

Nouvelles projections climatiques à échelle fine sur
la France pour le 21ème siècle : les scénarii
SCRATCH2010

Christian Pagé
Laurent Terray

Climate Modelling and Global Change
TR/CMGC/10/58

CERFACS
Centre Européen de Recherche
et de Formation Avancée en Calcul Scientifique
42, avenue G. Coriolis, 31057 Toulouse Cedex, France

16 août 2010

Résumé

Des scénarii climatiques globaux - réalisés dans le cadre de l'exercice d'intercomparaison de modèles couplés CMIP3 - et régionaux - réalisés par le CERFACS et Météo-France - ont été désagrégés à petite échelle sur la France par le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). La version initiale de ces scénarii a été produite en 2008, sous la dénomination SCRATCH08 (Pagé et al., 2008). La configuration de la méthodologie a été améliorée depuis, surtout dans le cadre du projet ANR-SCAMPEI sur l'impact des changements climatiques sur les régions de montagnes. Ces nouveaux scénarii sont dénommés SCRATCH2010 : ce sont maintenant les scénarii de référence et remplacent SCRATCH08. Ils sont disponibles aux usagers internes et externes à des fins de recherche et d'études. La résolution spatiale des scénarii SCRATCH2010 est de 8 km sur une région couvrant la France.

Ce rapport présente une brève description de la méthodologie utilisée pour la désagrégation d'échelle des simulations climatiques, les données utilisées comme base pour la désagrégation, ainsi qu'une description des scénarii désagrégés disponibles. Les limites scientifiques d'utilisation de ces données de même que leurs sources d'incertitude sont discutées, de même que les modalités de leur mise à disposition. Ce rapport est une mise à jour de celui décrivant les données SCRATCH08.

Mots-clés: scénarios, scénarii, scenario, climat, climate, giec, ipcc, downscaling, régionalisation, changements climatiques, désagrégation, échelle, régionale, France, SAFRAN, SCRATCH08, SCRATCH2010

Introduction

Ce rapport a pour but de décrire les scénarii climatiques qui ont été désagrégés par le Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS), et qui sont disponibles aux usagers internes et externes. Ces scénarii climatiques ont été désagrégés à une résolution de 8 km sur une région couvrant la France ainsi qu'une partie de la Suisse (voir figures 1a et 1b). Il est à noter que l'analyse hors France, c'est-à-dire en Suisse et dans la partie Allemande, n'est pas de bonne qualité par rapport à l'analyse couvrant la France. Il est donc recommandé de ne pas utiliser les données désagrégées hors du domaine France.

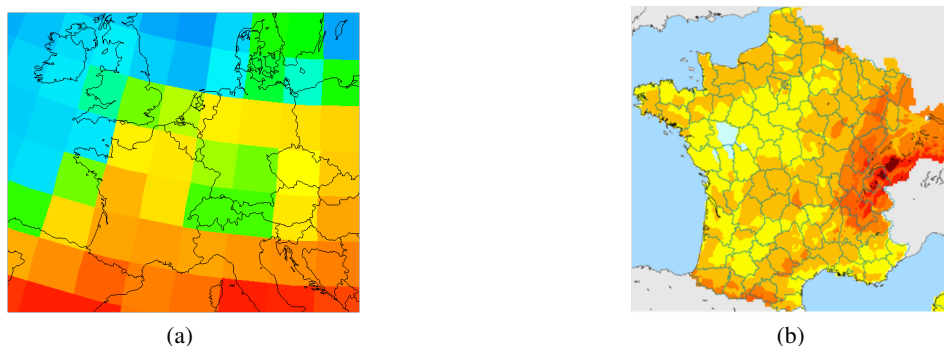


FIG. 1: Exemple de données de précipitations (mm/jour) couvrant la France. La figure (a) montre les données à la résolution typique d'un modèle global du climat (modèle IPSL CM4 IPCC-AR4 2.5° x 3.75°), tandis que la figure (b) montre les données désagrégées statistiquement à une résolution de 8 km.

La première section de ce rapport présente une brève description de la méthodologie utilisée pour désagréger les simulations climatiques. La deuxième section présente une description des données climatiques utilisées comme base pour la désagrégation, suivi d'une description des différents scénarii désagrégés disponibles. Enfin, la troisième et dernière section présente des informations utiles qui expliquent les limites d'utilisation de ces scénarii, leurs sources d'incertitudes, de même que les modalités de leur mise à disposition au CERFACS ainsi qu'aux usagers extérieurs.

1 Désagrégation d'échelle

1.1 Méthodologie

Les échelles de temps et d'espace caractéristiques des processus de fine échelle diffèrent fortement de celles résolues par les modèles climatiques. Par conséquent, de nombreuses techniques dynamique et/ou statistique ont été développées pour effectuer ce transfert d'échelle. Parmi ces techniques, il existe des méthodologies de désagrégation d'échelle statistique basées sur l'utilisation du concept de type de temps. Dans ces dernières, les propriétés climatiques régionales sont utilisées afin d'établir des types de temps discriminants pour une variable locale donnée. L'hypothèse principale s'énonce comme suit : chaque régime de temps particulier (représenté par une variable de circulation atmosphérique de grande échelle : le/les prédicteur(s)) est associé à une distribution spécifique des variables climatiques locales (par exemple la température et les précipitations à petite échelle : le/les prédicteur(s)). Cette association est représentée par une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et réanalyses disponibles. La méthodologie de désagrégation d'échelle utilisée ici est celle développée par Julien Boé du CERFACS (Boé, 2007; Boé et Terray, 2008a,b; Boé et al., 2006), référée par Boe08 ci-après. Dans le présent rapport, nous nous limiterons à une présentation synthétique et sommaire de la méthodologie. Pour plus de détails le lecteur est référé à la documentation du logiciel dsclim (Pagé et al., 2009).

Dernièrement, la méthodologie de Boe08 a été recodée dans un logiciel avec licence open-source CeCILL (CEA - CNRS - INRIA, 2008). Ce logiciel est dénommé dsclim, et est décrit en détails dans Pagé et al. (2009). Cette implémentation a permis de modifier la méthodologie et sa configuration avec de l'optimiser et d'améliorer ses performances. Les scénarii SCRATCH08 ont été générés avec la méthodologie telle que configurée et implémentée par Julien Boé, tandis que les scénarii SCRATCH2010 ont été générés avec dsclim, ce qui a permis de modifier certains aspects de la méthodologie et de la configuration.

La méthodologie de Boe08 est une méthode de désagrégation d'échelle statistique multivariée. Les propriétés régionales climatiques sont utilisées afin d'établir des régimes de temps discriminants pour une variable locale donnée, soit la précipitation dans ce cas-ci. Les variations intra-types (régimes de temps) des paramètres appropriés pour un forçage donné sont tenues en compte par des régression multivariées qui utilisent les distances aux prédicteurs des régimes de temps d'un jour donné. C'est, en quelque sorte, une méthode d'analogie basée sur les types de temps et une approche multivariée. Par construction, ce type de méthodologie débiaise les sorties des modèles climatiques.

Par exemple, il est possible de montrer que lorsqu'un type de temps présente une

anomalie de pression au niveau moyen de la mer telle que présentée sur la figure 2a, nous observons, statistiquement, un régime de précipitations tel que montré à la figure 2b. Cette même distribution des précipitations n'est pas résolue avec une précision suffisante pour les modèles d'impacts par les modèles régionaux et globaux du climat (figures 2c et 2d). Ceci démontre l'intérêt d'une méthodologie de désagrégation d'échelle produisant des résultats à une échelle de 8 km.

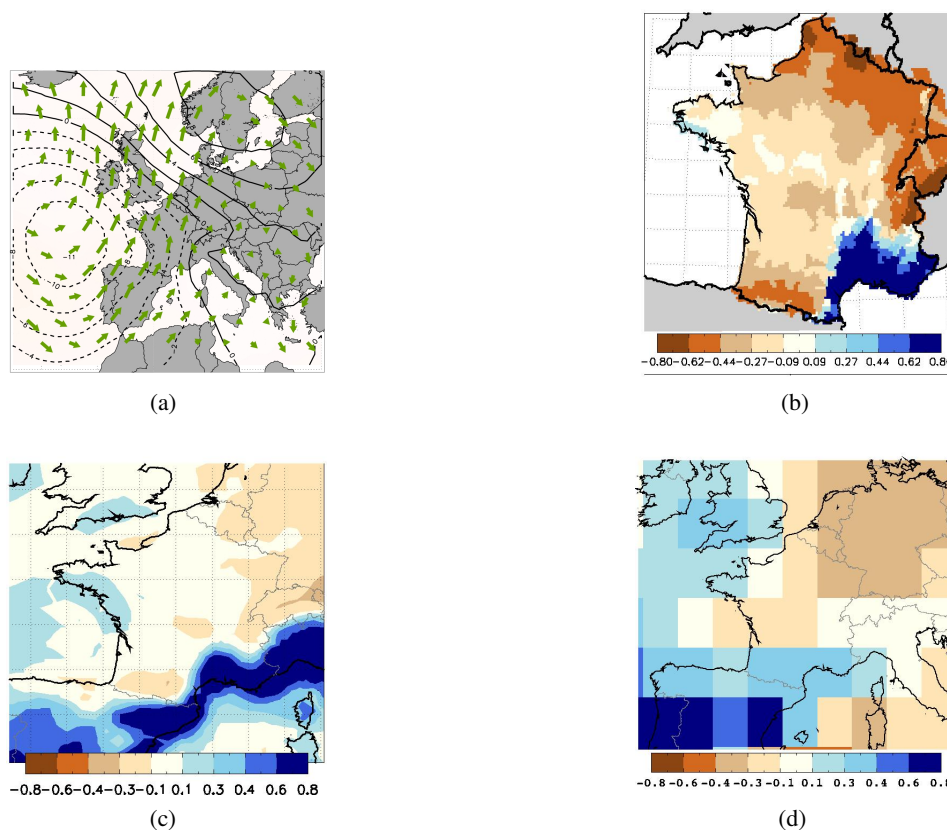


FIG. 2: (a) présente un régime de temps présentant un flux de vent du sud sur la France. Les vents à 850 hPa sont présentés sous forme de vecteurs, l'anomalie de pression au niveau moyen de la mer en lignes noires (tiretées pour les valeurs négatives). Associées à ce régime de temps, anomalie de précipitations (%) observée en (b), telle que simulée par un modèle régional du climat en (c), et telle que simulée par un modèle global du climat en (d).

La méthodologie de Boe08 s'appuie sur des séries d'observations. Dans ce cas-ci, la base de données d'observations utilisée a été générée par Météo-France, et est dénommée SAFRAN (analyse météorologique à méso-échelle), qui est décrite dans Quintana-Seguí et al. (2008). Celle-ci couvre la France sur une période allant de 1958 à 2008 (période étendue par rapport à la période initiale de 1981-2005), à une résolution spatiale de 8 km (zones climatiques cohérentes) sur une grille

régulière en projection Lambert-II étendue. Elle comporte 7 paramètres de base, soient : les précipitations solide et liquide, la température à 2 m, le module du vent à 10 m, la radiation infra-rouge et visible incidente en surface, l'humidité spécifique à 2 m. La figure 3 montre la région couverte par SAFRAN, ainsi que sa résolution spatiale en présentant l'altitude de chaque point de l'analyse.

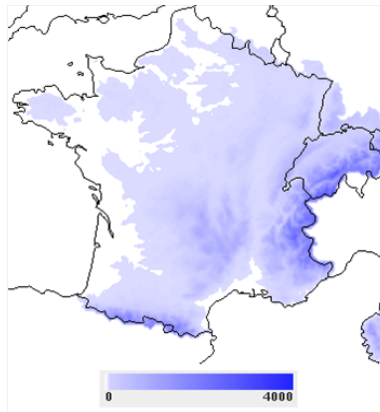


FIG. 3: Analyse météorologique à méso-échelle de Météo-France : SAFRAN. L'altitude de chacun des points de l'analyse est présentée. La résolution spatiale est de 8 km, en grille régulière sur une projection Lambert-II étendue.

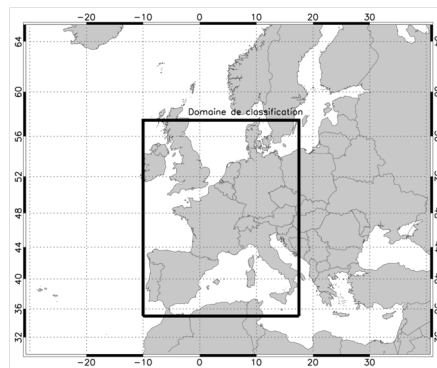


FIG. 4: Domaine de grande échelle utilisé (rectangle noir).

Voici les principales caractéristiques de la configuration de la méthodologie pour les scénarii SCRATCH2010 :

- Aspects généraux
 - Domaine France étendue (Fig. 4)
 - Points de régression : 265 points en France, incluant la Corse
 - Température moyenne (indice de température) calculée sur les points Terre seulement
 - 4 saisons séparées (DJF MAM JJA SON)
 - 10 centroïdes (types de temps)

- Décomposition en 10 EOF
- Prédicteur : pression au niveau moyen de la mer (+ indice de température en été JJA)
- Prédicteur : précipitation totale
- Régression sur les distances à tous les centroïdes
- Apprentissage : période 1981-2005
 - Données observées SAFRAN 1981-2005 (points France seulement, incluant la Corse)
 - Données de grande échelle NCEP 1948-2007
- Désagrégation : choix du jour analogue
 - À ± 10 jours du jour julien désagréé
 - Choix que parmi les jours du même centroïde
 - 11 jours en première sélection
 - Distance minimale des précipitations reconstruites
 - On utilise en plus la distance de l'indice de température pour automne/hiver
 - Sélection finale
 - Choix au hasard parmi les 11 jours (aspect stochastique)

Plus spécifiquement, le déroulement de l'algorithme de la méthodologie de Boe08 se présente synthétiquement comme suit, une fois l'apprentissage effectué. Pour un jour j donné où les prédicteurs à grande échelle sont disponibles :

- Chercher le régime de temps le plus proche (données journalières) ;
 - Distance euclidienne sur les 10 premières composantes principales ;
 - Tous les jours R_i de ce régime de temps sont sélectionnés ;
 - La pression au niveau moyen de la mer (et la moyenne de la température à 2 m pour la saison estivale) sont utilisés comme prédicteurs ;
- Reconstruire la précipitation selon les régressions calculées avec la période d'apprentissage, en utilisant la pression au niveau moyen de la mer comme prédicteur ;
- Rechercher 11 jours analogues parmi les R_i jours, à une distance maximale de ± 10 jours du jour julien de l'année ;
 - Les plus proches en terme de précipitations reconstruites et température moyenne ;
 - Choix de 1 jour parmi ces 11 jours de façon aléatoire ;
- Récupérer les observations SAFRAN du jour analogue choisi ;
- Appliquer une correction de température si, en valeur absolue, $T_{\text{modele-climat}} - T_{\text{analyse-NCEP}} > 2^{\circ}\text{C}$;
 - Dans le cas d'une correction de température, la radiation infra-rouge et la partition liquide/solide de la précipitation sont ajustés.

1.2 Description des scénarii désagrégés

Actuellement, 15 simulations GIEC ont été désagrégées, en plus de 4 simulations en continu ARPEGE V4 CERFACS A1B, une simulation de référence ARPEGE V4 ainsi que trois simulations ARPEGE V4 A2, A1B et B1, toutes réalisées par Michel Déqué (Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM), Météo-France). Les ré-analyses NCEP ont aussi été désagrégées. Le tableau 1.2 résume les caractéristiques des simulations qui ont été désagrégées.

Modèle	Scénario CO2	Période	Centre
GIEC CMIP3			
CCCMA CGCM3.1 T63	A1B	01/01/1961 - 31/12/2000 01/01/2046 - 31/12/2065 01/01/2081 - 31/12/2100	CCCMA
CNRM-CM3			Météo-France
CSIRO-MK3.0			CSIRO
GFDL-CM2.0			GFDL
GFDL-CM2.1			GFDL
GISS-AOM			GISS
GISS-ER			GISS
IAP-FGOALS			FGOALS
INGV ECHAM4			INGV
IPSL CM4			IPSL
MIROC 3.2 MEDRES			MIROC
MIUB ECHO-G			MIUB
MPI-ECHAM5			MPI
MRI CGCM 2.3.2a			MRI
NCAR CCSM3			NCAR
4X ¹ ARPEGE V4	A1B	01/01/1950 - 31/12/2099	CERFACS
ARPEGE V4	REF	01/01/1950 - 31/12/2000	Météo-France
ARPEGE V4	A1B	01/01/2001 - 31/12/2100	Météo-France
ARPEGE V4	A2	01/01/2001 - 31/12/2100	Météo-France
ARPEGE V4	B1	01/01/2001 - 31/12/2100	Météo-France
NCEP	REF	01/01/1948 - 31/12/2006	NCEP

TAB. 1: Caractéristiques de simulations désagrégées au CERFACS.

Les variables désagrégées correspondent à celles de la base d'observations SA-FRAN. En plus de ces variables de base, des variables supplémentaires sont calculées, de même que des moyennes mensuelles, annuelles, saisonnières, et climatologiques. Les variables supplémentaires qui sont calculées sont les suivantes :

- Evapotranspiration potentielle journalière (ETP) telle que calculée par la formule de Météo-France (Penmann modifiée) ;

¹La seule différence entre les 4 simulations sont les conditions initiales atmosphériques au 01/01/1950.

- Précipitations totales ;
- Humidité relative ;
- Température maximale journalière ;
- Température minimale journalière.

Les données sont désagrégées avec une fréquence journalière (les données désagrégées à une fréquence horaire sont aussi disponibles, mais ne sont pas stockées et doivent être régénérées au besoin). Les moyennes suivantes sont également calculées, pour les variables de base ainsi que les variables supplémentaires :

- Mensuelles ;
- Annuelles ;
- Saisonnières ;
 - Décembre-Janvier-Février (DJF) ;
 - Mars-Avril-Mai (MAM) ;
 - Juin-Juillet-Août (JJA) ;
 - Septembre-Octobre-Novembre (SON) ;
- Climatologiques : mois de l'année par anomalie sur une période donnée par rapport à 1961-1990.

Ces données sont disponibles nativement dans le format NetCDF avec la convention CF-1.0 (Pagé, 2008). Actuellement, les données sont disponibles localement au CERFACS sur le serveur nommé mingan : se référer à l'annexe 2.4 pour plus de détails. Pour les usagers externes, les données sont envoyées au cas par cas selon les demandes.

Dans la prochaine sous-section, une présentation synthétique des résultats de la désagrégation d'échelle de ces simulations sera effectuée.

1.3 Résultats de la désagrégation d'échelle

Il y a de multiples façons de présenter les scénarii climatiques. En effet, cela dépend beaucoup de l'application qui veut en être faite. Par conséquent, plusieurs graphiques génériques choisis seront présentés ici afin de donner une vue d'ensemble sur les scénarii. Un premier type de graphique qui permet de présenter la dispersion entre les différents scénarii montre les données avec des axes ΔT ΔP , représentant les anomalies par rapport à une période de référence. Ici, il a été choisi de montrer les résultats sur deux saisons (hiver DJF et été JJA) en plus de la moyenne annuelle. La période de référence choisie est 1961-1990. La figure 5 présente les anomalies sur la période 2046-2065 et la figure 6 les présente sur la période 2081-2100. Le principal aspect qui ressort des figures 5 et 6 est que, malgré une dispersion importante au niveau des températures, l'été montre un assèchement marqué au niveau des quantités de précipitations pour la presque totalité des simulations, autant durant la période 2046-2065 que 2081-2100.

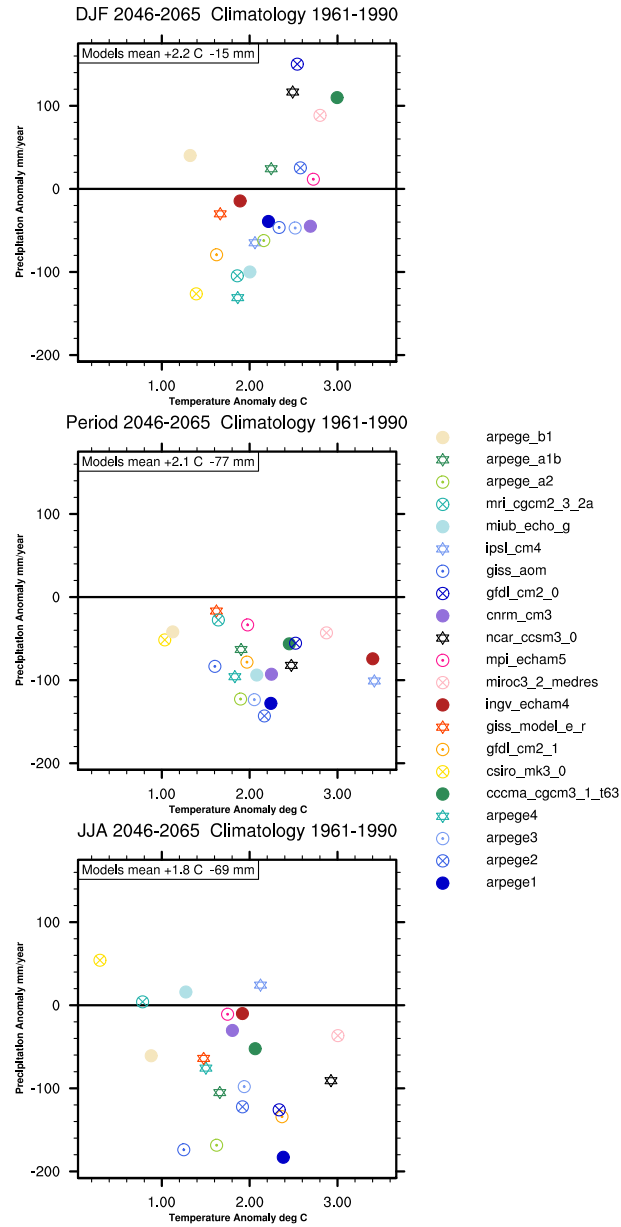


FIG. 5: Graphiques ΔT ΔP présentant les anomalies de température et précipitation pour l'hiver DJF (en haut), l'été JJA (en bas), et la moyenne annuelle (au centre). La période présentée est 2046-2065 avec comme référence 1961-1990, la moyenne spatiale étant calculée sur un domaine couvrant la France entière.

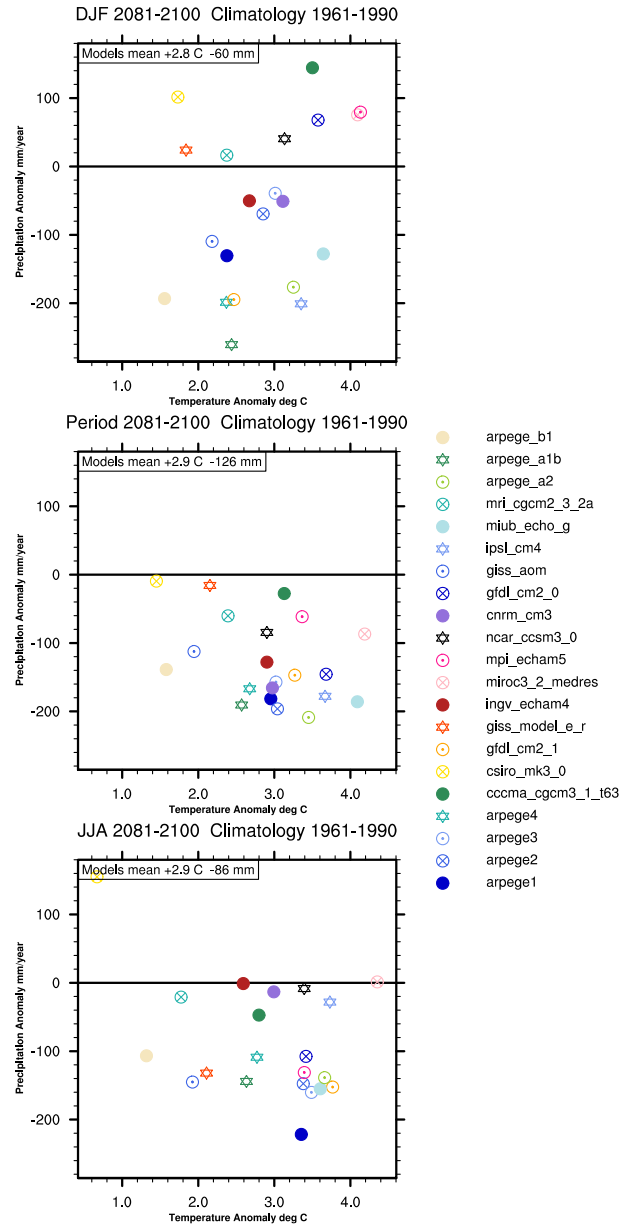


FIG. 6: Graphiques ΔT ΔP présentant les anomalies de température et précipitation pour l'hiver DJF (en haut), l'été JJA (en bas), et la moyenne annuelle (au centre). La période présentée est 2081-2100 avec comme référence 1961-1990, la moyenne spatiale étant calculée sur un domaine couvrant la France entière.

Un autre aspect important à analyser est celui de la variabilité intra-saisonnière. En calculant la moyenne sur chaque mois de l'année, tel que montré sur les figures 7 et 8, il est possible d'évaluer la variabilité entre les saisons de chacune des simulations ainsi que la distribution saisonnière des anomalies de température et précipitations. Ceci permet de confirmer l'assèchement marqué pendant l'été et l'automne.

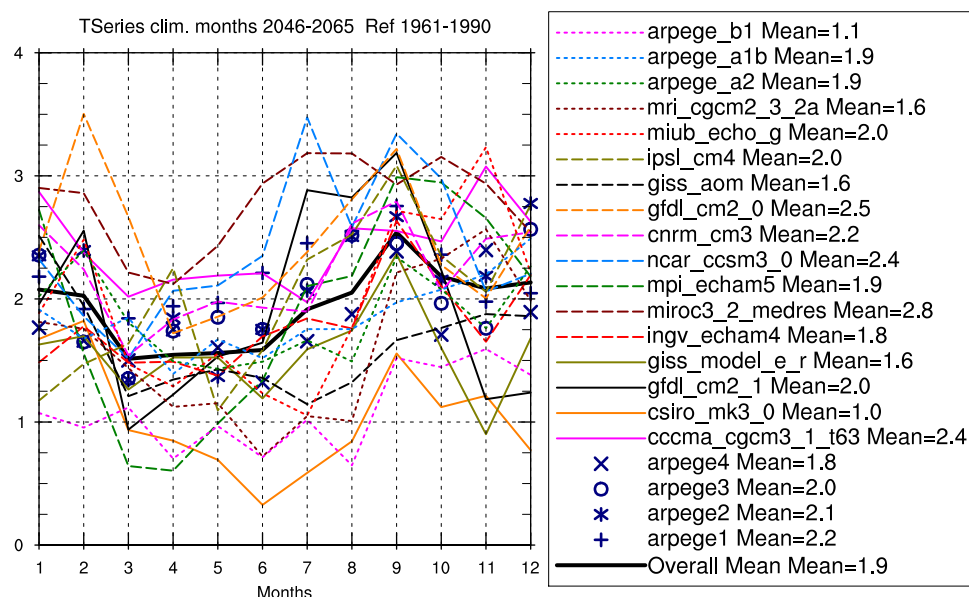


FIG. 7: Anomalies de température moyennées sur chacun des mois (janvier=1 ; décembre=12) de la période 2046-2065 avec comme référence 1961-1990, la moyenne spatiale étant calculée sur un domaine couvrant la France entière.

Afin de quantifier la distribution des simulations et son évolution dans le temps, l'utilisation d'un diagramme en boîte est approprié. Ce type de représentation permet de visualiser les extrêmes, la médiane et la distribution de la majorité des simulations. La figure 9 montre l'augmentation de l'anomalie de température entre les périodes 2046-2065 et 2081-2100 (période de référence 1961-1990). De même, la figure 10 montre la diminution importante des précipitations en été et automne, associée à l'incertitude plus importante au niveau des anomalies de précipitations que celles des températures. La variation dans la distribution des simulations est aussi appréciable : on remarque que la variabilité augmente de façon très significative entre les périodes 2046-2065 et 2081-2100. Ceci est une information importante dans l'analyse des scénarii.

La répartition spatiale n'est cependant pas à négliger. En effet, les disparités régionales sont significatives, et une moyenne couvrant toute la France masque des informations spatiales importantes. Dans ce but, il est possible de présenter des scénarii individuels, ou bien leur moyenne, les scénarii extrêmes, et ce, sur une saison, une période, etc. Dans le présent document, la présentation des scénarii n'est

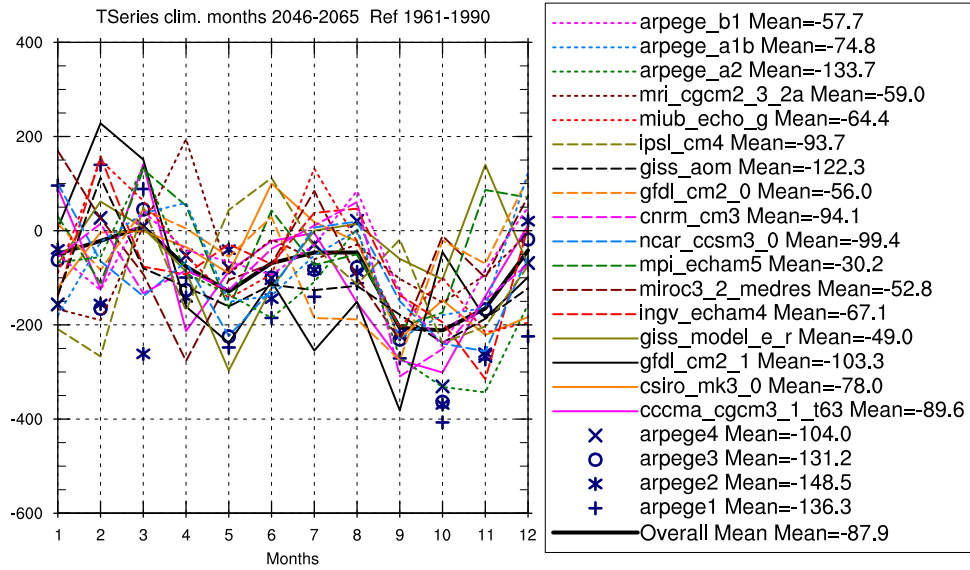


FIG. 8: Anomalies de précipitation moyennées sur chacun des mois (janvier=1 ; décembre=12) de la période 2046-2065 avec comme référence 1961-1990, la moyenne spatiale étant calculée sur un domaine couvrant la France entière.

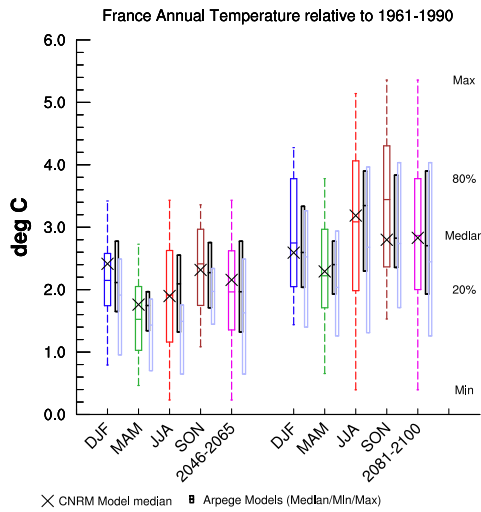


FIG. 9: Diagramme en boîte de l'anomalie de température pour les périodes 2046-2065 et 2081-2100 avec comme période de référence 1961-1990. Les boîtes de couleurs représentent la moyenne des simulation GIEC, les noires représentent les 4 simulations ARPEGE V4 CERFACS, et les boîtes violettes représentent les 3 simulations ARPEGE V4 RETIC. Le symbole X présente la simulation du modèle CNRM-CM3 de Météo-France. Les boîtes noires et violettes ne présentent que les extrêmes maximum et minimum de même que la médiane (pas de lignes tiretées). La moyenne spatiale est calculée sur un domaine couvrant la France entière.

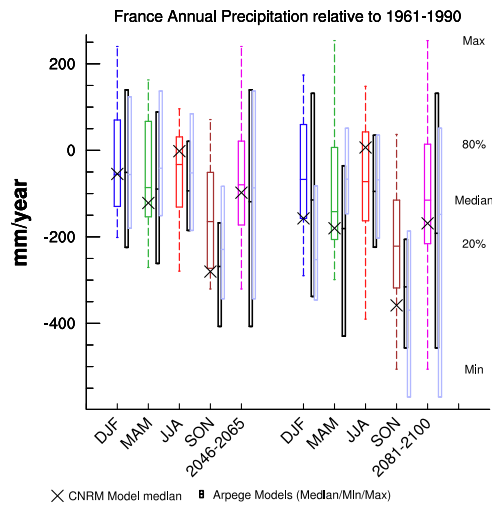


FIG. 10: Diagramme en boîte de l'anomalie de précipitations pour les périodes 2046-2065 et 2081-2100 avec comme période de référence 1961-1990. Les boîtes de couleurs représentent la moyenne des simulation GIEC, les noires représentent les 4 simulations ARPEGE V4 CERFACS, et les boîtes violettes représentent les 3 simulations ARPEGE V4 RETIC. Le symbole X présente la simulation du modèle CNRM-CM3 de Météo-France. Les boîtes noires et violettes ne présentent que les extrêmes maximum et minimum de même que la médiane (pas de lignes tiretées). La moyenne spatiale est calculée sur un domaine couvrant la France entière.

pas exhaustive : il a donc été choisi de ne présenter que la moyenne sur les deux saisons hiver (DJF) et été (JJA) de la moyenne des scénarii, sur la périodes 2046-2065 par rapport à la climatologie de la période 1961-1990 (figures 11, 12, 13 et 14).

Au niveau des précipitations, les résultats de la moyenne multi-modèles de la désagrégation montrent, en hiver, une augmentation des précipitations sur le relief méditerranéen, le Massif Central ainsi que sur les Pyrénées orientales, et un assèchement sur le pays Basque et la pointe bretonne. La période estivale montre un tout autre portrait, soit une diminution des précipitations sur pratiquement tout le territoire, et de façon plus marquée sur le relief des Alpes, du Massif Central, et des Pyrénées. On remarquera également la dépendance forte par rapport à la topographie.

Au niveau des températures, les résultats montrent une réponse beaucoup plus uniforme, autant l'hiver que l'été. On note donc une augmentation de la température de l'ordre de 1,5 à 2,5 °C de l'ouest vers l'est l'hiver, tandis qu'en été la répartition de l'augmentation est plutôt uniforme sur le territoire.

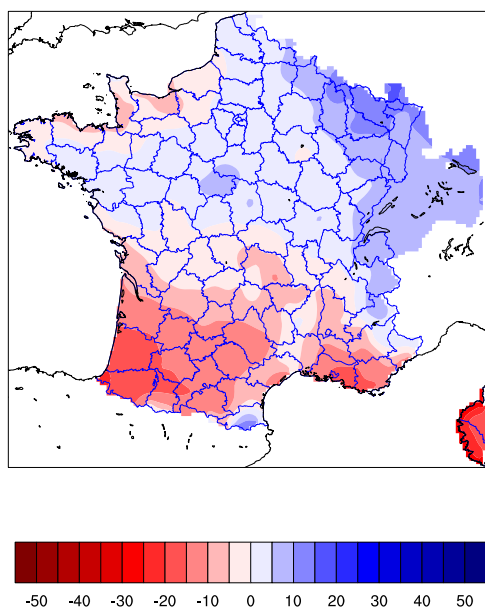


FIG. 11: Moyenne multi-modèles des anomalies de précipitation (mm/an) pour la période hivernale (décembre-janvier-février (DJF)) de la période 2046-2065 par rapport à la climatologie 1961-1990. Les modèles sont ceux du GIEC ainsi que les 7 simulations ARPEGE V4.

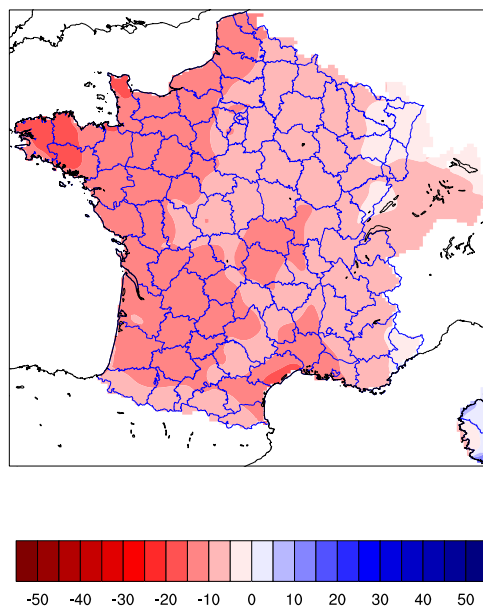


FIG. 12: Moyenne multi-modèles des anomalies de précipitation (mm/an) pour la période estivale (juin-juillet-août (JJA)) couvrant 2046-2065 par rapport à la climatologie 1961-1990. Les modèles sont ceux du GIEC ainsi que les 7 simulations ARPEGE V4.

2 Les incertitudes liées aux projections climatiques

La question des incertitudes est devenue une des questions centrales autour de l'utilisation des scénarii ou projections climatiques pour les études d'impact. Cette question des incertitudes est éminemment contextuelle et peut se décliner comme suit : pour un problème donné, quelles sont les différentes sources d'incertitude existantes ? Est-il possible d'en proposer une hiérarchisation et une quantification ? Quelle est la meilleure manière de les estimer, et de les présenter et/ou communiquer ?

2.1 Typologie des sources d'incertitude

Les sources d'incertitude présentes dans tout exercice de projection climatique à échelle fine sur le 21ème siècle sont multiples et il est essentiel de toujours bien garder en mémoire les limitations inhérentes à l'exercice de projection climatique dans le futur. Il est intéressant de proposer une catégorisation voire une hiérarchisation des différentes sources d'incertitude suivant les aspects contextuels de la question considérée. En premier lieu, citons l'incertitude liée aux scénarii futurs

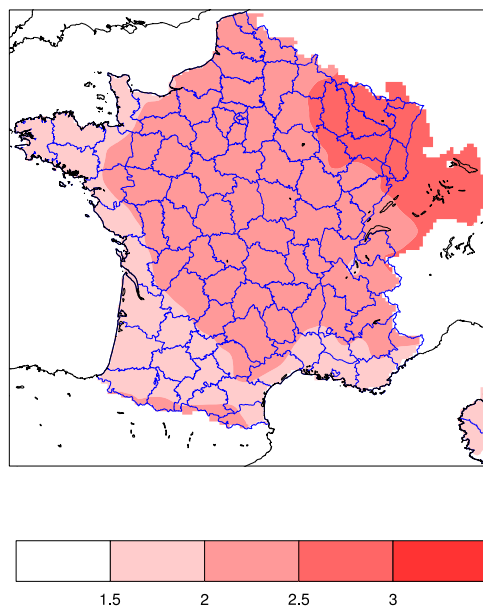


FIG. 13: Moyenne multi-modèles des anomalies de température (degrés C) pour la période hivernale (décembre-janvier-février (DJF)) couvrant 2046-2065 par rapport à la climatologie 1961-1990. Les modèles sont ceux du GIEC ainsi que les 7 simulations ARPEGE V4.

d'émission des gaz à effet de serre que nous appellerons l'incertitude réflexive (la société fait partie à la fois du problème et de la solution). Deuxièmement, citons l'incertitude épistémique liée à une connaissance imparfaite des phénomènes et à leur représentation approximative dans les modèles (processus physiques liés à la convection et aux nuages et représentation incomplète des couplages avec cycle du carbone ou chimie atmosphérique par exemple). Troisièmement, l'incertitude stochastique liée à la variabilité climatique intrinsèque et chaotique et qui comprend également la problématique des conditions initiales du système climatique modélisé. La quatrième source d'incertitude est spécifique au problème de descente d'échelle et concerne les différences entre les techniques de désagrégation. Une autre typologie pourrait être proposée, celle de la bonne et de la mauvaise incertitude : la bonne incertitude est celle que l'on voudrait maximiser (pour ne pas exclure des futurs possibles) alors que la mauvaise est celle que l'on veut réduire (afin d'écarter des futurs basés sur de fausses hypothèses ou outils inadaptés). L'incertitude stochastique est de la bonne incertitude alors que l'incertitude épistémique et d'échelle sont de la mauvaise incertitude.

Un point important est celui de l'irréductibilité congénitale de certaines sources d'incertitudes, soit pour des raisons fondamentales (par exemple l'incertitude stochastique), soit pour des raisons de trop grande complexité du système considéré par rapport à l'état de nos connaissances actuelles (incertitude réflexive et la modélisa-

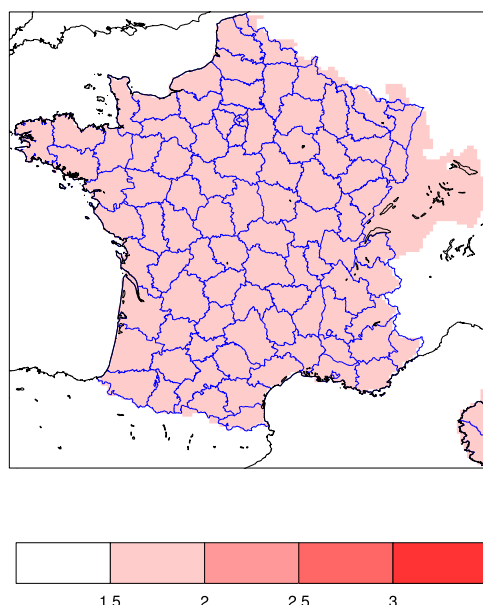


FIG. 14: Moyenne multi-modèles des anomalies de température (degrés C) pour la période estivale (juin-juillet-août (JJA)) couvrant 2046-2065 par rapport à la climatologie 1961-1990. Les modèles sont ceux du GIEC ainsi que les 7 simulations ARPEGE V4.

tion du comportement humain, par exemple). Un autre point concerne les dépendances entre les différentes sources d'incertitude : elles ne sont pas indépendantes et on ne peut pas postuler à priori leur séparabilité. Ces derniers points entraînent inéluctablement un certain nombre de conséquences qu'il importe de rappeler ici. La première conséquence est le caractère nécessairement probabiliste de l'exercice de projection climatique et donc le recours inévitable à des techniques ensemblistes dérivées des méthodes de prévision d'ensemble utilisées aux échelles mensuelle et saisonnière (Monte-Carlo, multi-modèle, physique perturbée, physique stochastique). Ces ensembles de projections climatiques seront donc utilisés pour décrire les différents types d'incertitude. Il faut souligner que la considération de la seule moyenne d'ensemble (dans le cas d'une distribution bimodale de la réponse : que signifie la moyenne d'ensemble ?) et des extrêmes (souvent des outliers) est insuffisante pour représenter la dispersion réelle et les incertitudes liées aux projections disponibles. La deuxième conséquence est notre impossibilité à l'heure actuelle de définir précisément le degré ou niveau d'incertitude pour un problème donné. Autrement dit, il n'est pas possible aujourd'hui de dire avec certitude si les estimations des incertitudes associées aux projections climatiques (comme celles présentées dans le 4ème rapport du GIEC) représentent une fourchette haute ou basse. Cependant, et pour ce qui concerne le 4ème rapport du GIEC, il est probable que la gamme des futurs proposés soit une estimation basse de l'incertitude. La troisième

et dernière conséquence est l'importance de la communication de ces incertitudes vers la sphère publique : comment articuler, analyser et communiquer les résultats issus des projections climatiques en présence d'ignorance et de fortes incertitudes ? Comment rendre clair le degré de consensus de la communauté scientifique ? Comment peut-on communiquer sur l'incertitude des incertitudes ? Le lecteur intéressé par ces derniers aspects pourra se référer à (Kandlikar et al., 2005; Patt et Dessai, 2005; Dupuy et Grinbaum, 2005).

2.2 Quantification de l'incertitude avec les scénarii SCRATCH2010

L'identification et la quantification des sources d'incertitudes inhérentes aux projections climatiques repose principalement à l'heure actuelle sur l'existence d'ensembles dits d'opportunité plus que sur une démarche véritablement concertée. Les scénarii SCRATCH2010 exploitent une partie de la base de données CMIP3 ainsi que la réalisation de simulations régionales réalisées à Météo-France et au CERFACS avec le modèle ARPEGE en mode étiré sur l'Europe et la Méditerranée. Ils permettent ainsi de donner une première estimation de certaines des sources d'incertitude précédemment mentionnées. La considération de la base CMIP3 donne la dispersion associée au multi-modèle du GIEC et fournit une estimation approximative de la combinaison des incertitudes systémique et stochastique. L'estimation de l'incertitude réflexive provient des trois scénarii ARPEGE Météo-France réalisés avec les trois scénarii SRES B1, A1B et A2. Les quatre scénarii ARPEGE CERFACS avec le scénario SRES A1B permettent d'estimer la part de l'incertitude stochastique liée uniquement à la composante atmosphérique. Comme précédemment rappelé, il est illusoire de penser représenter précisément ou même encadrer (borner) les différentes sources d'incertitude. Notre seule alternative pratique actuellement est donc de travailler avec ces fameux ensembles d'opportunité pour obtenir une première estimation des incertitudes. Enfin, il est à souligner que si les études de vulnérabilité n'exigent pas une approche ensembliste (on peut très bien faire une étude de vulnérabilité avec un seul scénario idéalisé), toute étude de risque présuppose l'utilisation des probabilités et l'estimation la plus rigoureuse possible des différentes sources d'incertitude.

Les figures 9 et 10 de la section 1.3 illustrent simplement l'amplitude associée aux différents types d'incertitude associés aux scénarii SCRATCH2010. On peut remarquer, comme on peut s'y attendre a priori, que l'amplitude des incertitudes augmente pour les périodes plus éloignées du temps présent. Cela ne se retrouve pas seulement en termes d'écart-type, mais également en termes d'extrêmes. Finalement, on remarquera également la plus grande incertitude au niveau des précipitations.

2.3 Spaghetti versus fonction de distribution des projections

Rappelons encore une fois que nous en sommes réduits à estimer la distribution statistique à partir de laquelle nos ensembles de simulations sont construits et que cette distribution est différente de celle des climats futurs du monde réel. Si tous les modèles ou scénarii d'émission sont biaisés pour la même raison, la probabilité d'obtenir une simulation particulière sera nécessairement différente de la probabilité d'obtenir des conditions climatiques spécifiques dans le futur. Par conséquent, nous ne pouvons qu'estimer la distribution des projections du climat futur (PDF, *projection distribution function*) et non pas les vraies probabilités des possibles climats futurs. Cette PDF constitue néanmoins la meilleure approximation disponible de la vraie fonction de distribution de probabilité du changement climatique.

Traditionnellement (comme dans le 4ème rapport du GIEC), les ensembles de projections sont présentées sous forme de diagramme spaghetti. L'un des inconvénients de cette présentation est que l'attention est souvent captée de façon excessive d'une part par la moyenne d'ensemble (souvent surlignée) et par les extrêmes (*outliers*). Une approche plus quantitative requiert donc l'estimation de la PDF à partir de laquelle l'ensemble a été échantillonné. Différentes techniques peuvent être utilisées pour générer les PDF suivant le nombre de simulations disponibles dans les ensembles considérés. Leurs avantages et inconvénients seront décrits dans un futur rapport.

2.4 Les prochains développements : la question des métriques

L'estimation de la crédibilité d'un membre particulier des ensembles d'opportunité précédemment évoqués est un exercice difficile mais néanmoins indispensable pour arriver à une véritable distribution de probabilité des changements climatiques futurs. Quelques méthodes ou métriques ont été récemment proposées dans la littérature mais elles comportent toutes des éléments d'appréciation subjectifs. Une piste intéressante pour la réduction des incertitudes systémiques est celle des métriques basées sur des processus spécifiques et non pas seulement sur la capacité des modèles à représenter le climat moyen ou la variabilité du climat présent. La stratégie consiste à identifier un lien entre un processus (ou une suite de processus) à l'oeuvre dans le climat actuel et la dispersion d'un ensemble de projections du climat futur. La deuxième étape consiste alors à identifier dans le climat actuel des manifestations de ce processus et d'analyser le comportement des modèles en climat actuel par rapport aux observations et/ou réanalyses : quels sont les modèles qui sont capables de représenter de manière réaliste les relations entre variables caractéristiques de ce processus ? Le lecteur intéressé par ces aspects pourra se référer à (Boé et Terray, 2008c; Hall et al., 2008) pour des exemples d'application de ces idées.

Annexe A : Localisation des données

Cette annexe présente la structure qui est utilisée afin d'entreposer les données de désagrégation au CERFACS. Les données sont entreposées localement au CERFACS sur le serveur nommé mingan. Le tableau 2.4 décrit la hiérarchie des répertoires contenant les données. Le répertoire principal contenant toutes les données de désagrégation est /data/sim/downscaling/scratch2010/.

Modèle	Répertoire relatif
GIEC CMIP3 A1B	cmip3/a1b/
CCCMA CGCM3.1 T63	cmip3/a1b/cccma_cgcm3_1_t63/
CNRM-CM3	cmip3/a1b/cnrm_cm3/
CSIRO-MK3.0	cmip3/a1b/csiro_mk3_0/
GFDL-CM2.0	cmip3/a1b/gfdl_cm2_0/
GFDL-CM2.1	cmip3/a1b/gfdl_cm2_1/
GISS-AOM	cmip3/a1b/giss_aom/
GISS-ER	cmip3/a1b/giss_model_e_r/
IAP-FGOALS	cmip3/a1b/iap_fgoals1_0_g/
INGV ECHAM4	cmip3/a1b/ingv_echam4/
IPSL CM4	cmip3/a1b/ipsl_cm4/
MIROC 3.2 MEDRES	cmip3/a1b/miroc3_2_medres/
MIUB ECHO-G	cmip3/a1b/miub_echo_g/
MPI-ECHAM5	cmip3/a1b/mpi_echam5/
MRI CGCM 2.3.2a	cmip3/a1b/mri_cgcm2_3_2a/
NCAR CCSM3	cmip3/a1b/ncar_ccsm3_0/
ARPEGE V4 CERFACS A1B Membre 1	arpege/a1b_cerfacs_ens/arpege1/
ARPEGE V4 CERFACS A1B Membre 2	arpege/a1b_cerfacs_ens/arpege2/
ARPEGE V4 CERFACS A1B Membre 3	arpege/a1b_cerfacs_ens/arpege3/
ARPEGE V4 CERFACS A1B Membre 4	arpege/a1b_cerfacs_ens/arpege4/
ARPEGE V4 RETIC REF	arpege/retic/arpege_ref/
ARPEGE V4 RETIC A1B	arpege/retic/arpege_a1b/
ARPEGE V4 RETIC A2	arpege/retic/arpege_a2/
ARPEGE V4 RETIC B1	arpege/retic/arpege_b1/
Ré-analyse NCEP	ncep/

TAB. 2: Localisation en interne au CERFACS des simulations désagrégées.

À la base de ces répertoires, ce sont les données journalières, et il y a un fichier par année et par paramètre. Les années s'échelonnent du 1er janvier au 31 décembre (années civiles, contrairement à SCRATCH08 qui utilise plutôt des années hydrologiques).

À l'intérieur de ces répertoires de base, il y a des répertoires contenant les don-

nées en fréquences mensuelle, annuelle, saisonnière et climatologique. Ceci est décrit dans le tableau 2.4. Les données saisonnières comportent des fichiers contenant toutes les années dans un seul fichier pour une saison en particulier, soient Décembre-Janvier-Février (DJF), Mars-Avril-Mai (MAM), Juin-Juillet-Août (JJA), Septembre-Octobre-Novembre (SON). Les données climatologiques, quant à elles, comportent des fichiers recouvrant des périodes données : les fichiers contenant 'delta' dans le nom contiennent des anomalies d'une période par rapport à une autre, tandis que les fichiers contenant 'clim_months' dans le nom contiennent des moyennes climatologiques sur les 12 mois de l'année.

Données	Répertoire relatif
Horaire (le cas échéant)	hourly/
Mensuelles	monthly/
Annuelles	annual/
Saisonnières	seasonal/
Climatologiques	climatology/

TAB. 3: Localisation en interne au CERFACS des données dérivées des simulations désagrégées.

Bibliographie

- Boé, J., 2007 : « Changement global et cycle hydrologique : Une étude de régionalisation sur la France ». Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier - Toulouse III, 256 pp.
- Boé, J. et L. Terray, 2008a : « A Weather-Type Approach to Analyzing Winter Precipitation in France : Twentieth-Century Trends and the Role of Anthropogenic Forcing ». *J. Climate*, **21** (13), 3118.
- , 2008b : « Régimes de temps et désagrégation d'échelle ». *La Houille Blanche*, **2**, doi :10.1051/lhb :2008016L05702.
- , 2008c : « Uncertainties in European summer climate change : role of evapotranspiration ». *Geophys. Res. Letters*, **35**, L05702, doi :10.1029/2007GL032417.
- Boé, J., L. Terray, F. Habets, et E. Martin, 2006 : « A simple statistical-dynamical downscaling scheme based on weather types and conditional resampling ». *J. Geophys. Res.*, **111**, D21106.
- CEA - CNRS - INRIA, 2008 : Cecill.
URL www.cecill.info
- Dupuy, J.-P. et A. Grinbaum, 2005 : « Living with uncertainty : from the precautionary principle to the methodology of ongoing normative assessment ». *C. R. Geoscience*, **337**, 457–474.
- Hall, A., X. Qu, et J. Neelin, 2008 : « Improving predictions of summer climate change in the United States ». *Geophys. Res. Letters*, **35**, L01702, doi :10.1029/2007GL032012.
- Kandlikar, M., J. Risbey, et S. Dessai, 2005 : « Representing and Communicating Deep Uncertainty in Climate Change Assessments ». *C. R. Geoscience*, **337**, 443–451.
- Pagé, C., 2008 : Format des données SAFRAN et scénarios climatiques désagrégés au CERFACS. Technical Report TR/CMGC/08/27, Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS).

- Pagé, C., L. Terray, et J. Boé, 2008 : Projections climatiques à échelle fine sur la France pour le 21ème siècle : les scénarii SCRATCH08. Technical Report TR/CMGC/08/64, Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS).
- , 2009 : dsclim : A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. Technical Report TR/CMGC/09/21, Centre Européen de Recherche et de Formation Avancée en Calcul Scientifique (CERFACS).
- Patt, A. G. et S. Dessai, 2005 : « Communicating uncertainty : lessons learned and suggestions for climate change assessment ». *C. R. Geoscience*, **337**, 425–441.
- Quintana-Seguí, P., P. L. Moigne, Y. Durand, E. Martin, F. Habets, M. Baillon, C. Canellas, L. Franchisteguy, et S. Morel, 2008 : « Analysis of Near-Surface Atmospheric Variables : Validation of the SAFRAN Analysis over France ». *J. Appl. Met. Clim.*, **47**, 92–107.