

IMFREX

Impact des changements anthropiques sur la
fréquence des phénomènes extrêmes de vent
de température et de précipitations

Rapport final

Table des matières

1 Introduction.....	1
2 Résumé étendu.....	3
2.1 Partenaires.....	3
2.2 Volet 1: constitution de la base de données (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7).....	3
2.3 Volet 2: validation des modèles (P1, P7).....	3
2.4 Volet 3: approche directe des sorties de modèle (P1,P7).....	3
2.5 Volet 4: approche statistique (P3,P4,P5).....	4
2.6 Volet 5: approche dynamique (P1,P2).....	4
2.7 Extended abstract.....	5
3 Méthodes et modèles.....	7
3.1 Le site web.....	7
3.2 Les séries observées.....	9
3.3 Les indices climatiques.....	9
3.4 Le modèle du climat du CNRM.....	9
3.5 Le modèle du climat de l'IPSL.....	10
3.6 La détection des cyclones tropicaux.....	10
3.7 Les températures centennales.....	10
3.8 La relation vent-climat.....	10
3.9 L'impact de la neige.....	11
3.10 Le modèle de coulées de débris.....	11
3.11 Les régimes de temps.....	11
3.12 La relation régime-tempêtes.....	12
4 Résultats.....	13
4.1 V1.T1: séries simulées.....	13
4.2 V1.T2: séries observées.....	13
4.3 V1.T3: cartes sur la France.....	14
4.4 V2.T1: validation du climat présent.....	14
4.5 V2.T2: tendances observées.....	16
4.6 V3.T1: scénarios pour les températures et précipitations.....	19
4.7 V3.T2: scénarios pour les cyclones.....	23
4.8 V4.T1: adaptation statistique des températures extrêmes.....	24
4.9 V4.T2: adaptation statistique de la neige et du vent.....	26
4.10 V4.T3: coulées de débris.....	28
4.11 V5.T1: analyse des régimes de temps.....	31
4.12 V5.T2: régimes et tempêtes.....	32
5 Conclusions.....	35
6 Références.....	37
7 Valorisation.....	38
8 Disponibilité des données.....	40
9 Site Internet GICC.....	40

1 Introduction

Un climat océanique tempéré comme celui de la France métropolitaine n'est pas un climat régulier et calme qui se reproduit à l'identique d'une année sur l'autre. Les archives climatologiques et les reconstitutions à partir de données historiques nous indiquent que des phénomènes violents ou durables affectent de temps en temps telle ou telle région. La rareté de ces événements est compensée par le coût très élevé de leurs conséquences. Aussi, la surveillance de la fréquence de ces phénomènes, appelés de manière générique phénomènes extrêmes, est une tâche à ne pas négliger. Les premières études du changement climatique d'origine anthropique se sont pourtant concentrées sur l'évolution du climat moyen. Ceci a été motivé à la fois pour des raisons de stabilité statistique des résultats et à des fins de détection par rapport à l'observation de l'évolution du climat au cours du 20^{ème} siècle. Mais la principale crainte liée à une évolution du climat vient de l'augmentation possible de la fréquence des événements extrêmes. Les tempêtes de 1999, la canicule de 2003 et les diverses crues récentes ont fortement sensibilisé l'opinion. Même si les observations actuelles ne permettent pas d'évaluer si les événements très rares ont augmenté en fréquence au cours du 20^{ème} siècle, l'utilisation d'un modèle atmosphérique permet, par la constitution de séries longues et statistiquement homogènes, de faire une estimation quantitative de la fréquence de certaines classes d'événements. Le changement attendu concerne la planète, et les premières simulations numériques se sont concentrées sur cet aspect. Mais l'approche régionale permet de mieux cerner les impacts possibles et de mieux identifier les changements passés (dans les régions riches en séries observées). C'est pourquoi les scientifiques au niveau mondial (GIEC, 2001) et au niveau européen (projet PRUDENCE, Christensen et al., 2002) se sont penchés sur la question des impacts régionaux avec les modèles adéquats. De telles études ont été menées en Allemagne (Cubasch et al., 1995), au Royaume-Uni (Jones et al., 1997) en France (Déqué et al., 1998) et au Danemark (Christensen et al., 2001) pour ne citer que les principaux acteurs en Europe.

Le but d'IMFREX était d'évaluer l'impact d'un changement climatique d'origine anthropique sur la fréquence des phénomènes extrêmes de vent, de température et de précipitations sur la France. Nous sommes partis d'une hypothèse sur l'évolution possible au cours du 21^{ème} siècle de la concentration atmosphérique en gaz à effet de serre (GES) et en aérosols proposée par le GIEC sous le nom de scénario A2. Une première simulation utilisant un modèle couplé océan-atmosphère à basse résolution de Météo-France (300 km) a permis de fournir un scénario d'évolution pour la température de surface de la mer (TSM) et de l'étendue de banquise (Royer et al., 2002). Une deuxième simulation de ce modèle à plus haute résolution sur l'Europe (50 km) a fourni une évolution jour par jour sur 140 ans (1960-2099) d'un climat qui se compare assez bien au climat présent sur la période 1960-1999, car cette simulation utilise les TSM observées pour cette période. Le scénario A2 proprement dit (concentration des GES, des aérosols et TSM qui en résultent) est appliqué à partir de 2000. Une version à maille 150 km sur la France du modèle de l'IPSL a été utilisée pour faire des simulations de 30 ans en utilisant les forçages moyens de 1979 à 1999, de 2030 à 2059 et de 2070 à 2099. Pour le 21^{ème} siècle, les TSM viennent d'une version couplée basse résolution du modèle de l'IPSL. Dans la suite, nous utiliserons les noms des modèles, à savoir ARPEGE et LMDZ, pour désigner les simulations conduites à Météo-France et à l'IPSL respectivement.

Dans ce projet, nous avons mis l'accent sur des phénomènes pour lesquels l'évolution possible du climat de la France au cours du 21^{ème} siècle est source de questionnement: la fréquence des tempêtes, les phénomènes de pluies abondantes, les sécheresses, les canicules et les vagues de froid. En outre l'impact sur la fréquence des cyclones tropicaux dans l'Atlantique tropical et sur les coulées de débris dans les Alpes est étudié. Malgré leur résolution horizontale élevée comparée à celle des modèles couplés qui servent à calculer l'évolution de la concentration en GES ou de la TSM, les modèles numériques régionaux ne fournissent pas toujours les variables pertinentes pour l'étude des impacts possibles. Il faut avoir recours à une couche intermédiaire entre la circulation générale atmosphérique et le temps sensible. Par exemple les modèles représentent des tempêtes réalistes en altitude, mais l'interpolation du vent au voisinage de la surface à partir des lois de l'aérodynamique de masse conduit à des sous-estimations notables en cas de vents forts.

Dans IMFREX nous avons suivi trois approches pour évaluer l'impact du changement climatique. L'approche directe consiste à utiliser les variables du modèle avec un minimum de modifications. Cette approche a été

appliquée pour les pluies abondantes, les sécheresses, les températures extrêmes, les trajectoires des perturbations ainsi que pour les cyclones tropicaux. L'approche statistique consiste à établir sur les observations une relation empirique entre les variables observées de grande échelle et le risque météorologique associé. Nous avons appliqué cette approche pour les risques concernant les valeurs de retour à 100 ans des températures, les valeurs de retour à 50 ans des vents forts, la neige collante, la charge de neige sur les bâtiments et les coulées de débris en montagne. L'approche dynamique consiste à prendre une situation météorologique dans son ensemble sur l'Atlantique Nord et l'Europe un jour donné, et à identifier les phénomènes extrêmes qui lui sont associés. Cette dernière approche a été suivie pour retrouver les résultats concernant les températures et les précipitations, puis pour explorer l'impact sur la répartition des tempêtes.

Les phénomènes extrêmes sont des phénomènes rares. Il ne faut pas être limité par des échantillons trop brefs. Nous avons produit deux simulations supplémentaires pour 1960-1999 et deux pour 2070-2099 avec ARPEGE. Ces simulations ne diffèrent du scénario de base que par les conditions initiales de l'atmosphère: elles correspondent au même climat. Pour étudier les cyclones tropicaux nous avons aussi produit deux simulations de 30 ans (1960-1989 et 2070-2099) avec une version d'ARPEGE dans laquelle la résolution de 50 km est appliquée sur les Antilles. L'incertitude sur les scénarios de TSM a été explorée en considérant deux simulations supplémentaires de LMDZ. Les TSM supplémentaires sont issues de simulations couplées avec ARPEGE et avec le modèle du GFDL. L'incertitude sur les scénarios de concentration en GES a été abordée en considérant une simulation supplémentaire d'ARPEGE (scénario GIEC B2). L'utilisation de deux modèles (ARPEGE et LMDZ) pour un scénario commun est une approche rudimentaire de l'incertitude due à la modélisation numérique. Une étude plus poussée des trois sources d'incertitudes mentionnées ci-dessus ainsi qu'au rôle de l'échantillonnage a été effectuée dans le cadre du projet européen PRUDENCE (Déqué et al., 2005).

IMFREX a été organisé en cinq volets. Dans la section 2, nous donnons un résumé étendu des résultats obtenus pour les volets du projet:

- constitution de la base de données (V1)
- validation des modèles (V2)
- approche directe des sorties de modèle (V3)
- approche statistique (V4)
- approche dynamique (V5)

Dans la section 3, nous détaillons les modèles et les méthodes utilisés dans le projet. La section 4 regroupe les résultats scientifiques détaillés pour chacune des tâches du projet. La section 5 conclut en donnant une synthèse des impacts et des perspectives au-delà du projet. En fin de rapport, on trouve les références bibliographiques du document (6), les efforts de valorisation du projet (7), des indications sur la disponibilité des données (8), et des suggestions pour le site Internet du GICC (9). La contrainte en nombre de pages de ce document ne permet pas de montrer toutes les illustrations nécessaires pour analyser nos résultats. Aussi huit documents annexes sont joints au présent rapport :

- A) Les indices climatiques observés (Moisselin et Dubuisson)
- B) Validation des modèles ARPEGE et LMDZ (Déqué et Li)
- C) Impact sur le comportement des ouragans du bassin Atlantique Nord (Chauvin et Royer)
- D) Impact sur la production et le transport d'électricité (Laurent et al.)
- E) Impact du vent et de la charge de neige sur les bâtiments (Sabre et Sacré)
- F) Impact sur les coulées de débris (Jomelli)
- G) Approche par la classification des régimes de temps (Sanchez et al.)
- H) Cyclogénèse et tempêtes (Joly et al.)

Pour une étude exhaustive des cartes d'évolution des indices climatiques pour le climat passé et le scénario,

la consultation du site <http://medias.cnrs.fr/imfrex/> est incontournable. Enfin, nous n'avons que peu repris le matériau utilisé dans le rapport de première année. Sa consultation (notamment la section 4) peut compléter certains points ou montrer des résultats non essentiels qui n'ont pas été reportés ici. Ce rapport peut être téléchargé sur le site du projet.

2 Résumé étendu

2.1 Partenaires

- P1** Météo-France
- P2** Centre Européen de Recherche et Formation Avancée en Calcul Scientifique
- P3** Laboratoire de Géographie Physique
- P4** EDF/ Recherche et Développement
- P5** Centre Scientifique et Technique du Bâtiment
- P6** Médias-France
- P7** Institut Pierre-Simon Laplace

2.2 Volet 1: constitution de la base de données (P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7)

Le produit principal d'IMFREX est un site web dédié au projet et hébergé par Médias-France. Ce site public est consultable sur <http://medias.cnrs.fr/imfrex/>. Il contient une base de données susceptible de fournir sur requête des données quotidiennes issues des simulations de Météo-France. Un serveur ftp propose les données des scénarios de l'IPSL. Pendant la durée du projet, ce serveur a également permis de délivrer aux partenaires les données quotidiennes de températures, précipitations, vent et neige observées. Des séries quotidiennes de référence (SQR) ont été développées spécifiquement pour le projet IMFREX en ce qui concerne la température et les précipitations. Ces séries ont été utilisées à la fois pour la calibration des modèles de climat et pour l'établissement des diagnostics climatiques sur le 20ème siècle.

2.3 Volet 2: validation des modèles (P1, P7)

Nous avons étudié la densité de probabilité des précipitations, températures minimales et maximales quotidiennes dans les simulations de référence des modèles ARPEGE et LMDZ. Pour chaque saison, nous avons comparé en chaque point de grille les fréquences observées interpolées sur la grille de chaque modèle. On constate que les erreurs systématiques dépendent de la plage de valeur. Le principal défaut commun aux deux modèles est de sous-estimer la fréquence des précipitations nulles. Par contre, ils sont capables de produire des précipitations intenses réalistes en hiver. Les indices proposés par le projet européen STARDEX ont été utilisés pour synthétiser les propriétés statistiques des séries par des cartes sur la France.

Les indices STARDEX ont également été calculés année par année pour les SQR pour évaluer la tendance observée au cours du 20ème siècle. L'analyse des indices permet de mettre en évidence que les indices de température vont tous dans le sens d'un réchauffement marqué sur 1951-2000. Des traces d'augmentation de variabilité sont repérées sur les températures maximales. Pour les précipitations, on trouve des évolutions plus contrastées, hormis certains aspects comme l'augmentation de la durée des périodes pluvieuses ou l'augmentation des sécheresses estivales. L'étude des températures moyennes dans les différents DOM-TOM montre un réchauffement significatif dans la plupart des régions sur la période 1976-2003.

2.4 Volet 3: approche directe des sorties de modèle (P1,P7)

En utilisant les SQR, nous avons calculé les centiles saisonniers de température (minimale et maximale diurne) et de précipitations. Ces valeurs nous ont permis de mettre en place une méthode de correction des sorties de modèle. Ces corrections ont été appliquées aux séries simulées pour la fin du 21ème siècle par ARPEGE et LMDZ. Les résultats pour ARPEGE montrent que la fréquence de températures minimales inférieures à -5°C devient négligeable dans un changement de climat, tandis que la fréquence de températures maximales supérieures à 35°C est multipliée par un facteur de 5 à 10. La comparaison avec les scénarios produits par LMDZ, moins pessimistes, se fait avec les mêmes indices que ceux utilisés dans la section précédente pour la validation (indices STARDEX). Pour prendre en compte la contribution atmosphérique complète à l'hydrologie de surface, un modèle de routage a été utilisé pour les quatre principaux fleuves français. On trouve en hiver et au printemps une augmentation des débits potentiels élevés. Pour les autres saisons, le scénario d'ARPEGE indique une diminution.

Deux expériences avec des versions d'ARPEGE à haute résolution sur les Antilles ont été analysées afin de déterminer les changements simulés en terme de nombre de trajectoires, nombre de jours et structures des ouragans de l'océan Atlantique nord. Un logiciel de suivi des dépressions de moyennes latitudes, développé par Météo-France, a été adapté pour les besoins en détection de cyclones. Le calibrage des paramètres du logiciel a été réalisée de manière à obtenir le nombre d'ouragans climatologique. Les deux expériences diffèrent dans la réponse des ouragans au scénario d'augmentation des GES: le nombre total de trajectoires augmente pour la première expérience et diminue pour la seconde. Elles s'accordent néanmoins sur un affaiblissement de l'activité cyclonique sur le golfe du Mexique. Les résultats obtenus par le comptage direct des ouragans sont confirmés par le calcul indirect, fondé sur un indice de cyclogénèse à partir des variables d'environnement. Les précipitations associées aux systèmes cycloniques augmentent dans le scénario pour les deux expériences.

2.5 Volet 4: approche statistique (P3,P4,P5)

La fréquence des coulées de débris ou *debris flows* (*df*) est susceptible d'évoluer dans un changement climatique. Une analyse des données de terrain dans le massif des Écrins a permis de construire un modèle statistique de probabilité de déclenchement des *df* à partir de données lithologiques et atmosphériques. En utilisant les sorties ARPEGE et LMDZ pour le climat présent et le scénario, on trouve une diminution de la probabilité de déclenchement des *df* non glaciaires de l'ordre de 30% et une augmentation de même amplitude pour les *df* glaciaires. Cependant localement les variations peuvent être très différentes dans leur nature et leur intensité.

Un modèle statistique de détection de tendance dans les extrêmes a été construit et appliqué aux températures estivales observées (SQR). Il met en évidence une tendance significative sur le 20ème siècle. Des températures centennales peuvent ensuite être estimées en tenant compte de cette tendance significative. Comparativement, les températures centennales ont été directement évaluées à partir d'ARPEGE et LMDZ. L'extrapolation des observations permet d'atteindre la fourchette basse des températures centennales simulées par les modèles.

La fréquence des épisodes de neige collante est relativement réaliste en climat actuel simulé par les deux modèles. En climat de fin de 21ème siècle, la tendance est à la diminution de la fréquence du phénomène par rapport à l'actuel, sans changement significatif dans la charge sur les lignes électriques lors de ces épisodes. Pour la charge de neige sur les bâtiments, les valeurs extrêmes sont évaluées à partir des observations au sol des hauteurs de neige maximales mensuelles et des sorties d'ARPEGE. La simulation montre des valeurs cinquantennales de charge fortement diminuées dans le scénario et des différenciations régionales atténuées.

Deux méthodes statistiques radicalement différentes ont été utilisées pour estimer les valeurs de retour cinquantennales du vent maximum en surface. L'une s'appuie sur une descente d'échelle du phénomène, l'autre sur une identification des perturbations. Elles s'accordent pour montrer aussi bien avec ARPEGE que LMDZ une légère augmentation dans la partie nord du pays et une diminution faible sur le pourtour méditerranéen.

2.6 Volet 5: approche dynamique (P1,P2)

La réanalyse ERA40 a été utilisée pour classer automatiquement les régimes de temps sur le domaine Europe-Atlantique à partir des champs quotidiens de géopotential à 500 hPa. Ces régimes ont été associés à des extrêmes sur la France. Pour l'hiver nous avons considéré les épisodes de jours très froids et les fortes précipitations ; pour l'été nous avons considéré les jours très chauds. On observe dans le scénario en hiver une augmentation de la fréquence relative de deux régimes (zonal et blocage), et une chute d'un troisième (anticyclone Groenlandais). En été, on observe une très forte hausse du régime blocage. Il en résulte qu'en hiver le risque des jours très froids diminue en général dans le pays. La probabilité des fortes précipitations diminue dans le sud, à exception de la région Languedoc-Roussillon. En été, l'augmentation de la fréquence des régimes blocage et zonal entraîne une hausse de la probabilité de températures très élevées.

Cette classification est également utilisée pour les tempêtes. L'algorithme de Météo-France de suivi automatique de systèmes dépressionnaire a été adapté à ERA40. La distribution des événements tempétueux et de leurs caractéristiques comme l'intensité ou la vitesse est calculée en fonction des régimes de temps. A

partir de l'évolution des fréquence des régimes dans le scénario d'ARPEGE, il ressort de cette étude une augmentation modérée du risque de tempêtes sur la partie nord de la France. Aucun impact n'est décelable pour les fortes tempêtes touchant la moitié sud du pays, l'ensemble des systèmes ayant même tendance à voir une diminution de fréquence.

2.7 Extended abstract

Workpackage 1: database

The main outcome of IMFREX is a web site dedicated to the project and hosted by Médias-France. This public site is accessible at <http://medias.cnrs.fr/imfrex/>. It contains a database that can provide upon request daily data from Météo-France simulations. An ftp server provides data from IPSL scenarios. During the project, this server has been used for delivering to the partners daily data of temperature, precipitation, wind and snow from observations. Daily reference series (SQR) have been prepared for the IMFREX project. They concern temperature and precipitation. These series have been used both for model calibration and for climate diagnostics about 20th century trends.

Workpackage 2: model validation

We have studied probability density functions for precipitation, daily minimum and maximum temperature in reference simulations with ARPEGE and LMDZ models. For each season, at each grid point, we have compared model frequencies with interpolated observed frequencies. It appears that systematic errors depend on the range of the variables. The main default consists of underestimating the frequency of dry days. On the other hand, they are able to produce realistic heavy rainfall in winter. Indices proposed by the European project STARDEX have been used to synthesize statistical properties through charts over France. STARDEX indices have been also calculated year by year with SQR data to estimate trends over France. Analyzing the indices emphasizes the systematic increase of all temperature-related indices in the 1951-2000 period. A weak trend in variability is found with maximum temperature. As far as precipitation is concerned, less systematic trends are found, except an increase in rain duration or in summer droughts. In overseas French regions temperature significantly increases during 1976-2003.

Workpackage 3: direct approach

Using SQR data, we have computed seasonal quantiles for temperature (daily minimum and maximum) and precipitation. These values have permitted to carry out a correction method for model output. Simulated series for the end of the 21st century by ARPEGE and LMDZ have been corrected with this method. ARPEGE results show that the frequency of minimum temperature below -5°C becomes negligible in a changed climate, whereas the frequency of maximum temperature above 35°C is multiplied by 5 to 10. A comparison with less pessimistic scenarios produced by LMDZ is done with the same indices as in last section (STARDEX indices). In order to better take into account the atmospheric contribution to surface hydrology, a routing scheme has been used for the four major French rivers. We find an increase in the upper quantiles of potential river run-off in winter and spring. During the other seasons, ARPEGE scenario shows a decrease.

Two experiments with versions of ARPEGE at high resolution over the West Indies have been analyzed in order to evaluate the simulated changes as far as the number of hurricanes (days and trajectories) are concerned in the tropical Atlantic. A software for midlatitude storm tracking, developed at Météo-France, has been adapted for tropical cyclones. The parameters have been tuned so that the average number of hurricanes is the same as observed. The two experiments produce a different response to an increase in greenhouse gas concentration: the total number of trajectories increases in the first one, decreases in the second one. However they agree in simulating a reduction in the Gulf of Mexico. Results obtained by direct counting of hurricanes agree with an indirect counting, based on a cyclogenesis index using large-scale variables. Precipitation inside the hurricanes increases in both scenario experiments.

Workpackage 4: statistical approach

The frequency of debris flows is expected to evolve in a changed climate. An analysis of terrain data in Écrins mountains (French Alps) has enabled to build up a statistical model of probability for debris flow triggering, based on lithologic and atmospheric data. Using ARPEGE and LMDZ output for present climate and scenario shows a decrease in triggering probability for non-glacier debris flows by 30%, and a similar increase for glacier ones. However strong local variations are found in the responses. A non-stationary statistical model for summer extreme temperature distribution in the observations has been built up from SQR data. It shows a trend along the 20th century and allows to extrapolate centennial values for the 21st century. Direct estimates have been obtained with ARPEGE and LMDZ. Values extrapolated

from observations agree with the lower estimates obtained with the models.

The frequency of wet snow events is rather realistic for present climate as simulated by both models. In the scenario, the frequency of such events is reduced, without significant change in the snow amount on the electric lines during the episodes. Extremes of snow amount over buildings are evaluated using monthly observed values and ARPEGE output. Simulation shows that 50-year return values decrease strongly in the scenario, with a reduced geographical spread.

Two completely different statistical methods have been developed to estimate the 50-year return values of surface maximum wind. The first one uses a downscaling of the wind field, the second one is based on storm identification. Both show, with ARPEGE as well as with LMDZ, a slight increase of wind velocity in the northern part of France and a weak decrease along the Mediterranean coast.

Workpackage 5: dynamical approach

The ERA40 reanalysis has been used to cluster weather regimes in the Europe-Atlantic domain, from daily 500 hPa height fields. These regimes have been linked to extreme phenomena over France. In winter, we have studied very cold days and extreme precipitations; in summer we have studied hot days. In the scenario, two regimes show an increased frequency (zonal and blocking), whereas a third one decreases (Greenland anticyclone). In summer, the blocking regime increases strongly. As a consequence, The very cold days decrease all over the country. Probability for heavy winter precipitation in the South decreases, except in Languedoc-Roussillon. In summer, the increase in frequency of blocking and zonal regimes produces an enhanced probability for heat waves.

This clustering has also been used for storm frequency. The Météo-France storm tracking algorithm has been adapted for ERA40 data. The storm frequency, intensity and spread have been evaluated for each weather regime. Using the trend in regime frequency as calculated by ARPEGE, it comes that the storms are increasing in the scenario for the northern part of France. In the southern part, no significant change is observed in the strongest storms, and the total number of storms decreases slightly.

3 Méthodes et modèles

3.1 Le site web

a) la page d'accueil

Le site du projet (<http://medias.cnrs.fr/imfrex>) regroupe les fonctionnalités suivantes (voir fig. 1):

- publicité du projet
- liens sur les fournisseurs des données et les partenaires
- description du projet
- point focal d'accès aux informations IMFREX
- news, documentations, publications
- accès et charte d'accès aux données
- moteur de recherche
- liens sur le site ftp, le sgbd et les sites connexes



Figure 1: Page d'accueil du site IMFREX. Elle regroupe un accès rapide à l'ensemble des principales sections du site et aux différents outils associés.

Ce site a été développé en langage php (dynamique coté serveur) pour obtenir une portabilité maximale sur l'ensemble des navigateurs. La présentation est séparée du contenu par l'emploi de feuilles de styles. L'organisation graphique des pages est maintenue sous forme de « gabarits » gérant la navigation, les dates

de mise à jour... L'ensemble des adresses électroniques du site fait l'objet d'un traitement particulier, pour minimiser la divulgation de ces adresses. La gestion des pages a été faite conjointement par Médias-France et Météo-France, ce site a été mis à jour trimestriellement suivant les besoins du projet. Il a été conçu à partir de logiciels libres de droits et ne dépend d'aucune licence propriétaire. Une archive du site est conservée par les deux organismes, pour assurer sa sécurité. Médias-France maintiendra cet accès en l'état pour une durée au moins égale à six ans, soit jusqu'à mars 2011.

b) le site de consultation ftp : <ftp://medias.cnrs.fr/imfrex>

Ce site ftp regroupe l'ensemble des données du projet organisé de manière hiérarchique par champ pour les modèles ARPEGE et LMDZ. Ce site est accessible au public depuis la fin du projet. Une archive est conservée à Médias-France par sécurité. Les données sont conservées sur le site ftp de consultation dans leur format d'origine, soit un ensemble de fichiers au format `ascii` pour les données ARPEGE, et d'un ensemble de fichiers `netcdf` pour les données LMDZ.

c) la liste de diffusion: imfrex@medias.cnes.fr

Cette liste regroupe les adresses des membres du projet IMFREX. Seules les inscriptions sont « modérées ». La sécurité est assurée par le gestionnaire d'anti-virus du CNES. Une classification anti-spam a été ajoutée par Médias-France. Sa gestion et son archivage sont assurés par le robot de messagerie *Majordomo*.

d) la base de données relationnelle

Seules les données d'ARPEGE sont structurées dans un modèle relationnel. Cette méthode permet de simplifier le développement des interfaces d'accès aux données, mais impose un reformatage des données brutes. Actuellement une interface d'accès thématique et spatio-temporelle a été développée pour ces données (fig. 2).

DA9 DE3 DE4: simulations de référence (40 ans) DE6 DE7 DE8: scénarios (30 ans)

DA9 DA9 DA9

Dates Format AAAA-MM-JJ

Date Min* 1960-01-01 Date Max* 1999-12-31

Vos Paramètres?

champs instantanés*

CHI* Reseau*

TEMPE_SURF TEMPE_SURF TEMPE_SURF HH 00 HH 00 HH 00

champs cumulés 1

COU*

FLUX_HUMI FLUX_HUMI FLUX_HUMI

champs cumulés 2

CHS*

PREC.EAU.CON PREC.EAU.CON PREC.EAU.CON

Positions

Selection par points (1-360)

Premier Point 1 Dernier Point 360

Selection par Latitude et Longitude

Latitude Longitude

Nord 51.0 Sud 41.0 Ouest -5.0 Est 10.0

Format du fichier résultant

Compression

Type de compression gzip Plusieurs Points Par Ligne false

Format des articles

Ordre* Ordre* Ordre*

date date date

Ecrire les champs

date point coordonnées expérience

oui [true] oui [true] oui [true] oui [true]

Votre adresse Email

Figure 2 : Interface d'accès au sgbd du site IMFREX.

Le format des données LMDZ (`netcdf`) contient en interne une description précise des données. Il existe les logiciels clients gratuits pour la plupart des architectures permettant la sélection, l'extraction, voire la visualisation des données. Le site propose le téléchargement de tels outils (*Ferret*, *Panoply*, *Ncview*). C'est pourquoi il a été jugé inutile de développer une interface d'accès spécifique.

3.2 Les séries observées

Les Séries Quotidiennes de Référence (SQR) ont été développées à l'occasion du projet. Avant IMFREX la majorité des travaux de la Direction de la Climatologie sur les changements climatiques a porté sur des paramètres au mieux mensuels à partir de séries homogénéisées (Moisselin et al., 2002). L'idée retenue pour le projet a été de sélectionner les périodes pertinentes pour chaque série quotidienne en s'appuyant notamment sur les résultats de l'homogénéisation de la série mensuelle correspondante. Plus exactement, le travail a consisté pour chaque série mensuelle homogénéisée à regarder quelle était la période où les données quotidiennes étaient a priori les plus fiables. Outre les critères issus de l'homogénéisation, d'autres ont été utilisés : amplitude des déplacements de poste, taux de données manquantes. Les paramètres concernés par cette approche sont les températures minimales et maximales quotidiennes, les cumuls quotidiens de précipitations et la force du vent (sur une période plus courte et pour un usage restreint).

Cette approche de « sélection sans correction » des données quotidiennes a déjà été employée dans différentes études sur l'évolution observée du climat (Frich et al., 2002). Elle se rapproche également de

celle proposée au MEDD par Météo-France et le CSTB dans le cadre du volet métropolitain de la « convention vent » passée avec la DPPR. Au fur et à mesure du travail sur les séries et des ajustements demandés par les utilisateurs, quatre jeux de données SQR ont été successivement mis à disposition.

Outre les SQR, les séries homogénéisées mensuelles de température et précipitations ont été utilisées pour caractériser l'évolution des paramètres moyens. L'étude de l'évolution des températures dans les DOM-TOM sur la seconde moitié du 20ème siècle a été entreprise en sollicitant l'avis des experts locaux et en comparant les résultats avec les données terrestres en points de grille CRU (Climate Research Unit, Mitchell et al, 2005). Ce point est décrit dans l'Annexe A.

Les maxima mensuels sur 129 postes en France du paramètre « hauteurs de neige maximale en 24 heures » en plaine sur la période 1949-2003 ont été contrôlés spécifiquement à l'occasion du projet et fournis au CSTB. Les autres données mobilisées n'ont pas fait l'objet de développements spécifiques ; elles concernent les données quotidiennes de température et de précipitations pour les régions à faible densité en SQR, et la hauteur de neige fraîche à proximité du massif des Écrins.

3.3 Les indices climatiques

Les indices retenus pour évaluer l'évolution du climat sont issus des projets européens STARDEX et ECA&D. Parmi ces indices, on peut retenir la liste des dix indices recommandés par le programme CLIVAR de l'OMM pour le suivi des changements climatiques. A ces indices sont venus s'ajouter quelques autres sur l'initiative de la Direction de la Climatologie ou à la demande des autres partenaires du projet (période la plus longue sans dégel, écart-type intra-annuel de la température, coefficient de variation des précipitations). Les indices décrivent l'évolution des extrêmes simples (nombre de jours de gel par exemple) ou des événements climatiques (vagues de froid). Les indices sont calculés série par série et utilisent des seuils absolus (nombre de jours sans dégel par exemple) ou relatifs (nombre de jours au-dessus d'une climatologie) ; ils ne portent pas sur des événements très rares, en raison des problèmes d'échantillon (Frei et Schär, 2001).

La signification des évolutions est examinée via un test sur le coefficient de Spearman (corrélation des rangs). Différents angles de vues sont proposés pour étudier les évolutions climatiques. Les courbes chronologiques présentent la valeur annuelle ou saisonnière de l'indice, une moyenne glissante (5 ans) et la droite de régression linéaire. Les cartographies présentent les tendances sur différentes périodes. Les fichiers par station décrivent l'évolution des indices les plus fréquemment rencontrés pour quelques stations choisies selon la profondeur des données exploitables, leur proximité d'une grande ville. On peut aussi accéder à des fichiers avec tous les indices d'un paramètre ou des blocs par indice. Le logiciel de calcul d'indice de STARDEX a été adapté.

3.4 Le modèle du climat du CNRM

Le modèle ARPEGE-Climat utilisé à Météo-France est dérivé du modèle de prévision opérationnelle à courte échéance. Ces deux modèles offrent la possibilité de faire varier la résolution horizontale entre une zone d'intérêt et ses antipodes (Déqué et Piedelievre, 1995). Dans la version climat, la résolution varie de 50 km au centre de la Méditerranée à 450 km dans le Pacifique Sud. Ceci assure une résolution d'au moins 60 km sur la France. La discrétisation verticale se fait sur 31 couches qui suivent le relief avec des épaisseurs variables. Le pas de temps de calcul est de 30 mn. La version utilisée est la version 3 (Gibelin et Déqué, 2003).

3.5 Le modèle du climat de l'IPSL

Le modèle LMDZ est aussi un modèle de circulation générale à maille variable (Li, 1999). La version utilisée dans le projet est LMDZ3.3, également employée à l'IPSL pour le système couplé océan-atmosphère global. Un zoom de facteur 2 est appliqué pour avoir une résolution spatiale d'environ 160 km en France. La paramétrisation physique utilise actuellement le schéma d'Emanuel pour la convection, et le modèle ORCHIDEE pour les processus du sol. Un schéma amélioré des nuages y a été aussi implanté.

3.6 La détection des cyclones tropicaux

L'analyse repose sur deux couples de simulations réalisées avec ARPEGE. Chaque couple comporte une simulation du climat présent et une simulation pour la fin du 21^{ème} siècle. Le premier couple utilise une résolution uniforme de 0.5° sur le globe, et le scénario correspondant est GIEC-B2. Le deuxième utilise une version à résolution variable, valant 0.5° sur les Antilles, et le scénario correspondant est GIEC-A2. La première phase du travail a consisté à extraire les variables pertinentes sur cette zone au pas de temps 6h.

Le logiciel de suivi des dépressions de moyennes latitudes, développé par Ayrault (1998) a été adapté pour notre étude. Ce logiciel effectue le travail de calcul des trajectoires en 2 étapes : une phase de détection, qui cherche le maximum de tourbillon relatif à 850 hPa, et une phase d'appariement qui permet de regrouper 2 à 2 les maxima précédemment obtenus pour constituer des trajectoires. Les critères de suivi des dépressions de moyennes latitudes ne correspondent pas à ceux qui servent à suivre les cyclones tropicaux. En effet, dans la version originale, la phase de détection est assez simple alors que la phase d'appariement est délicate, du fait du grand nombre de maxima obtenus dans les régions de moyennes latitudes qui peut amener à des incertitudes dans les appariements. Dans la version adaptée à la problématique des cyclones tropicaux, l'accent est mis sur la phase de détection, un certain nombre de critères supplémentaires devant être remplis pour pouvoir caractériser un cyclone. Le choix de seuils pour les différents critères s'est avéré la partie délicate du travail. Une fois la phase de détection effectuée, la construction de la trajectoire ne pose pas trop de problème car le risque d'erreur dans l'appariement est limité par le peu de candidats répondant simultanément aux critères. On trouvera à l'Annexe C plus de détails sur les critères de sélection.

3.7 Les températures centennales

On dispose de 91 séries de température maximale journalière dans les SQR. Les périodes de temps définies à partir du critère d'arrêt de Météo-France ont tout d'abord été extraites. Dans cette étude et en vue d'un travail sur les températures simulées dans un cadre de changement climatique, seules les SQR les plus proches géographiquement des points de grille d'ARPEGE, soient 61 postes, sont retenus. Enfin, parmi ces 61 postes, 55 présentent des séries suffisamment longues et sans valeurs manquantes consécutives pour être étudiées. Ces postes sont donnés à l'Annexe D. Par la suite, on extrait les températures de la période du 14 juin au 21 septembre afin d'étudier les extrêmes d'une population homogène.

On teste d'abord la tendance éventuelle des extrêmes sur la deuxième moitié du 20^{ème} siècle. Deux méthodes de valeurs extrêmes sont utilisées : la méthode de maxima par bloc (loi GEV) et la méthode de dépassement de seuil (combinaison de loi de Poisson et de loi GPD), dans lesquelles on teste différentes formes polynomiales de tendances temporelles dans les paramètres des lois d'ajustement. Voir l'Annexe D pour plus de détails sur l'aspect statistique de la construction des lois.

Pour le 21^{ème} siècle nous avons utilisé une extrapolation non-stationnaire du climat actuel sur 1960-1999 (SQR). Cette extrapolation non-stationnaire des extrêmes utilise une méthode de dépassement de seuil avec un modèle quadratique pour le paramètre d'intensité (loi de Poisson) et stationnaire pour le paramètre lié à l'intensité du dépassement de seuil (loi GPD). Ce modèle de tendance est significatif sur la plupart des 55 SQR étudiées. Une autre approche consiste à utiliser directement les températures corrigées d'ARPEGE (scénarios A2 et B2) et de LMDZ (A2 avec les TSM IPSL et CNRM) pour estimer le niveau de retour centennal (et son intervalle de confiance à 95%) en stationnaire dans chaque modèle selon une méthode de dépassement de seuil.

3.8 La relation vent-climat

On utilise trois types de données pour passer de la circulation de grande échelle (supposée bien simulée) au vent local. Pour la petite échelle, on utilise des observations locales ; il s'agit du maximum quotidien du vent instantané sur 1 s pendant la période du 15 octobre au 15 avril, permettant de considérer des phénomènes météorologiques homogènes (liés aux passages des dépressions d'hiver venant de l'Atlantique) ; la période 1974-2002 permet d'utiliser 22 stations. Les observations de grande échelle (prédicteur) sont les réanalyses ERA40 du Centre Européen de Prévisions Météorologiques à Moyen Terme (CEPMMT) sur l'Atlantique nord. Enfin, pour les scénarios, on utilise les simulations climatiques interpolées sur la grille des réanalyses. La méthode statistique permettant de passer du prédicteur (vent à 850 hPa à grande échelle) au prédicand (vent local) s'appuie sur la régression linéaire multiple après filtrage des valeurs singulières de la matrice de covariance (méthode SVD). Une méthode de dépassement de seuil est utilisée pour estimer les niveaux de

retour. Les détails techniques sont donnés dans l'Annexe D.

Une deuxième technique a été employée pour désagréger le vent en surface. Il s'agit également d'une régression linéaire, mais sept prédicteurs sont calculés à partir de la configuration locale du champ de tourbillon à 850 hPa (intensité du tourbillon, distance entre le centre de la dépression et la station de mesure, déplacement de la dépression lors des 6 dernières heures, écart de longitude entre la dépression et le méridien 2°W, écart de latitude entre la dépression et la station météo, variation du tourbillon au cours des 6 dernières heures et âge de la dépression). La dépression correspond à un maximum de tourbillon, et il faut dans une étape préliminaire identifier les dépressions et leurs trajectoires de 6h en 6h. La méthode TRACK (Hodges 1998) est utilisée sur les analyses ERA15 et les sorties des modèles ARPEGE et LMDZ. Une fois les vitesses maximales du vent estimées, on passe aux valeurs de retour sur 50 ans par une méthode de maxima par bloc. Les détails techniques sont donnés dans l'Annexe E.

3.9 L'impact de la neige

La neige collante est un phénomène qui peut engendrer des dégâts sur les lignes électriques aériennes d'EDF. Pour former un manchon de neige autour de la ligne, le contenu en eau liquide de la neige doit être suffisant pour que celle-ci gèle au contact de l'obstacle. L'averse de neige doit également être conséquente et suffisamment longue pour que le manchon soit important. Le critère de neige collante appliqué, établi dans le cadre du projet « Aléas climatiques et météorologiques » d'EDF R&D en 2003, est le suivant : la température minimale quotidienne est comprise entre -4°C et $0,5^{\circ}\text{C}$, la température maximale quotidienne entre $-0,5^{\circ}\text{C}$ et 5°C et le cumul quotidien de précipitations est supérieur à 10 mm.

Le calcul de la charge de neige sur les bâtiments se fait à partir de 129 séries observées de 1947 à 2003. Les données sont des maxima mensuels de hauteur de neige au sol exprimée en cm. La conversion en valeurs de charge est réalisée en considérant une masse volumique moyenne de la neige de $150 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Pour les champs simulés, on utilise le point de grille du modèle le plus proche de la station étudiée et on en extrait les données de charge de neige qui sont exprimés en $\text{kg}\cdot\text{m}^{-2}$. Le calcul des charges extrêmes s'appuie sur la distribution de Gumbel et est détaillé dans l'Annexe E.

3.10 Le modèle de coulées de débris

Pour estimer les impacts du changement climatique futur sur la dynamique des *df* dans le massif des Écrins plusieurs étapes ont été suivies. On étudie d'abord la dynamique actuelle des *df* (1952-2000) et on relie les variations de la dynamique des *df* au climat actuel par des modèles statistiques. On caractérise sur la période les variations du climat à partir de données observées provenant de stations situées à proximité du massif des Écrins et on estime ses effets sur la dynamique des *df*. On caractérise les variations du climat actuel simulé à l'aide des sorties des modèles ARPEGE et LMDZ et on corrige ces variations en comparant les données actuelles observées et simulées sur la zone d'étude. On met en évidence les variations climatiques pour le siècle prochain à l'aide d'ARPEGE et LMDZ. Enfin, on utilise les modèles statistiques reliant la dynamique des *df* au climat actuel simulé avec les sorties corrigées des modèles pour le 21ème siècle.

Les méthodes statistiques reposent sur l'utilisation de la théorie des valeurs extrêmes et sur une modélisation probabiliste de type *logit*. L'Annexe F les présente en détail. A partir de la relation climat-probabilité de *df*, on utilise les sorties des modèles ARPEGE et LMDZ pour calculer des probabilités à la fin du 21ème siècle.

3.11 Les régimes de temps

Pour la réalisation de ce travail, trois types de données ont été utilisés : la réanalyse ERA40, les données SQR et les simulations provenant d'ARPEGE. Les observations, qui décrivent l'état réel atmosphérique, sont représentées par la réanalyse ERA40 (Uppala et al., 2000), fournies par le CEPMMT. Les données d'ERA40 couvrent la période 1957-2002 par pas de 6h. La résolution spatiale de la grille extraite d'ERA40 est $1,5^{\circ}\times 1,5^{\circ}$.

Pour le développement de l'approche dynamique plusieurs méthodes ont été mises en œuvre. Tout d'abord les états atmosphériques de grande échelle ont été classés en régimes de temps par une méthode de classification automatique (Michelangeli et al. 1995). L'identification des régimes de temps a été réalisée

pour les observations (fig. 3). Dans le cas des simulations, les champs d'ARPEGE sont projetés sur les régimes issus d'ERA40. Nous avons ensuite évalué les distributions conditionnelles pour chaque régime de trois phénomènes : les jours très froids d'hiver (définis comme les jours avec T_{min} au dessous du 5ème centile), les jours de précipitations intenses d'hiver (définis comme les jours dont les précipitations sont au dessus du 95ème centile) et les jours très chauds d'été (définis comme les jours avec T_{max} au dessus du 95ème centile).

Dans une deuxième partie du travail, nous sommes partis de l'identification des extrêmes pour essayer d'identifier les structures de grande échelle les plus favorables à l'occurrence des événements extrêmes en France. Pour répondre à cette question, les classifications ont été faites seulement avec les jours des extrêmes et les structures atmosphériques résultantes ont été interprétées en terme de transition entre les régimes de grande échelle. Plus de détails sur les méthodes sont donnés dans l'Annexe G.

Figure 4: Les 4 régimes de temps: Anticyclone Groenlandais (GA), Dorsale Atlantique (AR), Blocage (BL), et Zonal (ZO). Écart des isolignes de Z500 30m. La zone grisée représente le lieu privilégié des perturbations.

3.12 La relation régime-tempêtes

Nous avons utilisé l'algorithme de détection et d'appariement de maxima dans une série temporelle de champ de tourbillon relatif pour reconstituer de manière automatique les trajectoires de dépressions atmosphériques et en relever des propriétés en les suivant. C'est ce logiciel qui a été adapté dans la section 3.6. L'algorithme de détection et de suivi a été adapté à ERA40; il est différent de celui utilisé dans la section 3.8. Le programme de post-traitement a été modifié pour faciliter la confrontation entre les trajectoires et des régimes de temps définis dans la section 3.11.

Pour la période du 15 octobre au 15 avril, on utilise la classification en 8 régimes. Chaque trajectoire est confrontée aux régimes présents au cours de son cycle d'évolution. Elle est attribuée au régime majoritaire au cours de cette durée. D'autres modes d'attribution à partir d'un seul instant du cycle d'évolution ne semblent pas bouleverser les résultats. On s'aperçoit qu'à chaque régime correspond une orientation générale des dépressions suivies ainsi que des régions plus fréquentées. L'allure générale se compare de manière remarquable avec l'écoulement propre du régime. Une discussion complète des régimes se trouve dans l'Annexe H.

4 résultats

Chacun des cinq volets du projet IMFREX mentionnés dans le résumé étendu (section 2) a été à son tour organisé en tâches dont nous donnons ici les principaux résultats.

4.1 V1.T1: séries simulées

Cette tâche consiste à identifier les variables du modèle et à extraire les données pour la zone France afin de les mettre sur la base de données. Nous avons utilisé trois simulations de 40 ans du modèle du CNRM qui utilisent les TSM observées de 1960 à 1999 (au pas mensuel) et les concentrations moyennes observées des constituants atmosphériques radiativement actifs (au pas décennal, en moyenne globale pour les GES, en fonction de la latitude et de la longitude pour les aérosols). Ces expériences s'appellent DA9, DE3 et DE4. Elles ne diffèrent que par les conditions initiales et sont donc des représentations équiprobables du climat présent. Avec le même modèle, trois simulations de 30 ans (DE6, DE7 et DE8) utilisent les forçages radiatifs (GES et aérosols) proposés par le scénario GIEC-A2 et les anomalies de TSM et d'étendue de banquise provenant d'une simulation couplée effectuée par le modèle du Hadley Centre. Une simulation de 30 ans (DC9) utilise les forçages GIEC-B2. Les 360 points d'un domaine couvrant la France continentale et la Corse ont été extraits pour 36 champs quotidiens ou quadri-quotidiens. On trouve sur le site web les coordonnées géographiques de chaque point et la liste des champs disponibles. Un formulaire d'accès interactif permet d'extraire les données souhaitées directement par son navigateur Internet.

Pour l'étude des cyclones sur l'Atlantique tropical, deux simulations de 10 ans ont été utilisées. La version du modèle ARPEGE utilisé dans ce cas possède une résolution homogène de $0,5^\circ$ sur le globe. La première simulation (DC4) correspond au climat présent, la seconde (DC8) au scénario GIEC-B2. Un autre jeu de simulations de 30 ans possède une résolution variable, avec un maximum de $0,5^\circ$ sur les Antilles (DF5 pour la référence et DF6 pour le scénario GIEC-A2).

Le modèle LMDZ a produit 7 simulations dont la durée est de 30 ans pour chacune. La première est la simulation de contrôle qui représente le climat actuel, et les 6 autres simulations correspondent à GIEC-A2, à trois forçages TSM (IPSL, CNRM et GFDL) et à deux périodes (2030-2059 et 2070-2099). Comme pour les scénarios d'ARPEGE, nous avons utilisé les anomalies de TSM des modèles globaux, superposées aux TSM observées de la simulation de contrôle. Ceci permet de garder un climat de référence commun à tous les scénarios. Pour pouvoir effectuer des diagnostics sur les événements extrêmes, les sorties du modèle sont enregistrées à la fréquence journalière. Les variables disponibles sur le site IMFREX (format `netcdf`) sont : température à 2 m, température minimale et maximale diurne à 2 m, taux de précipitations, taux de neige, vent à 10 m et pression au niveau de la mer. La série de référence et deux scénarios (forçages IPSL et CNRM pour 2070-2099) sont disponibles sur le serveur `ftp`.

4.2 V1.T2: séries observées

Par construction, le nombre de SQR diminue avec la profondeur de la période considérée (fig. 4). Le volume sur 1951-2000 (27 séries de températures minimales, 44 séries de températures maximales, 94 séries de précipitations) permet une analyse détaillée des évolutions climatiques. Le volume sur 1931-2000 est acceptable (8 séries de températures minimales, 17 séries de températures maximales, 38 séries de précipitations). Les évolutions des extrêmes sur 1901-2000 devront être examinées avec grande prudence en modérant la confiance accordée aux tendances individuelles (1 série de températures minimales, 2 séries de températures maximales, 7 séries de précipitations). Le volume des SQR de précipitations peut paraître avantageux mais beaucoup de SQR sont très proches et le paramètre présente une forte variabilité spatiale. On notera également une meilleure disponibilité des SQR de températures maximales comparée à celle des températures minimales. En effet, les deux paramètres ont été homogénéisés indépendamment, les instruments et les causes de ruptures ne sont pas nécessairement les mêmes.

Contrairement à celui des SQR, le volume de séries homogénéisées mensuelles ne varie pas avec la période et offre de larges possibilités d'analyse de l'évolution de la moyenne (70 séries de températures et 300 séries de précipitations sur le 20ème siècle). Une série de référence de température annuelle a été constituée sur

chaque DOM-TOM sur la période 1976-2003.

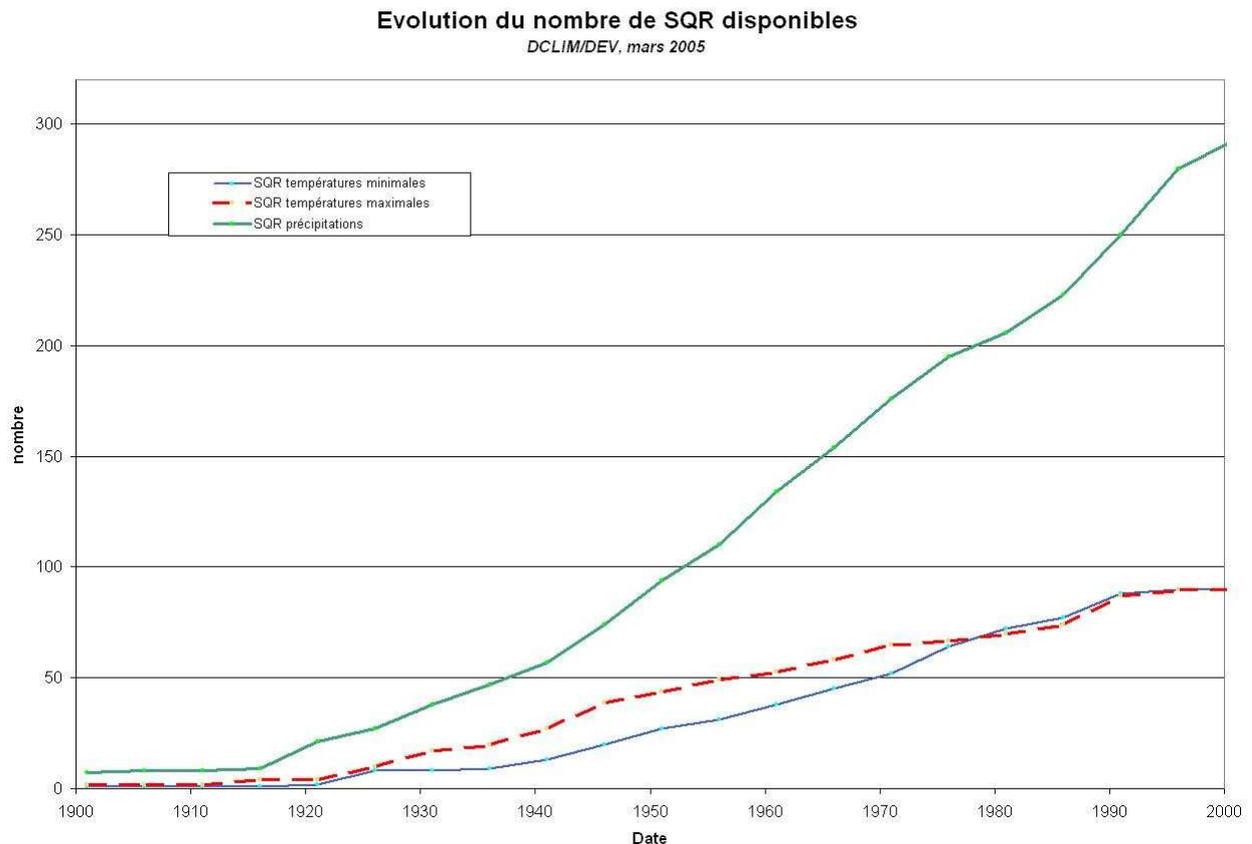


Figure 4: Nombre de SQR disponibles en fonction de la date de départ.

4.3 V1.T3: cartes sur la France

Une partie du site IMFREX est consacrée à la diffusion des résultats sous forme de cartes sur la France. Les variables montrées sont les indices définis par le projet européen STARDEX, éventuellement complétés par Météo-France/DCLim. Une première série de carte concerne les indices observés au cours du 20^{ème} siècle (voir par exemple fig. 5). Compte tenu du faible nombre de stations au début du 20^{ème} siècle, il n'est pas possible de faire une présentation avec des isolignes. Une deuxième série présente les indices pour le climat présent et la fin du 21^{ème} siècle, pour les modèles ARPEGE et LMDZ. Dans le cas de modèles, la représentation bidimensionnelle est possible sur la grille de chaque modèle (voir par exemple fig. 6).

Le site offre également une animation des anomalies de température et de précipitations au cours du 21^{ème} siècle selon les deux modèles. En ce qui concerne les extrêmes, on trouve aussi des animations du nombre de jours froids d'hiver et de jours chauds d'été pour les observations (20^{ème} siècle) et le scénario d'ARPEGE (21^{ème} siècle).

4.4 V2.T1: validation du climat présent

Cette tâche consiste à évaluer la climatologie du modèle (climat présent) et la climatologie observée pour les températures et les précipitations et les comparer pour valider les modèles. Dans l'exploitation classique des simulations climatiques, on travaille en mode anomalie. On fait l'hypothèse que si le modèle a un biais raisonnable (par exemple s'il est 1°C trop chaud), ce biais sera sensiblement le même dans le climat de la fin du 21^{ème} siècle. Si cette hypothèse était fautive, il faudrait renoncer à toute prospective numérique, car même la simulation à la perfection du climat présent ne nous garantirait pas contre des biais grossiers dans le climat simulé en réponse à une modification de l'effet de serre.

Cependant le travail en mode anomalie ne nous dispense pas de vérifier le réalisme du climat simulé, ne serait-ce que pour apporter une certaine crédibilité à nos projections. De plus, le fait de ne pas avoir de biais dans la moyenne peut venir de compensations et ne nous garantit absolument pas sur la fiabilité des extrêmes. La méthode du diagramme quantile-quantile est une méthode graphique pour vérifier si deux séries ont la même distribution. On trie chaque série par ordre croissant et on fait correspondre la première valeur de la série 1 à la première valeur de la série 2, et ainsi de suite... Si les deux séries obéissent à la même distribution statistique, les points sont alignés le long de la diagonale.

La fig. 7 montre les valeurs obtenues pour Paris (en fait Orly car les modèles ne savent pas prendre en compte l'effet d'îlot urbain). En hiver ARPEGE est trop chaud dans la gamme de températures froides. En été, c'est LMDZ qui est trop chaud. Pour les précipitations, les deux modèles sur-estiment la fréquence des faibles valeurs en hiver, et sous-estiment les fortes valeurs en été.

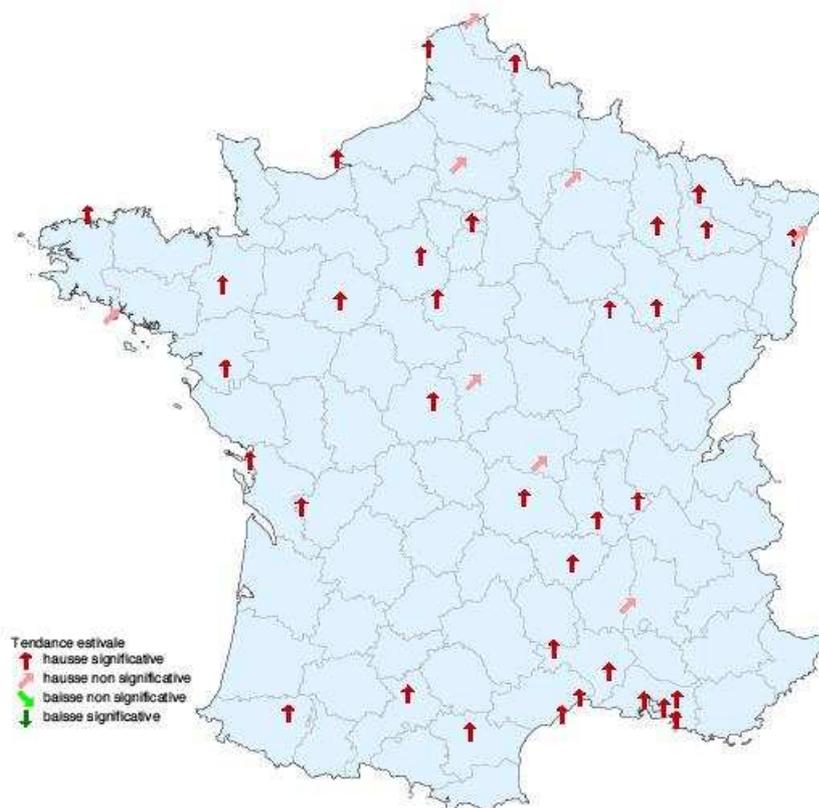
On présente ci-après un test sur les tendances individuelles.



Pour visualiser l'évolution chronologique de l'indice pour une station donnée, cliquez sur cette dernière.

Tx90p : Jours relativement chauds ($T_x >$ dernier décile quotidien)

1951-2000 - Eté

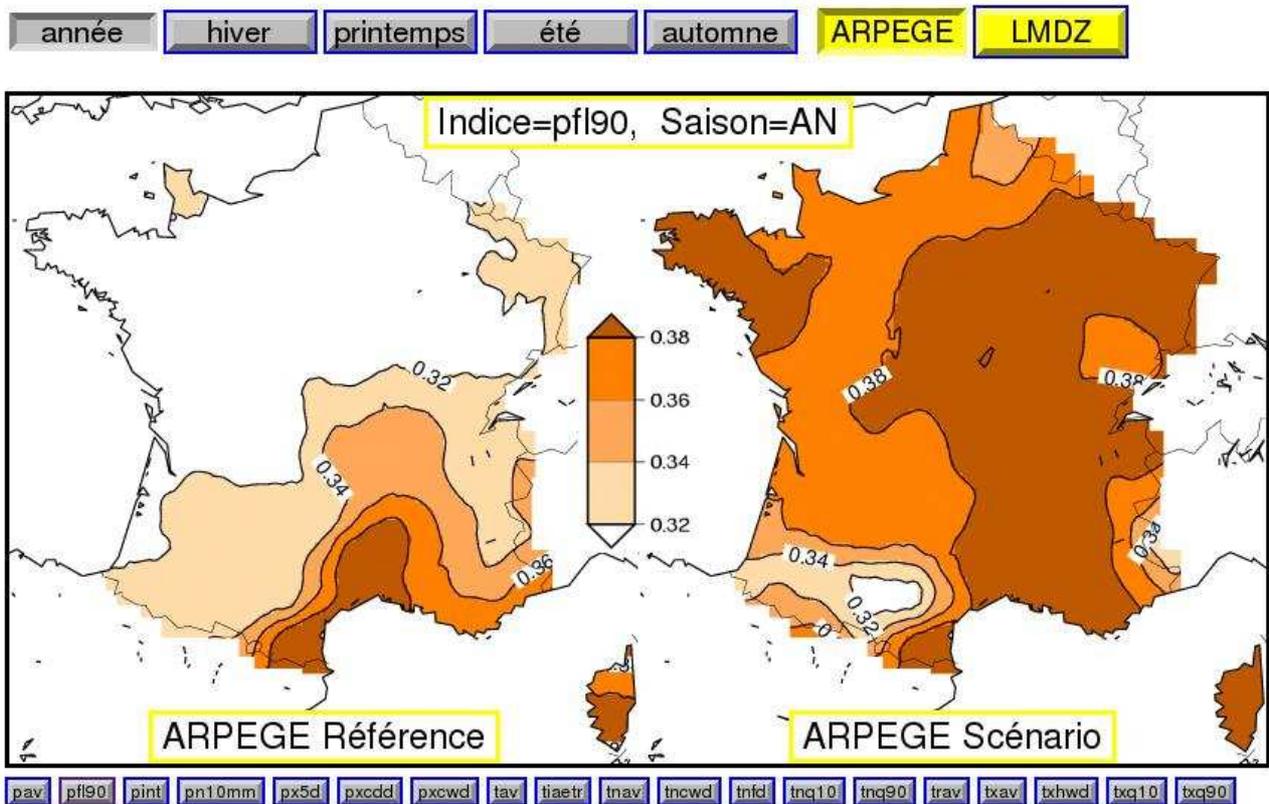


METEO FRANCE

[Télécharger au format pdf](#)

Figure 5: Exemple de carte d'indices observés

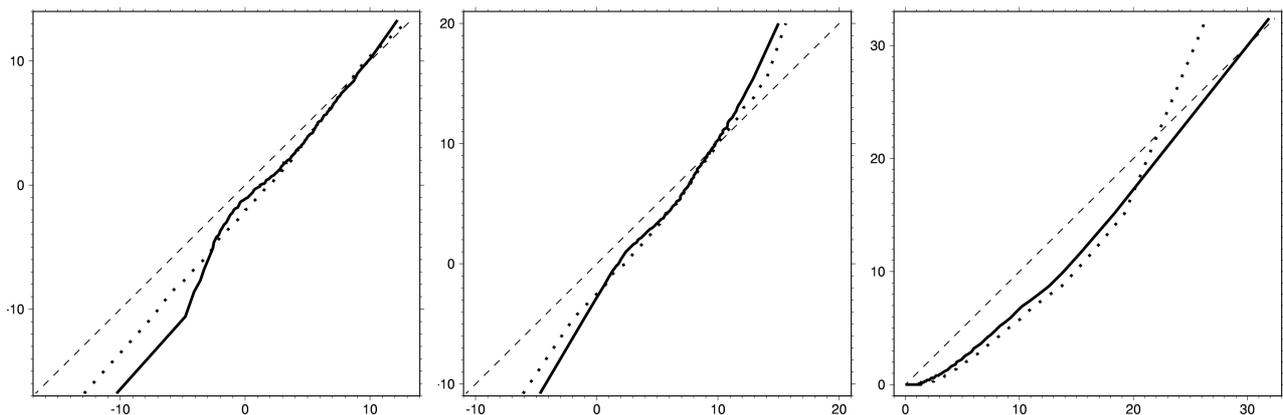
Diagnostic IMFREX de la modélisation : pfl90



pfl90 : Fraction des précipitations au-dessus du 90ème centile annuel

Figure 6: Exemple de carte d'indices simulés

L'Annexe B montre saison par saison des cartes de France des indices STARDEX pour ARPEGE, LMDZ et les observations.



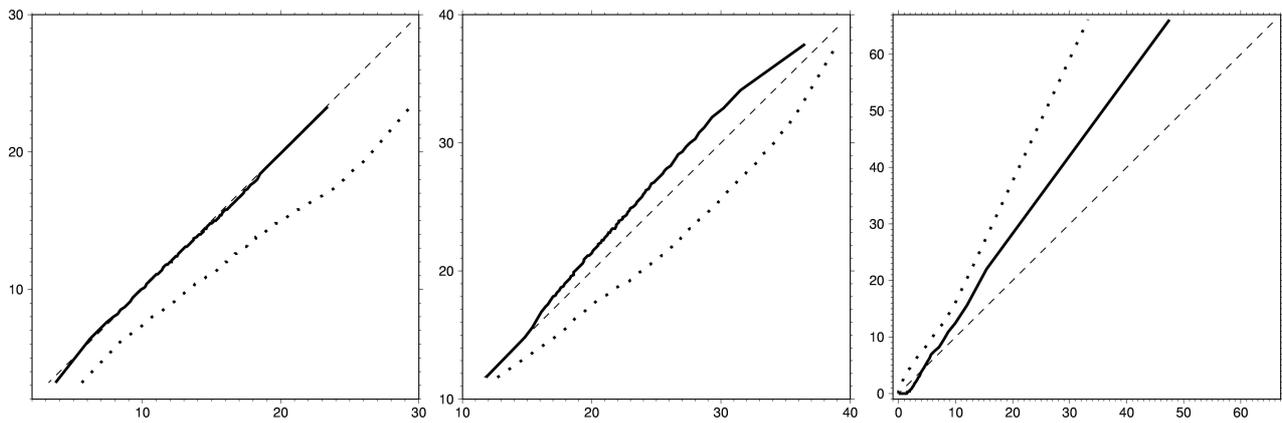


Figure 7: Diagrammes quantile-quantile pour les données ées et simulées à Orly pour, de gauche à droite : Tmin (°C), Tmax (°C) et précipitations (mm/jour) ; hiver (haut) et été (bas); en abscisse ARPEGE (trait plein) LMDZ (trait pointillé), en ordonnée observation (diagonale en tireté).

4.5 V2.T2: tendances observées

Les principaux apports d'IMFREX dans le domaine des évolutions observées sont : le volume des séries sur l'ensemble des périodes, la fiabilité de ces séries via la méthode de sélection, l'ajout de diagnostics nouveaux. Le mode d'accès aux résultats présente également quelques nouveautés par rapport à celui proposé par des sites analogues. La liste des indices climatiques, leur abréviation et leur définition sont données table 1.

Le nombre de séries quotidiennes centenaires exploitables sur la période totale 1901-2000 est limité. On note sur la SQR centennale de Toulouse (fig. 8) que Tn10p diminue et Tn90p augmente : c'est une conséquence du réchauffement à Toulouse des températures nocturnes au cours du 20ème siècle (réchauffement de l'ordre 0.13°C/décennie). Les courbes ne présentent pas de symétrie systématique : cela illustre l'intérêt de travailler sur d'autres paramètres que la moyenne (nombreuses nuits froides à la fin des années 1950, peu de nuits chaudes au début des années 1970). Les deux courbes sur les dix dernières années s'éloignent de la courbe de tendance: cela traduit une accélération du réchauffement.

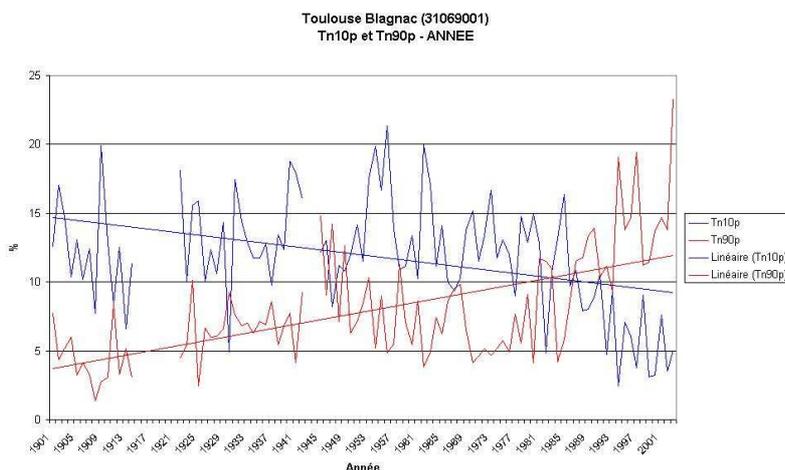


Figure 8: Evolution des indices Tn10p et Tn90p (en %) à proximité de Toulouse au cours du 20ème siècle

Les tables 2 et 3 présentent les évolutions en France sur 1951-2000 en s'appuyant sur les indices recommandés par le programme CLIVAR. Les colonnes 2 à 5 présentent le pourcentage de séries présentant une diminution (-) ou une augmentation (+); quand l'évolution est significative, le symbole est doublé. La significativité est établie à travers un test sur le coefficient de Spearman (corrélation des rangs) avec une confiance de 95%. Les cases en gras sont celles qui présentent la plus forte concentration de cas. Le nombre de séries est dans la colonne N. On constate sur ces tables l'augmentation des extrêmes chauds et la

diminution des extrêmes froids, plus nettement sur les minimales que sur les maximales. Les précipitations présentent un signal moins net, les cas se concentrent dans les parties non significatives.

Les indices d'extrêmes proposés par Easterling et al. (2000) sont présentés dans les tables 4 et 5. La richesse des indices permet l'étude de domaines assez peu visités jusqu'alors. Les indices de sécheresse pdd et dry_spell_mean confirment le comportement déjà vu sur CDD: plutôt en baisse annuelle et assez nette augmentation estivale. Leur pendant « humide » montre des évolutions nettement plus marquées sur l'année et traduisent un allongement des périodes pluvieuses : 43% de hausse significative de CWD, 59% de hausses significative de pww, 57% de hausses significative de wet_spell_mean. Les hausses les plus nettes se situent à l'automne et au printemps.

On examine ci-après l'évolution de la variabilité sur 1951-2000. Les indices Tn10p (respectivement Tn90p) sont en baisse (respectivement en hausse) significative sur toutes les SQR. Les indices portant directement sur la variabilité des températures minimales (sigma_tn) montrent plutôt une diminution, non significative en général, de la variabilité. En revanche sur les températures maximales, on constate une augmentation plus nette pour Tx90p que pour Tx10p (ce qui veut dire que les températures maximales relativement chaudes ont proportionnellement plus augmenté que les températures maximales relativement froides n'ont diminué). On note aussi une grosse majorité de hausses (non significatives en général) pour les indices sigma_tx. En détail on remarque que c'est plutôt l'été que la variabilité des températures maximales a augmenté. On l'illustre avec les indices estivaux Tx10 et Tx90: la médiane des tendances de Tx10 est de 0.1°C/décennie, celle de Tx90 est de 0.5°C/décennie. Klein Tank (2004) suggère une augmentation de la variabilité en Europe sur les minimales et maximales sur la sous-période 1976-2003, et une diminution du même ordre de grandeur sur 1946-1975.

Table 1: Définition des indices employés

CDD	Période sèche la plus longue (prec.<1mm)	CFD	Période avec gel la plus longue
CID	Période sans dégel la plus longue	CWD	Nombre maximal de jours de pluie consécutifs
CWDI	Nombre de jours de vagues de froid	dry_spell_mean	Durée moyenne des périodes sèches
ETR	Amplitude thermique absolue	Fd	Nombre de jour de gel
FSL0	Nombre de jours entre la première et la dernière gelée	GSL	Période croissance végétative
HWDI	Nombre de jours de vagues de chaleur	Id	Nombre de jours sans dégel ($T_x \leq 0^\circ\text{C}$)
pdd	Nombre d'épisodes d'au moins 2 jours consécutifs secs rapporté au nombre total de jours secs	pww	Fraction des épisodes d'au moins 2 jours consécutifs humides rapportés au nombre total de jours humides
R10	Nombre de jours avec des précipitations de plus de 10mm	R1d	Maximum des précipitations quotidiennes
R20	Nombre de jours de fortes précipitations (≥ 20 mm)	R3d	Maximum des précipitations cumulées sur 3 jours
R5d	Maximum du cumul de pluie sur 5 jours	R10d	Maximum du cumul de pluie sur 10 jours
R95T	Fraction des précipitations supérieures au demi-décile supérieur	RR1	Nombre de jours de pluie ($RR \geq 1.0$ mm)
SDII	Cumul moyen de pluies des jours pluvieux	sigma_tn	Écart-type intra-période de la température minimale
sigma_tx	Écart-type intra-période de la température maximale	Su	Nombre de journées d'été ($T_x > 25^\circ\text{C}$)
Tn10p	Nuits relativement froides	Tn90p	Nuits relativement chaudes
Tr	Nombre de nuits tropicales ($T_n > 20^\circ\text{C}$)	Tx10	Décile inférieur des T_x

Tx10p	Journées relativement froides	Tx90	Décile supérieur des Tx
Tx90p	Journées relativement chaudes	wet_spell_mean	Durée moyenne des périodes humides

Table 2: Évolution en France métropolitaine sur 1951-2000 des indices annuels sur les températures parmi les 10 indices recommandés dans l'échange des informations relatives à l'évolution du climat (Frich et al, 2002).

Indice	--	-	+	++	N	Éléments quantitatifs, approche régionale ou saisonnière
Fd	77	23	0	0	26	Des cas non significatifs dans les régions où l'événement est rare Médiane des tendances : -3.2j./décennie
ETR	6	72	22	0	18	Médiane des tendances : -0.2°C/décennie
GSL	0	22	50	28	18	Quartile supérieur des tendances 5.9j./décennie. Hausses remarquables au Nord-Est. Des cas non significatifs dans les régions où l'indice est non pertinent.
HWDI	2	5	80	13	40	Quartile supérieur des tendances : 1.1j./décennie. Hausse estivale un peu plus marquée
Tn90p	0	0	0	100	26	Quartile supérieur des tendances : 5.5j./décennie En hausse encore plus franche l'été.

Table 3: Idem table 2 pour les indices sur les précipitations

Indice	--	-	+	++	N	Éléments quantitatifs, approche régionale ou saisonnière
R10	3	30	56	11	98	Quartile supérieur des tendances : 0.8j/décennie. Disparités régionales (plutôt en hausse au nord) et saisonnières (plutôt en baisse en été).
CDD	5	56	39	0	98	Quartile inférieur des tendances : -0.7j/décennie. Disparités régionales (hausses plutôt à l'ouest) et saisonnières (plutôt en hausse en été).
R5d	0	25	68	7	98	Quartile supérieur des tendances : 2mm/décennie. Disparités régionales (les hausses sur les 2/3 Nord) et saisonnières (plutôt en baisse en été).
SDII	19	42	33	6	98	Signal faible, baisses plutôt l'été
R95T	3	40	52	5	98	Pas d'évolution saisonnière ni de modulation géographique

Table 4: Analyse en France métropolitaine sur 1951-2000 des extrêmes climatiques simples proposés par Easterling et al. (2000).

Extrêmes basés sur des simples statistiques climatiques	
Paramètre	Tendance 1951-2000
Températures maximales plus élevées	Nette Tendances de Tx de 0.15 à 0.3°C/décennie Voir aussi les indices : Tx90p, Tx10p, Su, Id, Tx90
Plus d'étés chauds	Nette Tendances de Tx de 0.25 à 0.4°C/décennie. Tendances de Tn de 0.25 à 0.4°C/décennie Voir aussi les indices estivaux Tx90p, Tn90p, Su, Tr
Températures minimales plus élevées	Nette Tendances de Tn de 0.2 à 0.35°C/décennie

	Voir aussi les indices : Tn90p, Tn10p, Fd
Moins de jours de gel	Nette Tendances de Fd de -0.3j à -5.8j/décennie
Plus d'évènements générant des cumuls journaliers intenses	Pas nette Si R10 est en hausse sur les 2/3 Nord du pays, R1d, SDII et R20 ne confirment pas
Plus d'évènements générant des cumuls multi-journaliers intenses	Pas généralisée R5d est en hausse sur les 2/3 Nord du pays (et surtout en automne). Voir aussi les indices : R3d, R10d

Table 5: Analyse en France métropolitaine sur 1951-2000 des extrêmes climatiques complexes proposés par Easterling et al. (2000).

Evènements climatiques (ou extrêmes complexes)	
Paramètre	Tendance 1951-2000
Plus de vagues de chaleur	Relativement nette (pas d'indice vraiment pertinent) HWDI : tendance de -0.5 à 2.1 j/décennie
Moins de vagues de froid	Relativement nette (un peu plus que HWDI) CWDI : tendances de -0.2 à -2.2j./décennie Voir aussi les indices : CID, CFD, FSL0 (les évolutions de ce dernier étant plus marquées)
Sécheresses aggravées	Relativement nette en été (mais plutôt moins de sécheresses sur l'année) CDD est en hausse au maximum de 2j/décennie en été Voir aussi : SDII , les cumuls estivaux, pdd, dry_spell_mean
Plus d'évènements pluvieux	Relativement nette Médiane des tendances de RR1 : 2.3j/décennie Voir aussi : CWD

Les premiers résultats sur les DOM-TOM montrent une tendance significative de l'ordre de 0.3°C/décennie sur la période 1976-2003 sur la plupart des régions (table 6). Ces résultats préliminaires sont établis avec un jeu de données expertisées mais qui n'atteint pas la fiabilité de celui utilisé pour la métropole.

Table 6: Évolution des températures moyennes annuelles (non homogénéisées) dans les DOM-TOM depuis 1976.

	Guyane	Martinique	Guadeloupe	Réunion	Polynésie Française	Nouvelle Calédonie
Tendance 1976-2003 (°C/décennie) et intervalle de confiance à 95%	0.30 ±0.12	0.29 ±0.12	0.36 ±0.14	0.06 ±0.11	0.39±0.11	0.32 ±0.17

4.6 V3.T1: scénarios pour les températures et précipitations

Cette tâche consiste à évaluer les tendances dans les extrêmes de température (vagues de froid, canicules) et de précipitations (fortes pluies et longues sécheresses) à partir des simulations. Pour corriger efficacement les séries des modèles en vue d'une analyse des extrêmes, il faut travailler sur la fonction de répartition et non sur la moyenne. Cela nécessite beaucoup plus de données, car un histogramme empirique de fréquence est bien plus sensible à l'échantillonnage. Nous avons utilisé 54 années de données quotidiennes pour les SQR. Les quatre saisons ont été traitées indépendamment. Les 99 centiles ainsi que les deux extrêmes absolus ont

été évalués pour chaque point, chaque saison et chaque paramètre. Les diagrammes des stations sont agrégés par département, puis interpolés sur la grille du modèle. Dans le cas d'ARPEGE, les trois simulations de 40 ans ont été traitées séparément et les centiles ont été moyennés. Les extrêmes tous points confondus, ainsi que tous points et toutes saisons confondus (toutes simulations dans le cas du modèle) ont également été calculés pour pouvoir extrapoler les cas où une donnée du 21ème siècle est supérieure au maximum absolu des simulations du 20ème siècle. Dans le pire des cas (situation très chaude d'été dans le sud de la France n'ayant d'équivalent dans aucune simulation de référence), la courbe de correction est extrapolée linéairement. Cette courbe est en fait une courbe du type de la fig. 7. On dispose ainsi, pour chaque point de grille, paramètre et saison, d'une fonction qui transforme une donnée modèle en donnée corrigée. Pour les températures, les différences d'altitude entre les modèles et les sites d'observation sont prises en compte avec un gradient vertical de 6,5 K/km.

A partir des centiles calculés sur les séries corrigées, on peut reconstituer des diagrammes de fréquence pour le climat présent et le scénario de la fin du 21ème siècle. Cette approche ne fait intervenir ni la structure spatiale ni la structure temporelle des données. Elle ne peut pas s'appliquer à des phénomènes comme les tempêtes, les sécheresses ou les crues résultant de longues périodes pluvieuses. Compte tenu des modèles utilisés, les phénomènes d'échelle sous-synoptique (tornades et inondations éclair) ne peuvent être abordés.

La fig. 8 montre la distribution des températures maximales corrigées d'ARPEGE et de LMDZ pour le point le plus proche de Paris. Par construction, les courbes deux modèles coïncident pour le climat présent avec la distribution observée (trait plein). On constate que la distribution du scénario d'ARPEGE devient asymétrique et augmente de variance, ce qui se traduit par une plus grande probabilité d'extrêmes chauds qu'avec le scénario de LMDZ.

Figure 8: Densité de probabilité de la température maximale quotidienne (°C) en été à Paris pour le climat présent (trait plein), le scénario ARPEGE (tireté) et LMDZ (pointillé).

Les tables 7 et 8 détaillent les nombres de jours moyens par saison avec des valeurs extrêmes de température et de précipitations pour le climat actuel et les deux scénarios au point de grille le plus proche de la ville associée. Elles montrent que les températures très froides hivernales subissent une chute de leur fréquence, surtout dans le scénario ARPEGE, tandis que les températures très chaudes sont jusqu'à vingt fois plus fréquentes. Par contre, les précipitations extrêmes varient assez peu (on trouve un résultat similaire au printemps et en automne).

Table 7: Nombre de jours d'hiver avec $T_{min} < -5^{\circ}C$ (gauche) et d'été avec $T_{max} > 35^{\circ}C$ (droite, bleu)

	Lille		Rennes		Paris		Strasbourg		Lyon		Bordeaux		Toulouse		Marseille	
actuel	8	1	5	1	5	1	21	1	13	1	4	2	4	2	3	1
ARPEGE	2	4	1	6	1	9	6	5	2	13	1	11	1	22	1	24
LMDZ	3	1	2	2	3	3	8	2	5	8	3	11	3	15	1	7

Table 8: Nombre de jours d'hiver (gauche) et d'été (droite, bleu) avec précipitations > 20 mm

	Lille		Rennes		Paris		Strasbourg		Lyon		Bordeaux		Toulouse		Marseille	
actuel	1	1	1	1	1	1	2	1	3	2	2	2	1	2	2	3

ARPEGE	1	1	1	3	1	2	2	2	2	3	1	3	1	2	1	4
LMDZ	1	2	1	3	2	2	1	2	3	2	2	4	2	4	2	5

Pour une cartographie sur la France de la réponse des modèles, nous avons sélectionné trois indices STARDEX qui s'expriment en nombre de jours par saison. Le premier (fig. 9) montre les jours chauds en été. Il s'agit des jours pour lesquels la température maximale est supérieure au dernier décile de la période 1960-1989. Le second (fig. 10) montre la longueur maximum d'une période sèche en été (jours consécutifs avec moins de 1 mm de pluie). Le troisième (fig. 11) montre le nombre de jours d'hiver avec des précipitations supérieures à 10 mm. Ces cartes résument les principales caractéristiques de l'évolution des extrêmes: plus de canicules, plus de sécheresses en été, des pluies fortes plus nombreuses en hiver.

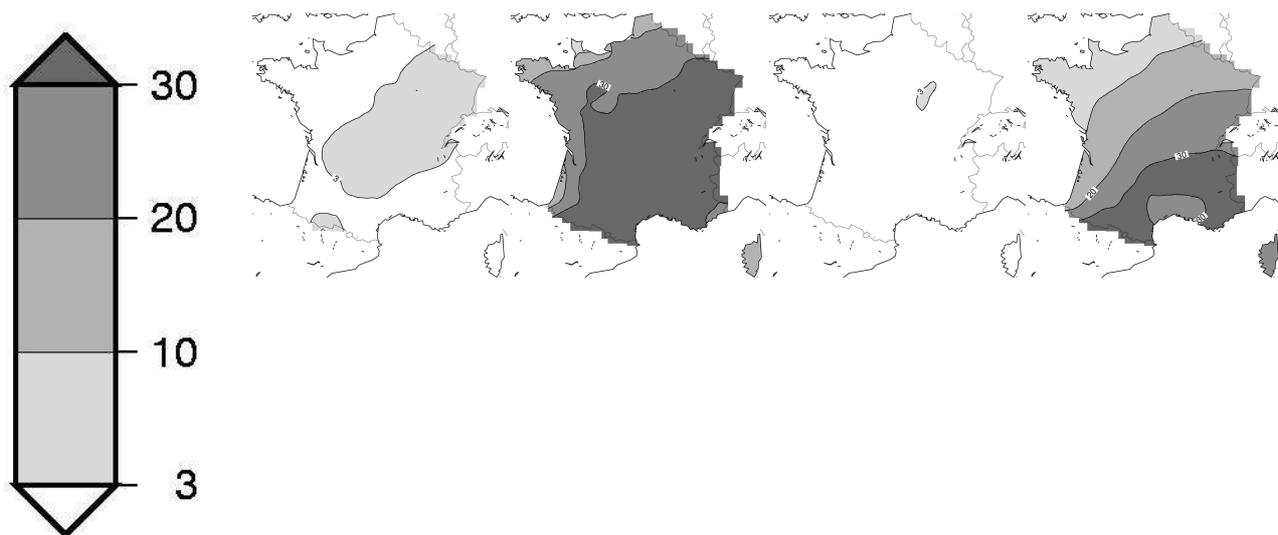


Figure 9: Nombre de jours chauds par été; de gauche à droite référence ARPEGE, scénario ARPEGE, référence LMDZ, scénario LMDZ.



Figure 10: Idem fig. 9 pour les jours secs consécutifs en été.

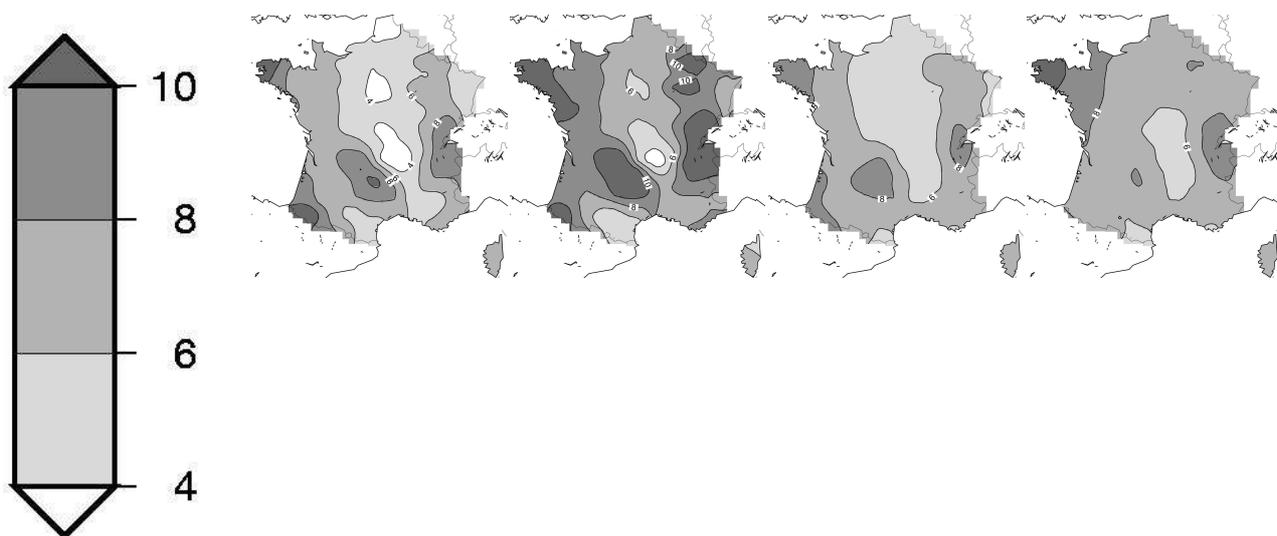


Figure 11: Idem fig. 9 pour les jours d'hiver avec des précipitations supérieures à 10 mm.

Pour caractériser l'impact sur le cycle hydrologique, les précipitations ne suffisent pas, car on peut s'attendre à une augmentation de l'évapotranspiration potentielle avec des températures plus chaudes, et du ruissellement avec des pluies fortes plus nombreuses. Avec ARPEGE, on observe une diminution de la réserve utile en eau dans le sol en toute saisons, sauf en hiver. Pour ce qui est des crues, nous avons calculé avec ARPEGE un débit potentiel pour le Rhône, la Garonne, la Loire et la Seine. Cette variable est calculée à partir du ruissellement calculé par ARPEGE, en utilisant le schéma de routage TRIP (Oki and Sud, 1998). Il ne s'agit pas véritablement d'un débit, puisque on ne prend en compte ni circulation profonde, ni irrigation, ni retenues. Il s'agit d'une agrégation de l'eau mise à disposition par l'atmosphère via le ruissellement. Des valeurs mensuelles ont été calculées pour la référence et le scénario. Elles ont été ordonnées et appariées en diagramme quantile-quantile (fig. 12). Rappelons que l'absence de réponse se traduit par les points sur la diagonale.

Les valeurs de la fig. 12 ne sont pas de véritables débits, mais la comparaison référence-scénario donne une indication de l'évolution possible du risque de crue lente lorsqu'on regarde les valeurs dans la partie droite des diagrammes. Pour le Rhône et la Garonne, le risque de crue augmente en hiver, reste stable au printemps, et diminue aux autres saisons. Pour la Loire et la Seine, le risque augmente en hiver et au printemps. Cette figure illustre en outre l'assèchement particulièrement marqué en été. Pour des débits plus réalistes, on pourra consulter les résultats des projets GICC-Rhône et GICC-Seine.

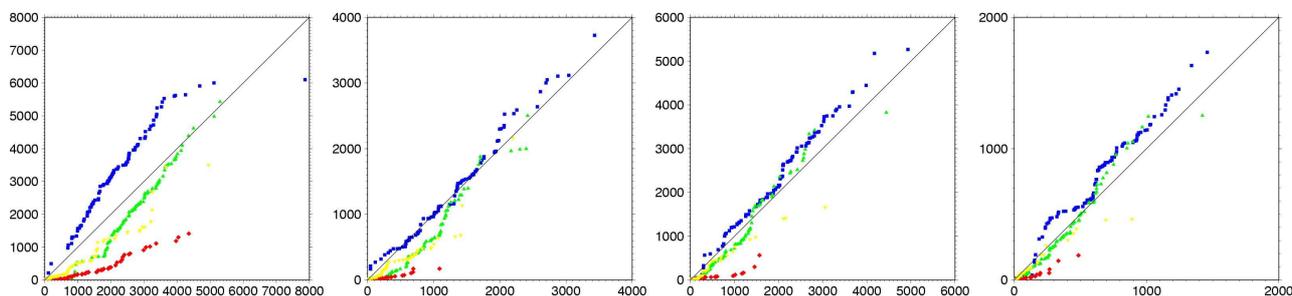


Figure 12: Diagrammes quantile-quantile des débits potentiels mensuels (m^3/s); de gauche à droite: Rhône, Garonne, Loire et Seine; hiver (carrés bleus), printemps (triangles supérieurs verts), été (losanges rouges), automne (triangles inférieurs jaunes); référence en abscisse, scénario en ordonnée.

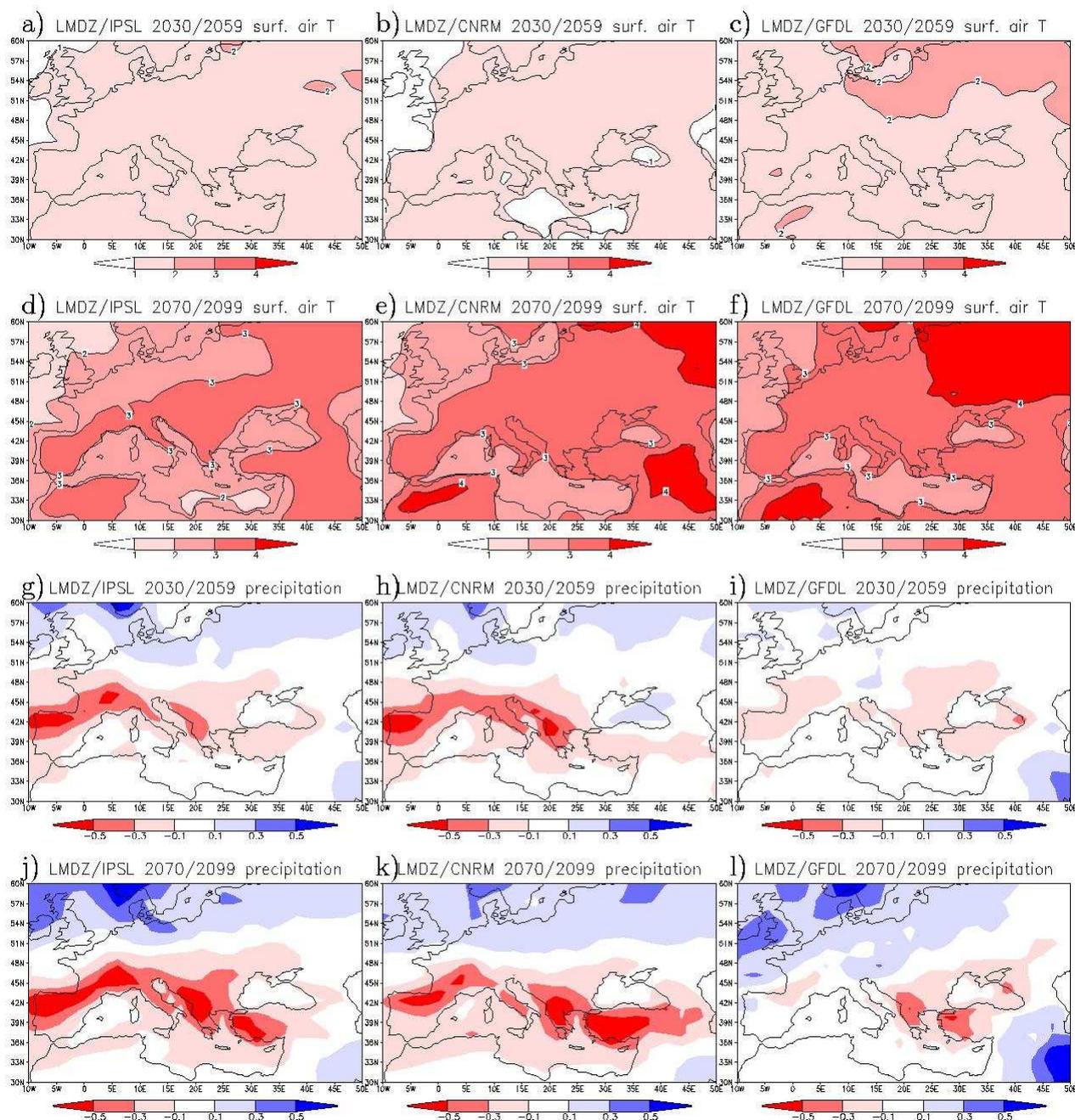


Figure 13: Changements de température à 2 m ($^{\circ}\text{C}$, rangs 1 et 2) et de précipitations totales (mm/jour, rangs 3 et 4) pour les différents scénarios régionalisés, LMDZ/IPSL (colonne 1), LMDZ/CNRM (colonne 2), LMDZ/GFDL (colonne 3), et pour les différentes périodes: 2030/2059 (rangs 1 et 3), 2070/2099 (rangs 2 et 4).

La fig. 13 montre les variations de la température à 2 m et des précipitations pour les six scénarios LMDZ pour la région Europe-Méditerranée. Pour la température, comme pour les précipitations, la palette reste identique pour tous les scénarios et les deux périodes temporelles choisies. Il est facile de constater que le réchauffement, qui est généralisé pour la région montrée, est plus important à la fin du siècle. Pour la France et une large partie de l'Europe, le réchauffement est de 1 à 2 $^{\circ}\text{C}$ pour le milieu du siècle et de 3 à 4 $^{\circ}\text{C}$ pour la fin du siècle. Les trois scénarios sont assez semblables pour les deux périodes, ce qui indique une faible dispersion des résultats et donc sans doute une bonne confiance à accorder à ces résultats. Toutefois, pour la fin du siècle et pour la France, le réchauffement est plus marqué dans LMDZ/GFDL que dans LMDZ/IPSL. En ce qui concerne les précipitations, on peut constater une structure générale qui est caractérisée par une augmentation de pluie au nord de l'Europe et une diminution au sud. Cette structure est renforcée en fin de

siècle.

4.7 V3.T2: scénarios pour les cyclones

Cette tâche consiste à évaluer les tendances dans la fréquence des cyclones simulés. La densité de jours cycloniques (nombre de jours par boîte de 5°) pour le climat présent dans les deux expériences correspond assez fidèlement à la cartographie élaborée par Gray (1975), à partir des observations de la période 1952-1971. De plus, nous avons élaboré la même cartographie, sur la période 1952-2002, à partir de la base de données officielle de la NOAA des ouragans et tempêtes tropicales sur le bassin atlantique, le golfe du Mexique et la mer des Caraïbes (dénommée HURDAT).

La réponse de l'activité cyclonique à l'accroissement des GES est différente dans les deux expériences: l'expérience B2 indique une augmentation alors que l'expérience A2 indique une diminution de l'activité cyclonique (table 9). Si l'on y regarde de plus près, ce désaccord ne concerne que la partie atlantique des moyennes latitudes, le golfe du Mexique répondant identiquement par une baisse notable de l'activité dans les deux expériences. On peut noter une extension de l'anomalie négative sur la mer des Caraïbes dans l'expérience A2, là où celle-ci surestimait l'activité cyclonique dans le climat présent.

Diverses investigations ont permis d'écarter l'hypothèse de l'échantillonnage, ou un effet du choix des seuils pour expliquer la différence de comportement entre ces deux expériences. Il ne reste donc que trois possibilités par ordre de plausibilité décroissante: le choix du scénario (GES et surtout TSM), la résolution horizontale et l'absence de variabilité interannuelle dans la première expérience.

Des expériences ultérieures seront nécessaires pour trancher. L'Annexe C montre les distributions spatiales calculées directement à partir des trajectoires ou avec l'indice de Gray. Les deux approches concordent, la deuxième étant plus économique et mieux adaptée aux simulations à basse résolution. Les résultats de récentes simulations couplées basse résolution mènent à un impact similaire à celui de la version à résolution variable

Un aspect peut être plus important que la fréquence est l'intensité des cyclones. Nous avons calculé des composites à partir de chacune des positions et des échéances de ceux-ci. La fig. 14 montre que dans les deux simulations les cyclones sont significativement plus précipitants. On se reportera à l'Annexe C pour plus de détails sur les résultats, mais on retiendra surtout que l'idée d'une multiplication des cyclones dans le changement climatique n'est pas confirmée par la modélisation.

Table 9: Nombre de trajectoires (NT) et nombre de jours avec cyclone (NJ) par décennie pour les climats référence/scénario sur l'ensemble de l'Atlantique, le Golfe du Mexique (100-60°W, 10-30°N), l'Atlantique Ouest (80-40°W, 30-50°N) et l'Atlantique Est (60-15°W, 10-30°N).

	Atlantique		Golfe du Mexique		Atlantique Est		Atlantique Ouest	
	NT	NJ	NT	NJ	NT	NJ	NT	NJ
GIEC-B2	109 / 120	386 / 479	62 / 55	181 / 151	51 / 63	119 / 152	12 / 24	21 / 57
GIEC-A2	125 / 95	482 / 372	68 / 51	224 / 149	63 / 42	155 / 117	21 / 17	40 / 40

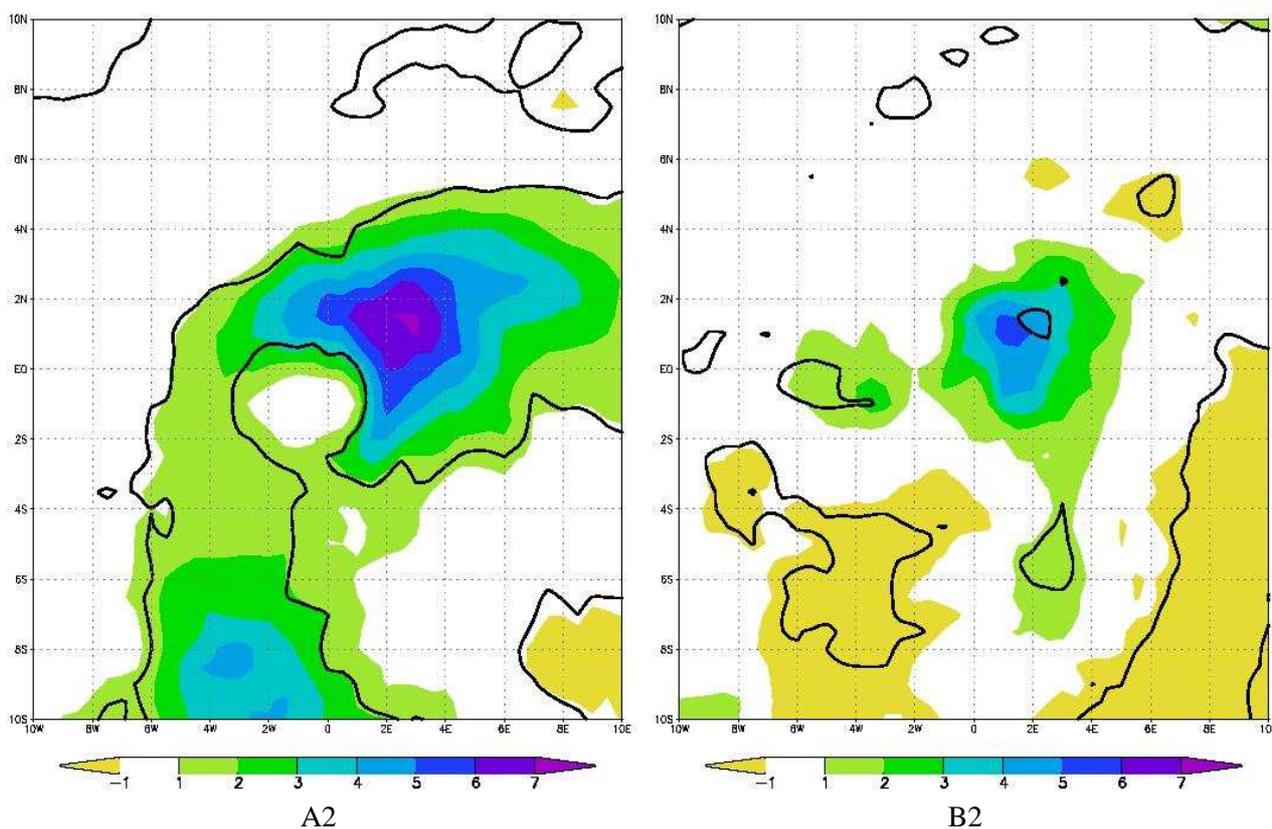


Figure 14: Différence entre les composites des climats présent et futur du champ de précipitations moyen dans le proche environnement de l'ouragan pour l'expérience A2 et B2. Le centre du cyclone se situe au centre de la figure. En trait gras, est représentée la limite de significativité à 95% des différences. Les intervalles sont de 1 mm/jour.

4.8 V4.T1: adaptation statistique des températures extrêmes

a) évolution sur la deuxième moitié du 20ème siècle

A partir des deux méthodes de valeurs extrêmes adaptées au cas non-stationnaire, l'étude des extrêmes chauds observés sur 1960-2003 met en évidence une tendance significative. Pour la méthode des maxima par bloc, on observe une évolution du paramètre de moyenne de GEV linéaire depuis les années 1960-1970, plus significative (à 95%) qu'une évolution stationnaire. Ce résultat est vérifié pour 78% des postes étudiés. Pour la méthode à seuil, on observe une augmentation globale (généralement quadratique) de la fréquence de dépassement des températures extrêmes chaudes par rapport au seuil depuis les années 1960-1970, tout en maintenant une amplitude de ces dépassements stationnaire. Ces résultats sont vérifiés respectivement dans 93% et 94% des postes étudiés.

b) températures chaudes centennales

Les valeurs des températures estivales de durée de retour 100 ans à la fin du 21ème siècle sont obtenues soit par extrapolation du climat actuel soit à partir des scénarios de changement climatique. La fig. 15 montre les valeurs obtenues par extrapolation (a) ou par estimation à partir des scénarios numériques (b,c,d). Hormis les régions de montagne, la valeur extrême de température dépasse 40°C.

L'étude s'arrête au niveau de la comparaison puisque l'on ne peut pas dire quelle approche est la plus réaliste, ne sachant pas si la variabilité du climat futur sera du même ordre que celle du climat actuel (hypothèse de la première approche qui extrapole dans le futur la tendance observée sur les extrêmes chauds passés) ou si les hypothèses d'évolution de la concentration en GES introduites dans les scénarios de type A2

et B2 seront vérifiées (hypothèses de la deuxième approche, combinées au comportement propre du modèle). Il semble tout de même se profiler la conclusion suivante : l'extrapolation des tendances actuelles permet d'atteindre des niveaux de températures centennales comparables à la fourchette basse des températures centennales estimées dans les simulations de changement climatique (réalisées avec ARPEGE et LMDZ). La fourchette haute n'étant pas facile à estimer, il paraîtrait souhaitable de reproduire ce type d'études dans quelques années, afin de vérifier que la forme de la tendance ne se modifie pas fortement (si sigma devenait significativement linéaire par exemple).

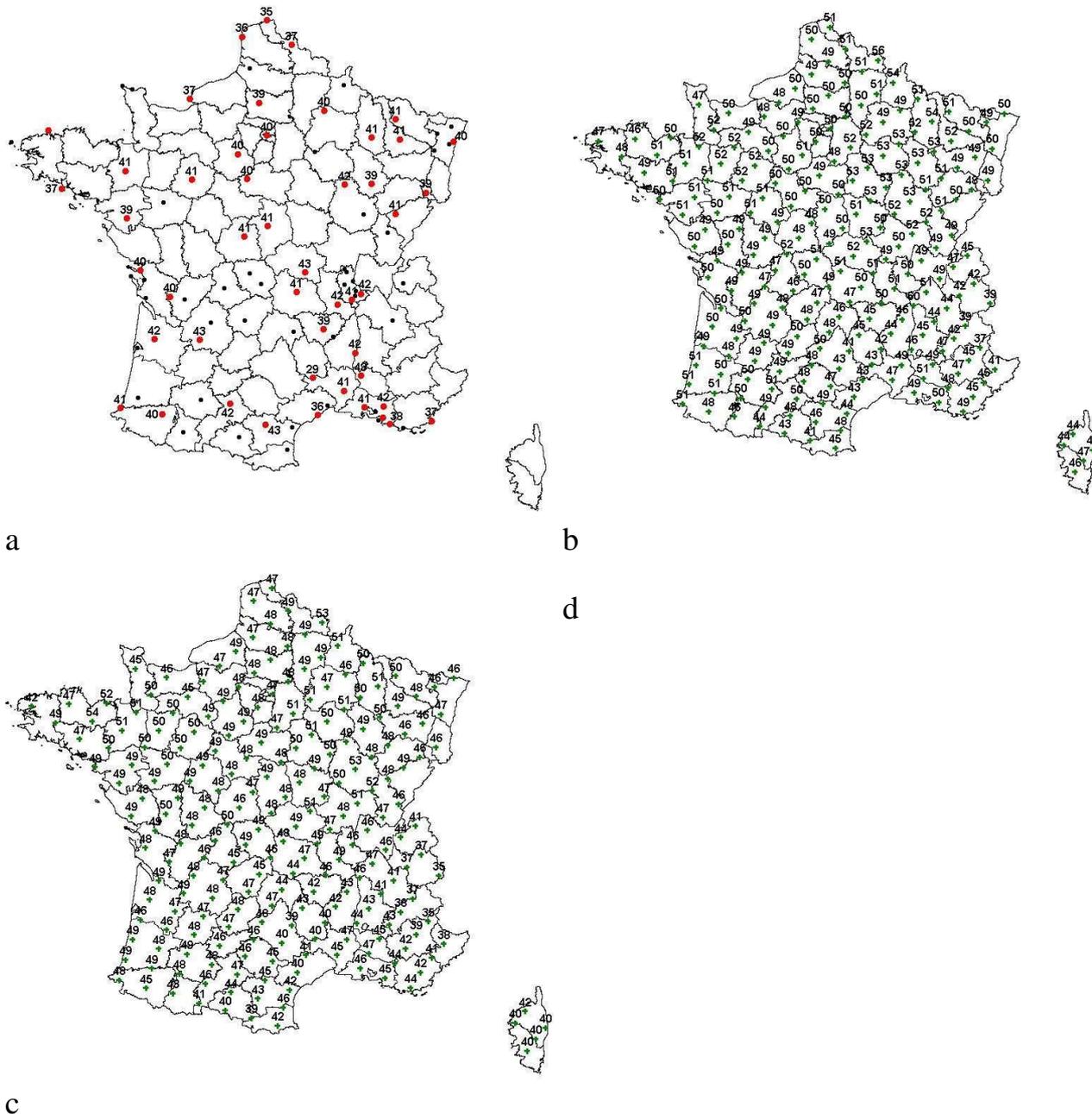


Figure 15: Estimation de la température centennale (°C): extrapolation (a), scénario A2 avec ARPEGE (b), scénario B2 avec ARPEGE (c) et scénario A2 avec LMDZ (d)

c) application à la production d'électricité nucléaire

Suite à la canicule d'août 2003, EDF a décidé de ré-évaluer les températures extrêmes chaudes, utilisées pour dimensionner les systèmes de refroidissement en période estivale, en tenant compte des évolutions

climatiques. Il s'agit en pratique d'estimer des températures extrêmes qui le resteront dans les 30 prochaines années. Ces températures extrêmes sont définies d'une part comme les niveaux centennaux des températures instantanées ou moyennées sur 12h et d'autre part comme un niveau dépassé en moyenne au plus 2% du temps (soit 7 jours par an). Compte tenu de l'échéance de 30 ans, la méthode employée a été l'extrapolation des tendances récentes observées, en utilisant une méthode à seuil comme ci-dessus. Les résultats se trouvent dans l'Annexe D.

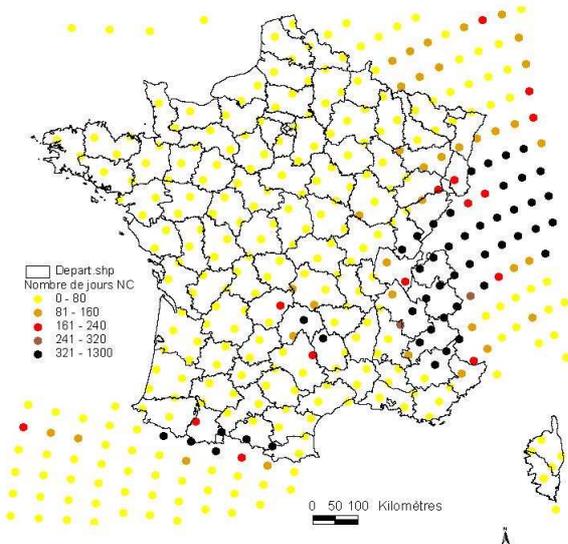
Le nouveau palier de centres nucléaires de production d'électricité, destinés à remplacer progressivement les centrales actuellement en exploitation, est en cours de dimensionnement. Des installations de ce type seront vraisemblablement encore en exploitation à la fin du siècle. Afin d'anticiper les évolutions climatiques, il a été là aussi décidé de rechercher une température élevée de l'air compatible avec l'état actuel des connaissances sur le réchauffement en cours. Pour ce faire, l'approche a consisté à utiliser les simulations climatiques pour la fin du siècle pour évaluer une valeur centennale à cette échéance. Les simulations des modèles ont été utilisées à cet effet, en sélectionnant les points de grille les plus proches des centres nucléaires de production d'électricité actuels. De la même façon, les distributions de température en été simulées par les modèles ont été corrigées par rapport aux mêmes distributions observées aux stations de référence, puis les niveaux centennaux ont été évalués par une méthode à seuil en considérant le climat simulé comme stationnaire. Les résultats obtenus pour la température moyenne sur 12h sont 40,5°C avec ARPEGE et 42,6°C avec LMDZ. Pour la température instantanée on obtient respectivement 46,4°C et 46,7°C. Ces températures correspondent au niveau maximal centennal pour tous les points de grille.

4.9 V4.T2: adaptation statistique de la neige et du vent

a) neige collante

a

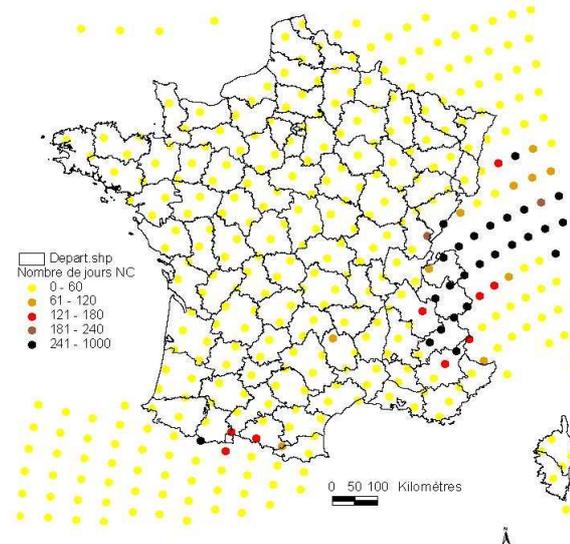
ARPEGE CTRL DA9 (1960-1999) : Nombre de jours de neige collante (critère R&D).



c

b

ARPEGE SCEN DE6 (2070-2099) : Nombre de jours de neige collante (critère R&D).



d

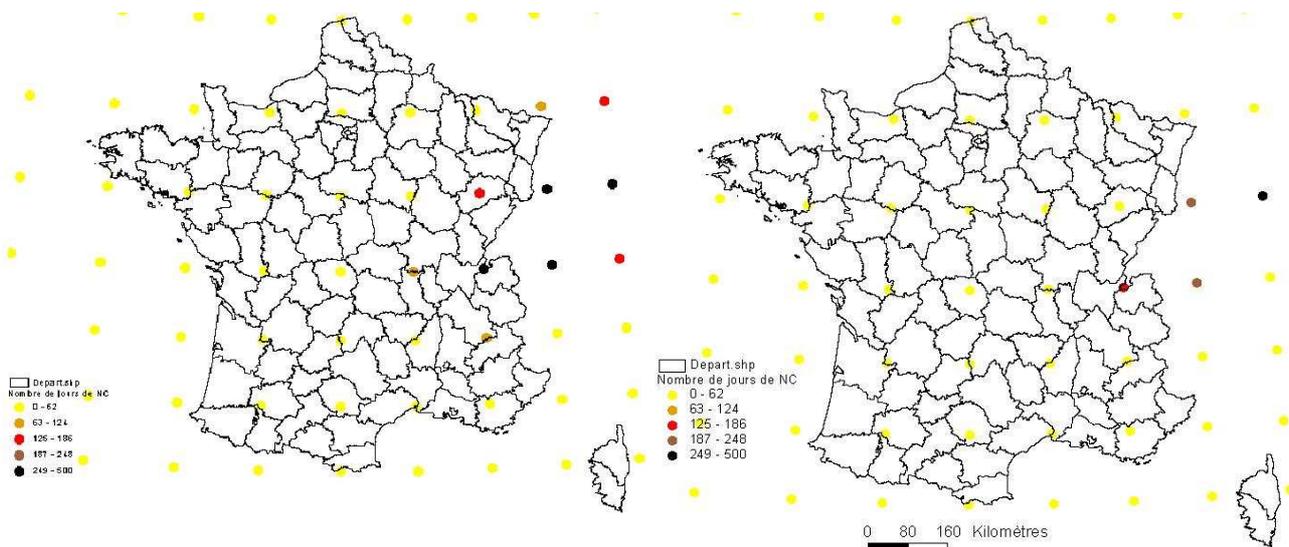


Figure 16: Nombre de jours de neige collante estimé pour le climat présent (a,c) et le scénario (b,d) avec ARPEGE (a,b) et LMDZ (c,d).

La reconstitution de la fréquence des épisodes de neige collante dans les simulations de contrôle est assez réaliste (voir Annexe D). La figure 16 montre le nombre d'épisodes pour la référence et le scénario A2 avec les deux modèles. ARPEGE montre que les zones à risque se restreignent et que la fréquence d'occurrence de conditions météorologiques favorables à ces épisodes diminue dans chaque zone (ce qui est également vrai pour LMDZ mais pour une seule zone, sa résolution étant trop large pour décrire correctement les autres zones). Les résultats sur les cumuls moyens de précipitations ne donnent pas de résultats convergents suivant les simulations, si bien qu'il est difficile de juger si l'intensité des épisodes risque de varier.

b) charge de neige sur les bâtiments

Parmi les 129 postes d'observations de hauteur de neige au sol, 125 sont considérés comme des postes en plaine. La distribution spatiale des charges de neige de référence au sol ayant une période de retour 50 ans montre des valeurs variant de 20 kg/m² à 100 kg/m². La carte des différences de charge de neige extrême avec ARPEGE (fig. 17) présente des valeurs négatives sur toute la France. Ces valeurs sont d'autant plus fortes que la charge calculée avec les observations actuelles est importante. Ce résultat montre que, sous l'hypothèse d'un scénario A2 les charges extrêmes de neige au sol seraient fortement diminuées et que les différenciations régionales seraient atténuées.

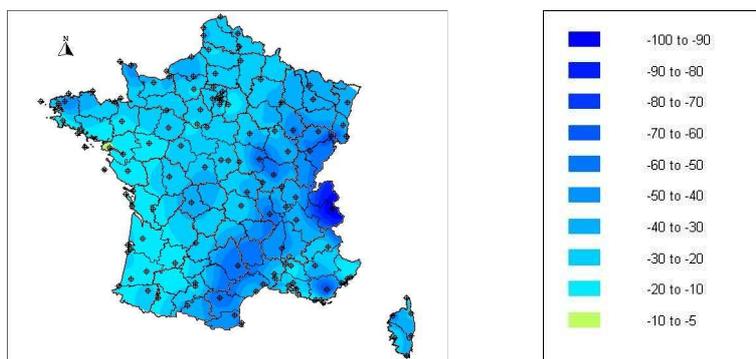


Figure 17: Différence de charge de neige extrême entre scénario et contrôle pour ARPEGE

c) vent reconstitué par le champ de grande échelle

Grâce à la technique d'ajustement linéaire du vent local par les prédicteurs de grande échelle, on peut

reconstituer statistiquement un champ de vent sur la France à partir des simulations du modèle en meilleur accord avec les observations que le vent à 10 m calculé par le modèle. La phase de validation de la méthode est abondamment décrite dans l'Annexe D. En supposant que la relation statistique reste valable dans le scénario, on calcule des valeurs de retour cinquantennales (selon une méthode à seuil) pour les modules de vent dans les diverses simulations. La différence entre le scénario et la référence est montrée fig. 18.

Les scénarios d'ARPEGE comme ceux de LMDZ indiquent une diminution des niveaux de retour de vent sur le pourtour méditerranéen et une faible augmentation ailleurs en France, avec une intensité dont la significativité statistique n'a pas pu être établie. On note en outre un accroissement de la variance du vent à 850 hPa entre le scénario et la référence dans les simulations.

d) vent reconstitué à partir des trajectoires de perturbations

Il s'agit ici aussi d'une régression linéaire multiple, mais les prédicteurs sont constitués à partir d'une méthode de suivi des perturbations au lieu d'utiliser les structures de grande échelle du vent en altitude. Cette méthode permet d'analyser également l'impact du changement climatique sur le nombre de perturbations sur l'Atlantique Nord. Le nombre de perturbations est sous-estimé par ARPEGE et plus encore par LMDZ par rapport aux réanalyses ERA15. Ce nombre diminue légèrement au sud du Groenland dans les scénarios A2 (voir Annexe E).

La fig. 19 montre les différences entre le scénario et le contrôle pour les deux modèles en ce qui concerne le module du vent extrême. Ces différences sont faibles, quand on considère que la climatologie de ce paramètre varie de 15 à 30 m/s (d'après l'adaptation statistique des réanalyses). Pour ARPEGE, on trouve des points communs avec la fig. 18, en ce qui concerne l'augmentation au nord et la diminution au sud. Avec LMDZ, on retrouve la diminution en zone méditerranéenne et l'augmentation en Bretagne, mais certains désaccords apparaissent. La faiblesse de la réponse, son manque de robustesse statistique et les différences entre les deux modèles incitent à la prudence avant de parler d'impact significatif sur le vent.

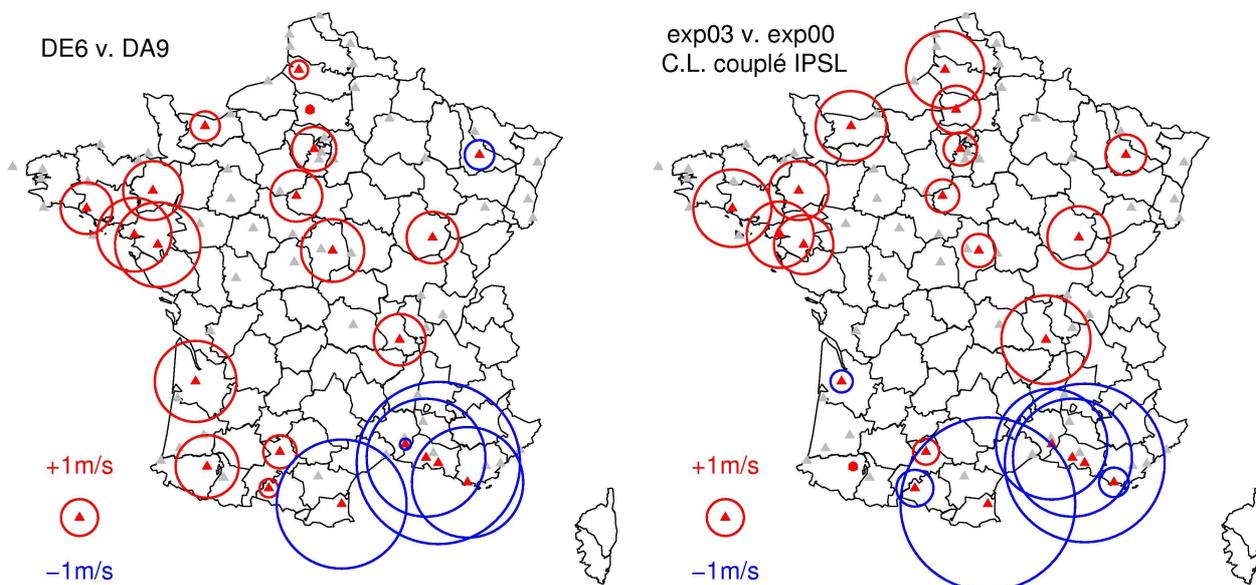


Figure 18: Méthode des prédicteurs de grande échelle : différence de modules du vent (rayon du cercle) entre scénario et contrôle; les cercles rouges (resp. bleus) correspondent à des différences positives (resp. négatives); ARPEGE (à gauche) et LMDZ (à droite)

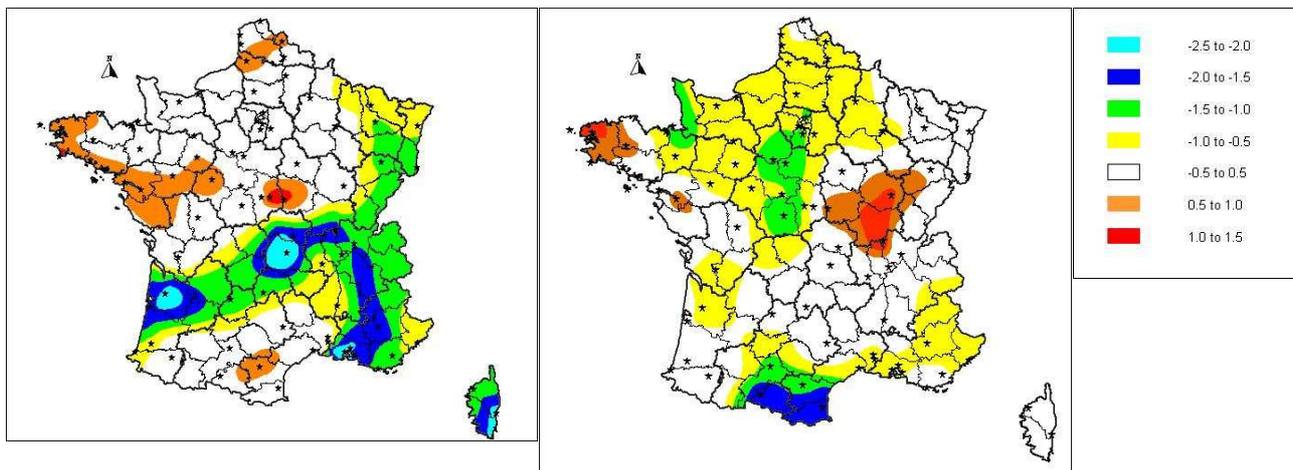


Figure 19: Méthode des trajectoires : différence de modules du vent entre scénario et contrôle calculés à partir des trajectoires de perturbation; ARPEGE (à gauche) et LMDZ (à droite)

4.10 V4.T3: coulées de débris

Cette tâche consiste à calculer l'impact sur les coulées de débris (df) par adaptation statistique. On trouvera à l'Annexe F une présentation plus détaillée des résultats.

La première partie de l'étude consiste en une analyse climatique des séries quotidiennes dans le massif des Écrins. L'analyse a porté sur 7 stations pour lesquelles on dispose d'observations quotidiennes depuis une quarantaine d'années mais qui ne sont pas homogénéisées. On constate que seules les stations de St Christophe et Névache présentent une variations significative des précipitations en terme d'intensité depuis 1961. En revanche la fréquence des df a augmenté de manière significative pour toutes les stations sauf Corps.

La deuxième partie de l'étude consiste en une modélisation du fonctionnement des df dans le massif des Écrins sur la période 1953-2004.

a) construction d'un modèle statistique pour les débris granitiques

Différentes variables géomorphologiques ont été testées. Il ressort de l'analyse que la probabilité de déclenchement d'un df dans le massif des Écrins depuis les années 1950 est fonction de deux paramètres : l'altitude de la paroi (A) et sa hauteur (h).

$$\text{Logit}(p_i) = a_i + (0.00248 A) + (0.0993 h)$$

avec les termes constants suivants: $a_i = -5.3760$ pour p_0 , $a_i = -8.0336$ pour p_1 , et $a_i = -9.6430$ pour p_2

Nous avons cherché à déterminer l'impact des variables climatiques sur le déclenchement des df . Les variables indépendantes testées étaient la température et les précipitations moyennes annuelles, les températures et les précipitations moyennes saisonnières, et le nombre de jours de gel cumulé depuis le dernier événement. L'analyse est fondée sur 76 df dont le premier déclenchement est postérieur à 1961.

Une régression logistique binaire a été effectuée au pas de temps annuel en codant 0 les années sans déclenchement et 1 les années avec déclenchement. Les variables qui donnent le meilleur résultat sont le nombre de jours de gel cumulés depuis le dernier événement (N_f) et le nombre de jours au cours desquels les précipitations sont supérieures à 30 mm entre le 15 juin et le 15 octobre ($N_{r>30}$). Le modèle est :

$$\text{Logit}(p_f) = -4.7236 + (0.388 N_f) + (0.5717 N_{r>30})$$

Le pourcentage de prédictions correctes égal à 78%.

b) construction d'un modèle statistique pour les débris sédimentaires

Une seconde analyse a été conduite dans les roches sédimentaires afin de tester le rôle de la lithologie sur la dynamique de ce processus. Les variables indépendantes qui ont donné le meilleur modèle sont le nombre de jours de gel (N_f) depuis le dernier événement à St Christophe en Oisans (d'autres stations ont été testées mais c'est avec celles de St Christophe que les résultats sont les meilleurs), le nombre de jours de précipitations supérieures à 30 mm entre le 15 juin et le 15 octobre ($N_{r>30}$) et le pendage des couches (LI en °). Le modèle peut être exprimé de la manière suivante :

$$\text{Logit}(p_1) = -7.701 + (1.419 LI) + (0.101 N_f) + (0.901 N_{r>30})$$

Le pourcentage de prédictions correctes est de 89%.

c) construction d'un modèle statistique pour les débris glaciaires

Le second grand type de df sélectionné dans cette étude correspond aux cas pour lesquels le stock de débris est constitué par des dépôts morainiques. Sur la période de référence la dynamique de ce type de df est différente. Alors que dans les cas précédents une diminution du nombre de df avait été observée, quelle que soit la lithologie prise en compte, on constate ici que le nombre a augmenté, dans ce cas, de manière significative depuis les années 1980.

Le meilleur modèle est obtenu en prenant en compte la présence d'une faille géologique (Fau) dans l'axe de l'écoulement des df , le nombre de jours au cours desquels les précipitations dépassent 35 mm entre le 15 juin et le 15 octobre ($N_{r>35}$) à St Christophe. Un modèle significatif a été obtenu en prenant en compte les précipitations supérieures à 30 mm/j mais avec des valeurs pour les estimateurs plus faibles que le précédent modèle. Signalons également que des résultats similaires ont été observés en changeant de station (Monétier ou Embrun). Le modèle est de la forme suivante :

$$\text{Logit}(p_1) = -3.926 + (1.471 N_{r>35}) + (0.503 Fau)$$

Le pourcentage de prédictions correctes égal à 86%.

d) probabilités de déclenchement observées et simulées

Nous avons retenu sept points de la grille ARPEGE et un point de la grille LMDZ. Afin de tester les impacts de la variabilité climatique actuelle simulée sur les modèles statistiques développés plus haut, nous avons remplacé les variables climatiques actuelles observées par celles issues des sorties d'ARPEGE (simulations DA9, DE3 et DE4) et réalisé de nouvelles analyses logistiques. Des tests de Student ont été ensuite réalisés entre ces différents modèles logistiques. Les résultats montrent que des variations existent entre les modèles obtenus à partir des différentes simulations actuelles ou entre les simulations actuelles et les observations mais elles ne sont jamais significatives quelque soit la lithologie prise en compte. Les séries météorologiques produites à partir du modèle LMDZ montrent également la même tendance caractérisée par une absence de variation significative entre les probabilités de déclenchement produites à partir des séries météorologiques actuelles observées et celles issues des séries météorologiques simulées.

e) probabilités de déclenchement dans le changement climatique

L'une des questions essentielles concernant les impacts du changement climatique futur est de savoir si la fréquence de ce processus va augmenter de manière significative au siècle prochain. Nos analyses préparatoires sur cette question ont montré très rapidement que les probabilités de déclenchement étaient attachées d'une très forte variabilité spatiale. C'est donc cet axe qui a été choisi pour structurer la présentation des résultats. La dynamique des df variant selon la nature des sédiments mobilisés (glaciaire ou non) cette variable ainsi que la lithologie ont été pris en compte dans l'estimation des probabilités de leurs déclenchements à l'horizon 2100.

Le cas des df non glaciaires apparaît être le plus simple. Les probabilités ont été estimées en remplaçant le nombre de jours de gel actuel utilisés dans les modèles réalisés à partir des données météorologiques actuelles simulées par ceux prévus pour le siècle prochain (la variable précipitation intense ne montrant pas

de variation significative pour le siècle prochain). Ce nombre de jours de gel variant selon les expériences et les points, des estimations ont été réalisées pour chaque cas. Suivant les points de grille, on obtient une diminution des probabilités de déclenchement comprise entre 21 et 31%. A partir des sorties du modèle LMDZ les résultats obtenus sont assez similaires. Les diminutions de probabilités de déclenchement entre l'actuel simulé et le futur simulé sont comprises entre 19% et 27%.

L'estimation des variations de probabilité de déclenchement pour les *df* glaciaires est plus délicate car moins directe (Haerberli et al., 1993 ; Haerberli et Beniston, 1998). La probabilité de déclenchement de ces *df* dépendant du retrait glaciaire, nous avons été contraints d'utiliser plusieurs indices. Dans un premier temps un indice d'activité des *df* glaciaires a été déterminé dans le massif. Il correspond au nombre de *df* observés dans le massif par tranche de 10 ans en fonction de la taille et de la forme des glaciers (glacier suspendu, glacier de vallée). Cet indice a été relié aux fluctuations de la *equilibrium line altitude* (ELA) calculée pour chaque période et pour chacun des glaciers, ce calcul permettant de relier l'activité des *df* au retrait glaciaire. Grâce au calcul de l'évolution des températures une future altitude de la ELA a été estimée pour l'horizon 2100 en utilisant un gradient de 6 K/km. La ELA moyenne sur la période actuelle correspond à l'isotherme -1° ou -2° environ et se situe donc vers 2600-2800 m. Cette ELA remonterait de plus de 400 m et se situerait vers 3200 m en 2100 sans que l'on puisse déceler de variations significatives entre les deux modèles ARPEGE et LMDZ. Cette remontée en altitude de la ELA traduit un retrait glaciaire important qui libère des matériaux susceptibles d'être repris en charge par des *df*. La fig. 20 montre une augmentation faible mais significative de la probabilité de déclenchement pour ce type de *df* (ARPEGE). Cette augmentation est peu marquée dans le cas des *df* liés au retrait de petits glaciers car on considère que certains de ces petits glaciers ont déjà atteint vers 2080 une taille critique ne permettant plus de libérer suffisamment de matériel.

Figure 20: Probabilité de déclenchement des *df* glaciaires (point 42) en fonction du nombre de jours de précipitations supérieures à 30 mm; à gauche petits glaciers, à droite grands glaciers ; bleu = référence, rouge = scénario.

4.11 V5.T1: analyse des régimes de temps

a) analyse en régimes de temps pour les observations ERA40

Selon les tests sur le géopotential à 500 hPa, on trouve des classifications significatives pour 4 et 8 régimes de temps. Les régimes pour N=4 ont été identifiés comme ceux trouvés et décrits par Vautard (1990) et Michelangeli et al. (1995). Ces régimes (voir fig. 3) sont donc nommés par la suite selon les noms utilisés dans les études antérieures : GA (anticyclone Groenlandais), AR (dorsale Atlantique), BL (blocage) et ZO (zonal). La table 10 résume les fréquences relatives d'occurrence pour les 4 régimes de temps et la persistance moyenne en jour. Ces chiffres ont été calculés après l'élimination des jours de transition, qui correspondent approximativement à 25% des jours. Les cartes associées aux régimes sont présentées dans l'Annexe G. En hiver le régime zonal est le régime dominant. Les régimes pour N=8 sont utilisés à la section 4.12. Pour la période d'été, on a trouvé que le nombre optimal de classes est 4. Selon la littérature, aucune classification pour l'été n'avait été faite avant de cette étude. Les régimes de temps identifiés sont les mêmes que pour le cas de l'hiver.

Table 10 : Fréquences relatives (%) des 4 régimes de temps et persistance moyenne (jours) pour chaque régime dans ERA40, sans compter les jours de transition.

	<i>hiver</i>		<i>été</i>	
	<i>Fréquence</i>	<i>Persistance</i>	<i>Fréquence</i>	<i>Persistance</i>
<i>Anticyclone Groenlandais (GA)</i>	16	7	11	7
<i>Dorsale Atlantique (AR)</i>	16	6	15	6
<i>Blocage (BL)</i>	17	6	14	6
<i>Zonal (ZO)</i>	22	8	12	7

b) analyse en régimes de temps pour les simulations ARPEGE

L'analyse en régime de temps a été effectuée pour les six simulations du modèle ARPEGE. Trois d'entre elles représentent le climat présent et elles correspondent à la période 1960-1999, les trois autres représentent le scénario et couvrent la période 2070-2099. Les résultats de la projection des données du Z500 du modèle sur les noyaux des régimes de temps d'ERA40 montrent que, pour certains régimes, il y a un changement des fréquences relatives qui n'est pas négligeable. La table 11 montre les fréquences dans le climat présent simulé et dans le scénario A2. On constate une diminution des deux premiers régimes au profit des deux derniers. C'est en été que l'impact sur les fréquences de régime est le plus spectaculaire.

Table 11: Fréquences relatives (%) des 4 régimes de temps avec les simulations d'ARPEGE.

	<i>hiver</i>		<i>été</i>	
	<i>Contrôle</i>	<i>Scénario</i>	<i>Contrôle</i>	<i>Scénario</i>
GA	28	8	27	3
AR	24	18	26	4
BL	21	35	21	70
ZO	27	39	26	23

c) régime et climat local

Afin de relier un régime de temps au climat sur la France, les données SQR de température maximum et minimum et de précipitations ont été considérées jour par jour par rapport à l'occurrence de trois types d'événements extrêmes: deux pour l'hiver (jours très froids, jours de précipitations intenses) et un pour l'été (jours très chauds).

Jours très froids en hiver : On observe une augmentation du risque de grand froid lorsque les régimes GA et BL sont activés. L'influence de ces régimes est très claire surtout dans le nord de la France, et elle est plus importante dans le cas de GA où le changement relatif atteint 80%. En revanche, le régime ZO est associé aux températures douces et à une diminution de la probabilité d'apparition des jours froids. Le changement relatif se traduit par une diminution de moitié quasiment dans tout le pays.

Jours de précipitations intenses en hiver : Pour le cas des précipitations, l'influence des régimes de grande échelle est plus difficile à déterminer. En général, le régime GA est associé à une augmentation du risque des fortes précipitations dans une grande partie du pays. Le régime ZO influence légèrement le nord du pays, plus exposé au passage des systèmes dépressionnaires atlantiques. Il y a une claire diminution du risque pour les régimes BL et AR, sauf en Languedoc-Roussillon, où la circulation caractéristique du BL favorise l'entrée d'air maritime sur cette région, provoquant d'intenses précipitations.

Jours très chauds en été : Il y a deux régimes où la probabilité d'avoir de fortes températures en été augmente : le régime BL et le régime ZO. L'influence de BL est très palpable sur le nord de la France, où la probabilité peut doubler par rapport à la normale. Le régime ZO, par contre, favorise les jours chauds dans la moitié est du pays. Les régimes GA et AR sont associés à des situations plus modérées en été.

L'Annexe G montre pour chaque régime et chaque type d'extrême la carte du changement de probabilité par rapport à la distribution climatologique. Compte tenu de la table 11, on peut pronostiquer les impacts suivants:

Jours très froids en hiver : diminution générale du risque de grand froid en France, provoquée par une diminution des fréquences relatives de régimes GA et BL et une augmentation du régime ZO.

Jours de précipitations intenses en hiver : diminution importante dans le sud de la France, motivée par

l'effondrement de GA et l'augmentation de BL. La diminution des précipitations intenses est moins évidente dans le nord, en raison de l'augmentation de ZO. Par contre le risque pourrait augmenter en Languedoc-Roussillon, dû à la hausse des situations de blocage.

Jours très chauds en été : forte augmentation du risque, généralisé à tout le pays mais plus accentuée dans le nord, à cause des modifications des occurrences des régimes BL et ZO.

Ces résultats sont conformes à ceux de l'approche directe, et les deux méthodes se confortent mutuellement. Cet accord n'est bien sûr pas une mesure de la confiance à donner au modèle ARPEGE, mais à sa façon de l'utiliser.

Nous avons également évalué la liaison inverse entre extrême et régime. Pour cela, on ne classe que les Z500 associés à des jours d'occurrence d'un extrême à un endroit donné. Plusieurs classifications ont été réalisées avec différentes régions de la France et différents types d'extrêmes. Les résultats montrent que la circulation de grande échelle, résultat de la classification sur uniquement les jours d'extrêmes, coïncide avec un des régimes de temps classiques (GA, AR, ZO, BL) dans le cas de la température, mais pas pour les précipitations.

Nous avons réalisé la classification des jours de précipitations extrêmes sur la façade Atlantique de la France. On obtient un seul régime de grande échelle. Ce régime de temps est caractérisé par une anomalie négative située sur les Iles Britanniques, qui provoque l'advection d'air humide provenant de l'océan sur la France. Le pouvoir discriminant (voir Annexe G) de ce régime est beaucoup plus fort que ceux des quatre régimes préférentiels de l'atmosphère, indiquant qu'il s'agit d'une situation vraiment associée au risque d'extrêmes sur cette région. On montre que ce régime de grande échelle correspond à la transition de ZO à GA.

Il en résulte que le risque des épisodes extrêmes de température (jours très chauds ou très froids) est en général lié aux régimes de temps classiques et à leur persistance ; en revanche, pour les précipitations extrêmes, il peut y avoir des états peu probables de l'atmosphère responsables de l'apparition de telles situations.

4.12 V5.T2: régimes et tempêtes

Les algorithmes automatiques d'identification et de suivi de perturbations produisent un grand nombre de trajectoires. L'analyse en régimes de temps offre une capacité de tri qui permet de relier régime et événements d'échelle inférieure comme « forte probabilité de tempête » ou « aucun risque de tempête ».

Pour illustrer ce point, la fig. 21 montre les densités de trajectoires obtenues pour 2 des 8 régimes d'hiver, zonal et blocage. Dans la partie est du bassin Atlantique, on observe une forte réorientation des dépressions vers le nord en passant du zonal au blocage. De ce fait, l'Europe du nord-ouest avec la France, très exposée en présence du régime zonal, ne l'est plus guère en régime bloqué. Cette remarque qualitative peut en fait être rendue quantitative: pour chaque domaine d'intérêt, une relation entre nombre de cas par classe d'amplitude et durée totale de présence des régimes par saison peut être établie et exploitée, caractérisant l'exposition au risque de chaque domaine, et cela pour divers paramètres (voir Annexe H).

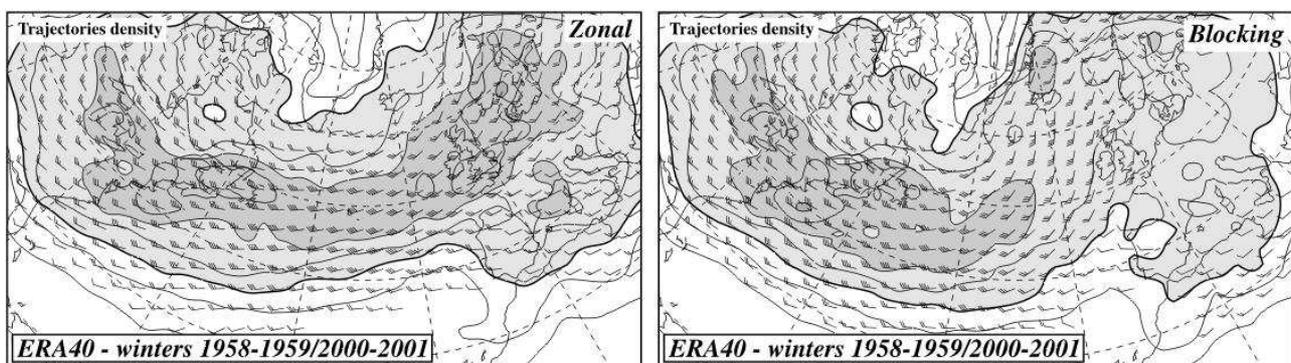
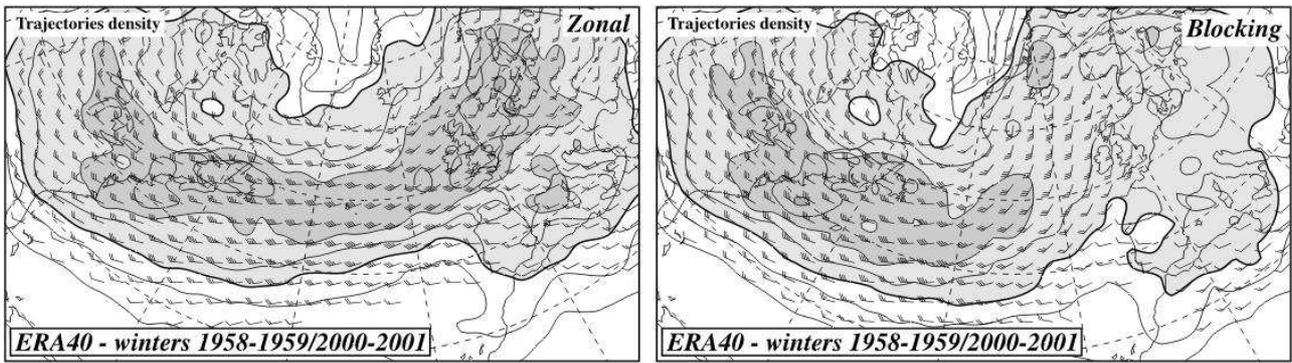


Figure 21: Nombre de trajectoires par régime et par mois pour les régimes ZO et BL. Intervalle 1,5 trajectoires par mois, référence (en gras) 6 trajectoires par mois. Les symboles indiquent la vitesse



moyenne de déplacement des dépressions (code OMM).

On peut donc appliquer la même méthode que dans la section 4.11, en associant une distribution de vent à chacun des 8 régimes. On calcule des vents composites à 1500 m pour des domaines nord et sud de la France (élargis à une partie de l'Angleterre et de l'Espagne respectivement). Compte tenu de l'étendue du système météorologique associé à chaque tempête, cela n'a pas beaucoup de sens de raffiner plus l'échelle spatiale avec cette méthodologie. Les méthodes point par point de la section 4.9 sont plus fines spatialement, mais font l'impasse sur la cohérence spatio-temporelle des phénomènes. Les figs. 22 et 23 montrent les distributions associées aux régimes.

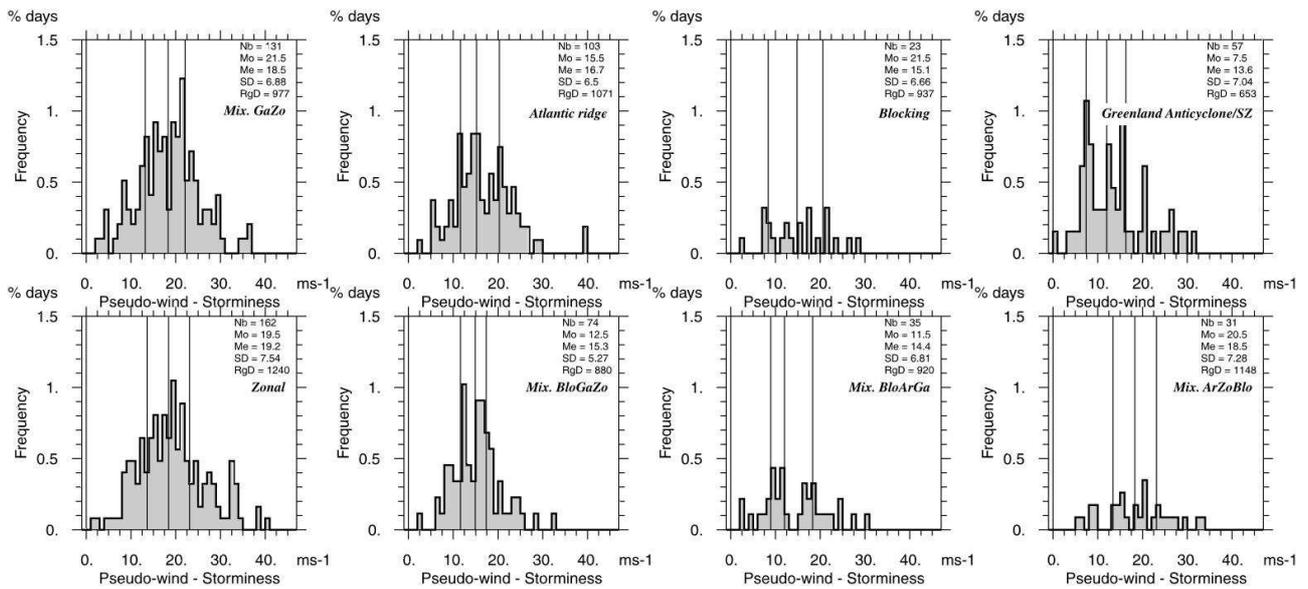


Figure 22: Distributions du vent à 1500 m composite (associant en une seule variable intensité propre et vitesse de déplacement) pour le domaine nord et pour chacun des 8 régimes d'hiver.

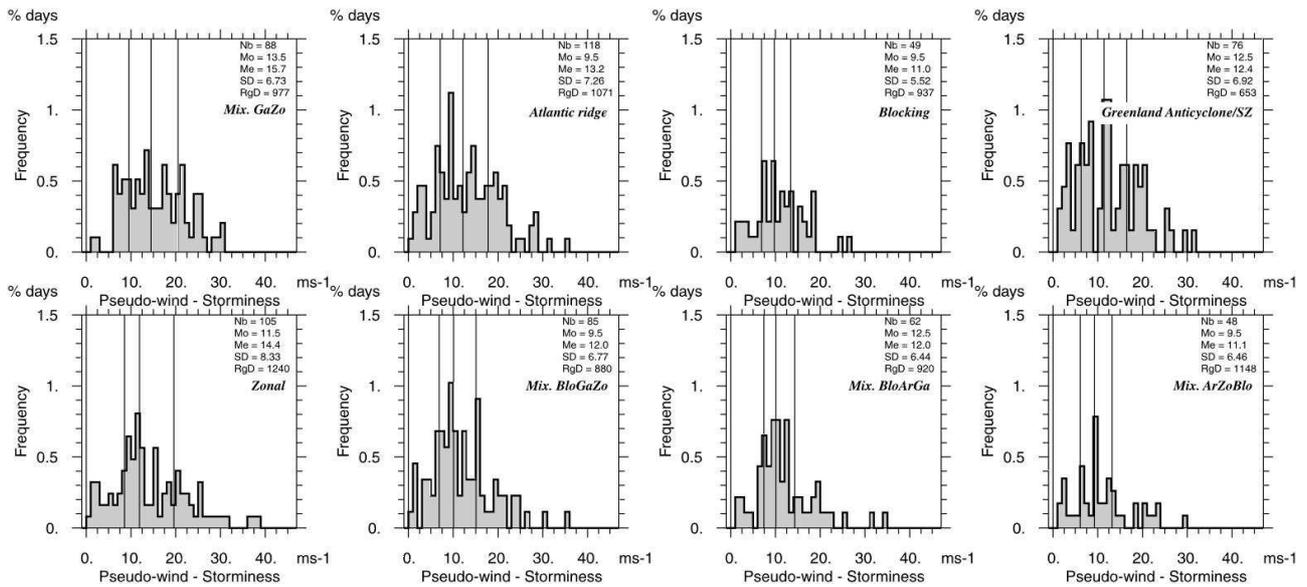


Figure 23: Idem fig. 22 pour le domaine sud.

Compte tenu de l'évolution des fréquences de régime dans le scénario A2, on peut alors calculer des caractéristiques des tempêtes pour les deux domaines dans la référence et dans le scénario. Le nombre de tempêtes par saison froide recalculé par les fréquences de régimes est de 15,1 sur le nord et de 16,7 sur le sud pour le climat présent. Pour le scénario, on passe à 17,8 et 13,6 respectivement. Les figs. 24 et 25 montrent que sur le domaine nord les vents forts sont un peu plus fréquents. L'effet est systématique sur tout le spectre, pourtant on est largement à l'intérieur des barres d'erreur: les lignes fines grises donnent une idée de la variabilité interannuelle possible d'après celle observée dans ERA40 pour la repartition prévue des jours de régime pour la saison type dans le scénario. Pour le domaine sud, la tendance est moins nette et serait plutôt à la diminution. L'Annexe H fournit plus de détails sur la justification de la méthodologie et divers aspects des résultats. On notera que, malgré leur faible robustesse statistique, ces résultats corroborent ceux des méthodes de la section 4.9. Gardons à l'esprit qu'il s'agit de la même simulation numérique et que seules changent les méthodes de diagnostic.

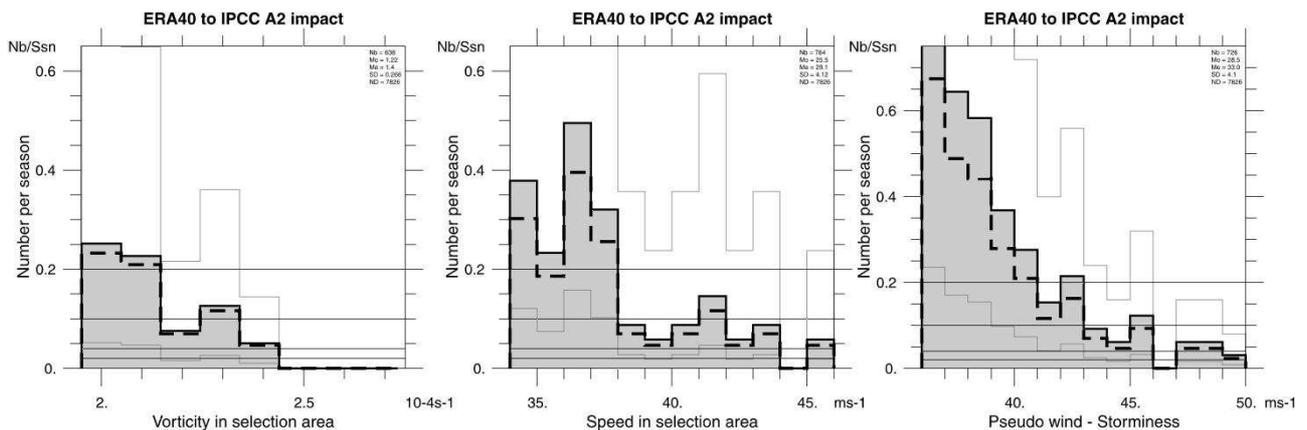


Figure 24: Focalisation sur la partie extrême des distributions du scénario (histogramme grisé) pour le domaine nord. L'histogramme tiré correspond à ERA40. Les quatre lignes horizontales correspondent, de haut en bas, aux durées de retour de 5 ans, 10 ans, 25 ans et 50 ans. De gauche à droite: amplitude du tourbillon au centre, vitesse de déplacement et combinaison des deux sous la forme d'un pseudo-vent à 1500 m (proche des rafales maximales près de la surface).

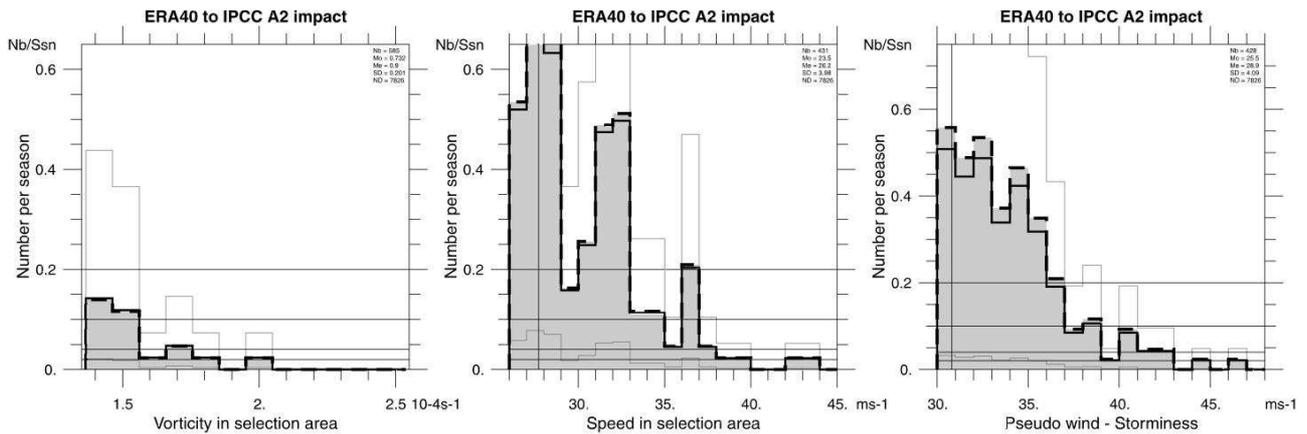


Figure 25: Idem fig. 24 pour le domaine sud.

5 Conclusions

La réponse des modèles pour les phénomènes extrêmes étudiés dans IMFREX est la suivante:

- En ce qui concerne les températures, l'augmentation de la fréquence, de la durée, et de l'intensité des vagues de chaleur estivales est le trait dominant du changement climatique. Les vagues de froid disparaissent pratiquement du paysage à la fin du 21^{ème} siècle.
- Les fortes précipitations hivernales sont en augmentation dans une grande moitié nord du pays. Associées à une fonte précoce de la neige, les crues lentes d'hiver et de printemps sont en augmentation. Mais l'impact majeur sur le cycle hydrologique est l'augmentation des sécheresses estivales et automnales, surtout dans le sud.
- En ce qui concerne les vents et tempêtes, on peut s'attendre à une faible augmentation des fréquences de vent fort sur la moitié nord, et pas d'impact ou un impact faiblement négatif sur le sud. Les cyclones tropicaux Atlantiques sont en légère diminution (en nombre) sur le golfe du Mexique. Sur la zone ouest-Atlantique la réponse semble dépendre du type de scénario. Dans tous les cas de figure, les pluies associées aux cyclones sont en augmentation.
- La réponse des coulées de débris est une diminution en nombre pour les coulées d'origine non-glaciaire, une augmentation du même ordre de grandeur des coulées issues de glaciers. Les épisodes de neige collante sont en diminution en nombre, mais pas nécessairement en intensité. La charge de neige sur les bâtiments en plaine diminue fortement.

Nous n'avons pas traité ici de toutes les calamités possibles et certaines de celles qui ont été traitées nécessitent d'être l'objet d'études ultérieures. Le cas des vents forts, aussi bien dans les tempêtes que dans les cyclones est un sujet sur lequel de fortes incertitudes demeurent, du fait de la réponse de faible ampleur des modèles. L'introduction d'une paramétrisation de rafales dans la dernière version d'ARPEGE permettra d'étudier ce phénomène sans avoir recours à des méthodes indirectes, complétant ainsi l'arsenal mis en place dans IMFREX. Les simulations à maille 20 km avec ALADIN qui seront réalisées dans le projet européen ENSEMBLES nous apporteront une meilleure lumière sur le sujet. La partie tempête et cyclones n'a pas pu être abordée avec LMDZ, en partie à cause de la résolution horizontale de ce dernier. Les futures simulations à haute résolution de l'IPSL pourront être l'occasion de confirmer ou d'infirmer nos résultats. On peut mentionner que les simulations régionales du projet européen PRUDENCE ont mis en avant une légère augmentation des vents forts en mer du Nord. En ce qui concerne le nombre de cyclones atteignant la côte est des USA, il reste une interrogation à l'issue d'IMFREX. De nouvelles simulations en cours vont rapidement nous aider à trancher sur la cause des désaccords.

Un phénomène qui n'a pas été abordé ici est le cas des phénomènes cévenols. L'analyse des observations

passées, et la réponse des modèles à résolution supérieure à 50 km n'indiquent pas d'augmentation visible. Cependant la taille des phénomènes nous incite à une réserve qui devrait être levée dans le projet CYPRIM. Dans ce projet, le modèle à petite échelle Méso-NH sera couplé à ARPEGE pour réaliser des scénarios.

La question des crues lentes a été abordée de façon sommaire dans notre projet, à travers le concept de débit potentiel. Une collaboration avec des hydrologues dans des projets à venir (entre autres dans CYPRIM) nous permettra d'aller plus loin dans une approche quantitative.

Un autre aspect des extrêmes non traité dans le présent rapport est leur évolution chronologique au cours du 21ème siècle. Compte tenu à la fois de la marge d'incertitude statistique et de la présence de fluctuations naturelles imprévisibles, nous nous sommes cantonnés aux trente dernières années du siècle, pour lesquelles le signal de la réponse anthropique l'emporte largement sur le bruit des fluctuations d'échantillon. Pour aller au-delà de l'extrapolation des tendances observées (section 4.8), deux méthodes ont été explorées. La première, par l'IPSL, consiste à réaliser des simulations autour de 2050 en utilisant plusieurs hypothèses de TSM pour neutraliser l'effet des fluctuations décennales. La deuxième, par Météo-France, consiste à calculer par une méthode factorielle un indice maximisant la variabilité basse fréquence par rapport à la variabilité interannuelle, ce pour chaque variable indépendamment. Ces indices chronologiques peuvent servir à moduler décennie par décennie les réponses mises en évidence pour la période 2070-2099, au moins en température et précipitations. Ils ont été utilisés dans IMFREX pour réaliser des visualisations animées sur le site web du projet.

6 Références

- Ayrault, F., 1998: Environnement, structure et évolution des dépression météorologiques : réalité climatologique et modèles types. Doctorat de l'Université P. Sabatier, Toulouse. 328 pp.
- Christensen J.H., J. Räisänen, T. Iversen, D. Bjørge, O.B. Christensen, and M. Rummukainen, 2001: A synthesis of regional climate change simulations - A Scandinavian perspective. *Geophys Res Lett*, 28, 1003-1006.
- Christensen, J.H., T.R. Carter and F. Giorgi, 2002: PRUDENCE employs new methods to assess European climate change, *E.O.S.* 83, 147.
- Cubasch, U., J. Waszkewitz, G. Hegerl, and J. Perlwitz, 1995: Regional climate changes as simulated in time-slice experiments. *Clim Change*, 31, 273-304.
- Déqué, M. and J.P. Piedelievre, 1995: High resolution climate simulation over Europe. *Climate Dynamics*, 11, 321-339.
- Déqué, M., P. Marquet and R. Jones, 1998: Simulation of climate change over Europe using a global variable resolution general circulation model. *Climate Dynamics*, 14, 173-189.
- Déqué, M., D.P. Rowell, D. Lüthi, F. Giorgi, J. H. Christensen, B. Rockel, D. Jacob, E. Kjellström, M. de Castro and B. van den Hurk, 2005: An intercomparison of regional climate simulations for Europe: assessing uncertainties in model projections. Submitted to *Climatic Change*.
- Easterling, D.R., G.A. Meehl, C. Parmesan, S.A. Changnon, T.R. Karl and L.O. Mearns, 2000: Climate extremes: observations, modeling, and impacts, *Science*, 289, 2068-2074.
- Frei, C., and C. Schär, 2001. Detection probability of trends in rare events: theory and application to heavy precipitation in the alpine region. *J. Climate*, 14, 1568-1584.
- Frich, P, L.V. Alexander, P. Delta-Marta, B. Gleason, M. Haylock, A.M.G. Klein Tank and T. Peterson, , 2002, Observed coherent change in climatic extremes during the second half of the twentieth century, *Climate Research*, Vol 19, 193-212.
- Gibelin, A.L. and M. Déqué, 2003: Anthropogenic climate change over the Mediterranean region simulated by a global variable resolution model. *Climate Dynamics*, 20, 327-339.
- GIEC, 2001: *Climate Change, The scientific basis*. Cambridge Univ. Press, 881 pp.
- Gray, W.M., 1975: *Tropical Cyclone Genesis*, Dept. of Atmospheric Science Paper, No. 234, Colorado State University, Fort Collins, CO, 121 pp.
- Haerberli, W., C. Guodong, A.P. Gorbunov and S.A. Harris, 1993: Mountain permafrost and climatic change. *Permafrost and Periglacial Processes* 4, 165-174.
- Haerberli, W. and M. Beniston, 1998: Climate change and its impacts on glaciers and permafrost in the Alps. *Ambio* 27, 258-265.
- Hodges K.I., 1998: Feature point detection using distance transform: application to tracking tropical convective complexes. *Mon. Wea. Rev.*, 126, 785-795.
- Jones, R.G., J.M. Murphy, M. Noguer, and A.B. Keen, 1997: Simulation of climate change over Europe using a nested regional-climate model. Part II: Comparison of driving and regional model responses to a doubling of carbon dioxide. *Q.J.R. Meteorol Soc* 123:265-292.
- Klein Tank, A.M.G., G.P. Kömen and F.M. Selten, 2004: Signals of anthropogenic influence on European warming as

seen in the trend patterns of daily temperature variance. *Int. J. Climate*, 16, 3665-3680.

- Li, Z.X., 1999: Ensemble atmospheric GCM simulation of climate interannual variability from 1979 to 1994. *J. of Climate*, 12, 986-1001
- Michelangeli, P.A., R. Vautard, and B. Legras, 1995: Weather regimes : recurrence and quasi-stationarity. *J. Atmos. Sci.*, 52, 1237-1256.
- Mitchell, T.D., T.R. Carter, P.D. Jones, M. Hulme and M. New, 2005: A comprehensive set of high-resolution grids of monthly climate for Europe and the globe: the observed record (1901-2000) and 16 scenarios (2001-2100). *Journal of Climate* (in press).
- Moisselin, J.-M., M. Schneider, C. Canellas et O. Mestre, 2002: Changements Climatiques en France au 20ème siècle. Étude des longues séries de données homogénéisées françaises de précipitations et températures, *La Météorologie*, 38, 45-56.
- Oki, T. and Y. Sud, 1998 : Design of the global river channel network for Total Runoff Integrating Pathways (TRIP). *Earth Interactions*, 2.
- Royer J.F., D. Cariolle, F. Chauvin, M. Déqué, H. Douville, R.M. Hu, S. Planton, A. Rascol, J.L. Ricard, D. Salas y Mélia, F. Sevault, P. Simon, S. Somot, S. Tyteca, L. Terray et S. Valcke, 2002: Simulation des changements climatiques au cours du 21-ème siècle incluant l'ozone stratosphérique. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Série IIa - Géosciences* 334 (3), 147-154.
- Uppala, S., J.K. Gibson, M. Fiorino, A. Hernandez, P. Kallberg, X. Li, K. Onogi and S. Saarinen, 2000: ECMWF Second Generation reanalysis--ERA40, Proc. Second WCRP Int. Conf. of Reanalysis, Wokefield park, United Kingdom, WMO, 9-13.
- Vautard, R., 1990: Multiple weather regimes over the North Atlantic: analysis of precursors and successors. *Mon. Wea. Rev.*, 118, 2056-2081.

7 Valorisation

Les résultats d'IMFRET sont organisés sur la page <http://www.medias.cnrs.fr/imfret/>. On y trouve les documents issus de travaux des équipes et les présentations faites lors des quatre réunions du projet. Tout est au format html pour une consultation en ligne. On peut également y télécharger des documents imprimables au format pdf. Les travaux du projet IMFRET sont en outre mentionnés dans les articles, rapports, ou conférences listés ci-dessous:

- Déqué, M., 2003. Température et précipitations extrêmes sur la France dans un scénario de changement climatique. Colloque de l'Association Internationale de Climatologie. Varsovie, 11 septembre 2003.
- Déqué, M., 2003. Canicule et modélisation du climat. Rapport rédigé à la demande du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable.
- Déqué, M., 2004. Les scénarios climatiques de réchauffement. Journées de la Mission Changement Climatique et Effet de Serre. Avignon, 22 janvier 2004.
- Déqué, M., 2004. Impact des activités humaines sur le climat. Deuxièmes journées de l'Institut Français de la Biodiversité. Marseille, 25 mai 2004.
- Déqué, M., 2004. Les scénarios régionaux disponibles en France. Réunion ONERC, Paris, 4 novembre 2004.
- Déqué, M., 2004. Regional simulation over Europe with ARPEGE and application to extreme temperatures over

France. Réunion MILMO, Bruxelles, 16 novembre 2004.

Déqué, M., 2004. Image de l'évolution du climat en France au 21^{ème} siècle selon les scénarios CNRM et IPSL. Colloque de valorisation GICC, Paris, 23 novembre 2004.

Déqué, M., 2004. Impact of Climate change on extreme event frequency over France. Workshop on regional climate modelling, Prague, 1 décembre 2004.

Déqué, M., 2005. Les impacts sur le cycle hydrologique en Méditerranée. Réunion MedWater, Paris, 22 mars 2005

Déqué, M., 2005. Modélisations climatiques globales et régionales. Ecole interdisciplinaire sur la recherche en sciences sociales pour l'environnement. Cargese, 13 avril 2005.

Déqué, M., 2005. Temperature and precipitation extremes over France: climate change response with ARPEGE RCM. EGU General Assembly. Vienne, 27 avril 2005.

Douville, H., J.M. Moisselin et J. Noilhan, 2004. Impact des changements climatiques d'origine anthropique sur les eaux continentales. Rapport rédigé à la demande de l'Académie des Sciences.

Jomelli, V., P. Pech, C. Chochillon and D. Brunstein, 2004. Geomorphic variations of debris flows and recent climatic change in the French Alps. *Climatic Change*, 76, 1-26.

Jomelli, V., C. Chochillon, D. Brunstein et P. Pech, 2003. Hillslope debris flows frequency since the beginning of the 20th century in the French Alps. IAHS publication, Rickenmann and Chen (ed), Rotterdam, 127-137.

Jomelli, V., D. Brunstein, D. Grancher and P. Pech, 2005. Is the response of Hill slope debris flows to recent climatic change univocal ? : A case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change*, (soumis)

Jomelli, V., D. Brunstein, D. Grancher, P. Pech, and M. Déqué, 2005. Response of debris flows behaviour to recent and future climatic change. Second international conference of Sediflux-Shifting lands. Clermont-Ferrand, 20 janvier 2005.

Jomelli, V., D. Brunstein, C. Chochillon and P. Pech, 2003. Impacts of recent climatic change on debris flows frequency in the French Alps (Massif des Ecrins). Third international conference on debris flows Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment. Davos, 10 septembre 2003.

Jouan, D., 2004. Impact du changement climatique : évolution de la variabilité de la fréquence et de l'intensité des tempêtes en Europe de l'Ouest, Thèse de doctorat de l'Université de Rennes 2.

Jourdain, S., 2004. Le changement climatique observé en France. Journées de la Mission Changement Climatique et Effet de Serre. Avignon, 22 janvier 2004.

Laurent, C., 2004. Guide méthodologique des programmes informatiques de traitement des extrêmes (en stationnaire et non-stationnaire) : application aux températures. Rapport interne EDF référencé HP-45/04/006/A.

Moisselin, J.M., 2003. Les longues séries de référence pour l'étude des changements climatiques. Ateliers de modélisation de l'atmosphère, Toulouse, 21 novembre 2003.

Moisselin, J.M., 2003. Homogenization and study of long-term French climatological series , World Climate Change Conference, Moscou, 20 octobre 2003.

Moisselin, J.M., 2004. Changement climatique et impact sur la santé, séminaire VIROSEM organisé par BMS/Virologie, Sainte Maxime, 8 mai 2004.

Moisselin, J.M., 2004. Les changements climatiques, Séminaire INSA, Toulouse, 28 janvier 2004.

- Moisselin, J.M., 2004. Climate change studies with reference long-term French climate series, conférence EMS/ECAC, Nice, 27 septembre 2004.
- Moisselin, J.M., 2004. Le changement climatique et son impact sur la santé, Conseil Supérieur de la Météorologie, Paris, 16 novembre 2004.
- Moisselin, J.M., 2004. Long-term reference series of Météo-France, conférence EMS/ECAC, Nice, 30 septembre 2004.
- Parey, S., 2004. Mise à jour des températures extrêmes chaudes pour le parc nucléaire en exploitation en tenant compte du changement climatique. Rapport interne EDF référencé HP-45/04/023A
- Parey, S., 2004. Changement climatique et température extrême chaude pour le projet EPR : résultats des modèles ARPEGE-Climat et LMDZ. Rapport interne EDF référencé HP-45/04/029A
- Parey, S., D. Dacunha-Castelle, C. Laurent and G. Oppenheim, 2005. Trends and climate evolution : statistical approach for very high temperatures in France. Soumis à Climatic Change.
- Sabre, M. and C.Sacré, 2005. Extreme events (wind speeds, snow loads) and construction codes in case of climate change. 4th meeting on Climate Change and the Built environment of the CIB (international Council for research and Innovation in Building and construction W108), Paris, 15 avril 2005.
- Sanchez, E., G. de Coetlogon, A. Joly and L. Terray, 2005. Weather Regimes links with daily temperature and precipitation extremes. Soumis à Climate Dynamics
- Sanchez, E., A. Joly and L. Terray, 2005. Large Scale Atmospheric Dynamics and Local Intense Precipitation Episodes. Soumis à Geophysical Research Letters
- Terray L., M.E. Demory, M. Déqué, G. de Coetlogon and E.Maisonave, 2004. Simulation of late twenty-first century changes in wintertime atmospheric circulation over Europe due to anthropogenic causes. Journal of Climate, 17, 4630-4635

8 Disponibilité des données

Toutes les données scientifiques produites par le projet sont disponibles sur le site web d'IMFREX (voir section 3.1) pour consultation ou téléchargement. Il s'agit d'abord des séries quotidiennes issues des modèles de Météo-France et de l'IPSL pour le climat de référence (1960-1989) et pour le climat de la fin du 21ème siècle (2070-2099). Des diagnostics plus élaborés pour le climat moyen et les extrêmes sont également disponibles sous la forme d'indices par saison pour un grand nombre de sites en France. Ces diagnostics concernent les simulations numériques, mais aussi les observations du 20ème siècle. Enfin des documents rédigés sur des aspects plus particulièrement étudiés sont proposés sur le site. Pendant le projets, des données d'observation ont été mises à disposition des partenaires, mais elle ont été retirées du site à l'issue de celui-ci, afin de rendre public l'intégralité des pages web.

9 Site Internet GICC

Le site IMFREX hébergé par Médias-France sera maintenu pendant 6 ans. Durant le projet, il a servi de moyen d'échange entre les partenaires, entre les réunions bisannuelles du projet. A l'issue du projet, tous les documents produits (hors ce rapport final tant qu'il n'est pas accepté par le conseil scientifique) y sont disponibles. La façon la plus simple et efficace pour valoriser les résultats dans le cadre GICC est donc d'établir un hyperlien du site GICC vers la page d'entrée du site IMFREX. Ce site utilise la charte graphique de Médias-France, ce qui le rend parfaitement compatible avec le site GICC.

