile donne pour le composite des cas en climat présent une assez bonne représentation du maximum sur le Massif central ; elle sous-estime néanmoins le maximum sur les Alpes du Sud. En climat futur, elle prévoit une diminution des précipitations sur le Massif central et sur les Alpes et une augmentation sur le Languedoc-Roussillon. Ces résultats apparaissent donc assez cohérents avec ceux des simulations à haute résolution. La méthode de régionalisation par type de temps donne des résultats assez éloignés, marqués par une

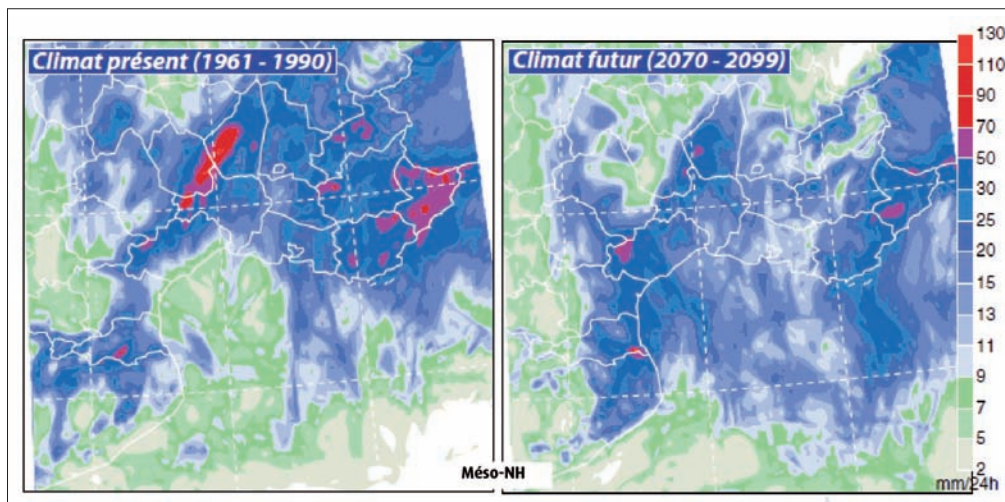


Figure 13 - Composites des cumuls de pluies (mm/24 h) simulés par Méso-NH à 2,5 km de résolution horizontale couplé à Samm/Cyprim sur les deux séries de situations sélectionnées a priori dans cette simulation Samm/Cyprim par la méthode de proximité aux classes discriminantes : dix cas dans le climat présent (a) et dix autres dans le climat futur (b).

sous-estimation générale. Cela confirme que cette méthode ne semble pas adaptée aux particularités des événements extrêmes de pluie qui se produisent dans le sud-est de la France. L'augmentation de la variabilité entre climat présent et climat futur, très visible en particulier sur les débits, est un élément commun à toutes les méthodes.

Par ailleurs, l'exploitation directe des simulations climatiques montre une légère augmentation de la fréquence des extrêmes de pluie avec des cumuls maximaux plus importants, ce qui rejoint les résultats obtenus avec la méthode de descente d'échelle statistico-dynamique qui prévoit une augmentation de l'occurrence des environnements favorables et des événements plus intenses. Les méthodes de désagrégation semblent indiquer une possible augmentation de l'intensité des crues éclair. Ces méthodes prévoient néanmoins une baisse des débits moyens sur la période automnale liée à une baisse des précipitations

moyennes. Cette baisse des précipitations est également perçue dans la simulation climatique.

En conclusion, même si de nombreuses incertitudes persistent concernant la robustesse des résultats et leur significativité statistique, on peut retenir que toutes ces méthodes semblent indiquer dans le contexte du changement climatique une légère augmentation de la fréquence des événements fortement précipitants sur le sud-est de la France avec des phénomènes plus intenses, tant au niveau des maxima de précipitations que de l'intensité des crues éclair, avec en même temps une baisse significative des précipitations moyennes sur la région pour la période automnale.

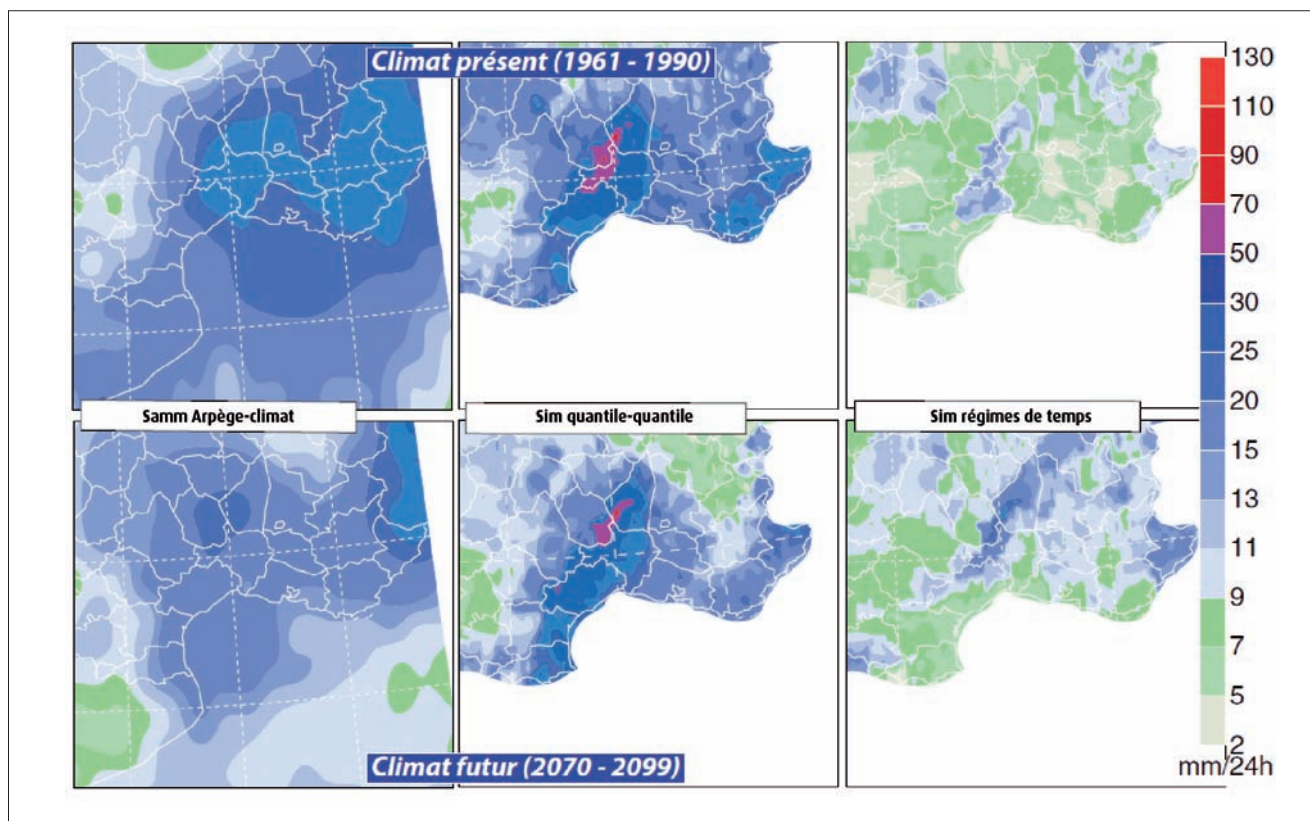
Le projet Cyprim a ainsi permis de mettre en place des outils statistico-dynamiques pour affiner notre connaissance de l'évolution des événements de forte pluie dans un contexte de changement climatique. Il démontre l'intérêt d'utiliser des méthodes de descente d'échelle permettant de mieux représenter certains processus physiques qui se révèlent indispensables pour caractériser au mieux l'évolution des phénomènes extrêmes. La démarche méthodologique du projet Cyprim demande à être généralisée en utilisant différents scénarios climatiques, en améliorant les méthodes de régionalisation, en poursuivant l'effort d'identification des situations météorologiques favorables aux événements de

forte pluie et en augmentant le nombre de simulations à haute résolution seules capables de représenter de manière réaliste les caractéristiques des événements fortement précipitants (comme, par exemple, le maximum et la localisation des fortes pluies). L'arrivée du modèle Arome permettra, grâce à sa plus grande efficacité numérique, de multiplier ce nombre. Davantage de puissance de calcul favorisera également l'étude de plusieurs scénarios au moyen de différents modèles climatiques. Ces travaux de recherche seront en particulier poursuivis dans le cadre du projet Medup soutenu par l'Agence nationale de la recherche (ANR). Au-delà, le projet Hymex vise à retourner sur le terrain avec des moyens modernes afin, entre autres objectifs, de mieux caractériser les événements de pluie intense dans la Méditerranée occidentale. Le projet envisage différentes périodes d'observation à différentes échelles de temps, de manière à compléter la compréhension de ces phénomènes et poursuivre l'évaluation du risque associé dans le contexte du changement climatique.

Remerciements

Le projet Cyprim était soutenu par le programme d'actions concertées incitatives du Fonds national de la science « Aléas et changements globaux » du ministère de l'Enseignement et de la Recherche.

Figure 14 - Composites de la distribution des précipitations (mm/24 h) pour la sélection des dix épisodes en climat présent (en haut) et en climat futur (en bas) déduits de la méthode de proximité, cumuls de pluie sortis bruts de la simulation climatique couplée Samm/Cyprim (à gauche), adaptés par la méthode de descente d'échelle de correction quantile-quantile (au centre) et adaptés par la méthode de variation de fréquence de régimes de temps (à droite). À comparer aux distributions composites tirées de l'adaptation à échelle fine par des simulations explicites des épisodes pluvieux avec Méso-NH. (Voir figure 13 page précédente).



Bibliographie

- **Boberg F., P. Berg, P. Thejll, W. J. Gutowski et J. H. Christensen**, 2008 : Improved confidence in climate change projections of precipitation evaluated using daily statistics from the PRUDENCE ensemble. *Clim. Dyn.*, DOI: 10.1007/s00382-008-0446-y.
- **Boé J., L. Terray, F. Habets et E. Martin**, 2006 : A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling. *J. Geophys. Res.*, 111, D23106, DOI: 10.1029/2005JD006889.
- **Boudevillain B., S. Argence, C. Claud, V. Ducrocq, B. Joly, A. Joly, D. Lambert, O. Nuissier, M. Plu, D. Ricard, P. Arbogast, A. Berne, J.-P. Chaboureau, B. Chapon, F. Crépin, G. Delrieu, E. Doerflinger, B. M. Funatsu, P.-E. Kirstetter, F. Masson, K. Maynard, E. Richard, E. Sanchez, L. Terray et A. Walpersdorf**, 2009 : Cyprim, partie I. Cyclogenèses et précipitations intenses en région méditerranéenne : origines et caractéristiques. *La Météorologie*, 8^e série, 66, 18-28.
- **Chancibault K., S. Anquetin, V. Ducrocq et G.-M. Saulnier**, 2006 : Hydrological evaluation of high-resolution precipitation forecast of the Gard flash-flood event (8-9 September 2002). *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 617, 1091-1117.
- **Déqué M.**, 2007 : Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: model results and statistical correction according to observed values. *Global and Planetary Change*, 57, 1-2, 16-26.
- **Ducrocq V., O. Nuissier, D. Ricard, C. Lebeaupin et S. Anquetin**, 2008 : A numerical study of three catastrophic precipitating events over Southern France. II: Mesoscale triggering and stationarity factors. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 131-145.
- **Ducrocq V., D. Ricard, J.-P. Lafore et F. Orain**, 2002 : Storm-scale numerical rainfall prediction for five precipitating events over France: On the importance of the initial humidity field. *Weather and Forecasting*, 17, 1236-1256.
- **Gibelin A. L. et M. Déqué**, 2003 : Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dyn.*, 20, 327-339.
- **Giorgi F.**, 2006 : Climate change hot-spots. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L08707, DOI: 10.1029/2006GL025734.
- **Habets F., A. Boone, J.-L. Champeaux, P. Etchevers, L. Franchistéguy, E. Leblois, E. Ledoux, P. Le Moigne, E. Martin, S. Morel, J. Noilhan, P. Quintana-Seguí, F. Rousset-Regimbeau et P. Viennot**, 2008 : The Safran-Isba-Modcou hydrometeorological model applied over France. *J. Geophys. Res.*, 113, D06113, DOI: 10.1029/2007JD008548.
- **IPCC**, 2007 : Climate change 2007. Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 p. <http://www.ipcc.ch/ipccreports/ar4-wg1.htm>.
- **Joly B., O. Nuissier, V. Ducrocq et A. Joly**, 2007 : *Mediterranean synoptic scale ingredients involved in heavy precipitations events triggering over Southern France: A clustering approach*. International Conference on Alpine Meteorology, 4-8 June 2007, Proceedings.
- **Lafore J.-P.** et co-auteurs, 1998 : The Meso-NH Atmospheric Simulation System. Part I: Adiabatic formulation and control simulations. *Ann. Geophys.*, 16, 90-109.
- **Ledoux E., G. Girard, G. De Marsily et J. Deschenes**, 1989 : Spatially distributed modeling: Conceptual approach, coupling surface water and ground-water, in Unsaturated Flow Hydrologic Modeling: Theory and Practice. *NATO ASI Series C*, vol. 275, edited by H. J. Morel-Seytoux, 435-454, Kluwer Acad., Norwell, Mass.
- **Nakicenovic N., J. Alcamo, G. Davis, B. de Vries, J. Fenhann, S. Gaffin, K. Gregory, A. Grübler, T. Y. Jung, T. Kram, E. L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Pepper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H.-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. Van Rooijen, N. Victor et Z. Dadi**, 2000 : IPCC Special Report on Emissions Scenarios. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 599 p.
- **Noilhan J. et S. Planton**, 1989 : A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 536-549.
- **Nuissier O., V. Ducrocq, D. Ricard, C. Lebeaupin et S. Anquetin**, 2008 : A numerical study of three catastrophic precipitating events over Southern France. I: Numerical framework and synoptic ingredients. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 134, 111-130.
- **Quintana-Seguí P., P. Le Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, L. Franchistéguy, S. Morel et J. Noilhan**, 2008 : Analysis of near surface atmospheric variables: validation of the Safran analysis over France. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 47, 92-107.
- **Somot S.**, 2005 : *Modélisation climatique du bassin méditerranéen : variabilité et scénarios de changement climatique*. Thèse de l'université Paul-Sabatier, Toulouse, France, 333 p.
- **Somot S., F. Sevault, M. Déqué et M. Crépon**, 2008 : 21st century climate change scenario for the Mediterranean using a coupled Atmosphere-Ocean Regional Climate Model. *Global and Planetary Change*, 63 (2-3), 112-126, DOI: 10.1016/j.gloplacha.2007.10.003.