

## Annexe

### Fiche méthode Simulations Climatiques régionalisées par la méthode statistique des régimes de temps du CERFACS

#### Généralités

Dans le domaine de la modélisation climatique et du quatrième exercice du GIEC (2007), plusieurs modèles climatiques ont été utilisés afin de simuler les changements climatiques associés aux différents scénarios d'évolution des émissions anthropiques de gaz à effet de serre. Les différents modèles sont constitués d'une composante atmosphérique couplée à une composante océanique. La composante atmosphérique a typiquement une résolution de l'ordre de 200 à 300 km.

En parallèle avec ces simulations du GIEC, Météo-France a également produit des simulations du climat aux échelles régionales à partir de modèles de plus forte résolution sur une région d'intérêt. L'objectif est ici de résoudre des échelles plus fines (typiquement 50km) que celles des modèles couplés (typiquement 200 à 300km) et donc de mieux représenter les événements climatiques extrêmes et de faciliter la réduction d'échelle nécessaire à de nombreuses études d'impacts. Pour ces études, le CNRM utilise la capacité du modèle ARPEGE à fonctionner dans une version à résolution variable.

Le maillage de la version 4 d'ARPEGE-Climat recouvre le globe avec plus de 35000 points, dont environ 1% couvrent le territoire métropolitain. La distance entre deux points voisins sur la France métropolitaine est de 50 km environ. Quatre simulations de situations météorologiques virtuelles ont été réalisées. La première couvre la période 1950-2000 et utilise les forçages radiatifs (gaz à effet de serre, aérosols) observés. Les trois autres couvrent la période 2001-2100, en continuité avec la première simulation, et utilisent les forçages radiatifs des scénarios préconisés par le GIEC A1B, A2 et B1. Comme le modèle ne simule pas l'évolution de l'océan, les températures de surface de la mer (TSM) proviennent des simulations réalisées à Météo-France pour le quatrième exercice du GIEC, avec une version basse résolution non étirée (300 km) d'ARPEGE-Climat couplée au modèle d'océan OPA. Dans les simulations purement atmosphériques à haute résolution, on n'utilise pas la TSM brute, mais une quantité corrigée à partir de l'estimation des biais mensuels moyens. Quatre autres simulations ont également été réalisées

par le CERFACS avec la version 4 du modèle d'ARPEGE-Climat pour le scénario d'émission A1B. La différence avec celles susmentionnées est que les conditions initiales au 1er janvier 1950 sont différentes pour ces quatre simulations. Par conséquent, quatre réalisations différentes existent pour la période du temps présent 1950-1999, et pour la période future 2000-2099.

Par contre, même avec une résolution de 50 km, cela est souvent insuffisant comme résolution pour l'utilisation dans le cadre d'études et de modélisation d'impact, notamment les simulations hydrologiques. Dans ce cadre, le CERFACS a développé une méthode statistique de régionalisation basée sur la circulation grande échelle. Ce type de méthodologie utilise la période présente comme période d'apprentissage. Cette approche suppose que les relations entre les prédictants (variables locales climatiques à prédire) et les prédicteurs (grande échelle) sont préservées en présence du changement climatique, ce qui constitue une hypothèse forte. Elle implique également l'existence d'observations homogènes et de longue durée. Les bases de données qui ont été utilisées ici sont l'analyse SAFRAN de Météo-France (résolution de 8 km) couvrant la France métropolitaine, ainsi que les ré-analyses NCEP (résolution de 250 km).

Il est important de comprendre que les situations météorologiques simulées sont virtuelles et n'ont pas pour objectif, pour une date de validité donnée, de reproduire la situation correspondante réellement observée (ou qui sera observée). Seules les propriétés statistiques climatiques des variables sont reproduites.

## Définition des simulations et de la grille géographique de mise à disposition

---

Les données des scénarios climatiques régionalisés par la méthode des régimes de temps sont stockées sur la grille SAFRAN à 8-km de résolution couvrant la France métropolitaine. Cette grille n'est donc pas une régulière en latitude et longitude.

Des numéros de points sont parfois utilisés pour repérer les points, les numéros ne correspondent pas d'un jeu de données à l'autre (le point 50 de la grille des données régionalisées par la méthode des régimes de temps ne correspond pas au point 50 de la grille des données brutes ou de celle de la méthode quantile-quantile).

Les simulations qui ont été désagrégées sont les suivantes :

- ARPEGE V4 CERFACS membres 1 à 4, SRES A1B: 1950-1999 et 2000-2099 (conditions initiales différentes au 1er janvier 1950)
- ARPEGE V4 SRES A2: 1950-2000 et 2070-2100
- ARPEGE V4 RETIC référence: 1950-2000
- ARPEGE V4 RETIC SRES A1B, A2 et B1: 2001-2100
- Modèles du GIEC SRES A1B, périodes 1960-2000; 2046-2065; 2081-2100 :

- CCCMA CGCM3.1 T63; CNRM-CM3; CSIRO-MK3.0; GFDL-CM2.0; GFDL-CM2.1; GISS-AOM; GISS-ER; IAP-FGOALS; INGV ECHAM4; IPSL CM4; MIROC 3.2 MEDRES; MIUB ECHO-G; MPI-ECHAM5; MRI CGCM 2.3.2a; NCAR CCSM3

## Définition des données désagrégées par la méthode des régimes de temps

---

Les régimes de temps sont ici déterminés à l'aide d'une classification conjointe des données journalières de pression de surface au niveau de la mer et de précipitation. Cette variante, par rapport à une classification effectuée juste sur la variable de circulation atmosphérique, permet d'obtenir des régimes plus discriminants pour la variable climatique étudiée. La classification optimale donne 8 régimes de temps qui permettent une bonne séparation des principaux régimes pluviométriques sur la France

La deuxième étape consiste à construire une régression multiple entre les précipitations (prédicteur) et les paramètres décrivant la circulation de grande échelle (prédicteur). Ces dernières sont estimées par les distances entre le jour  $j$  et les régimes de temps. Les prédicteurs sont les précipitations issues de la base SAFRAN, mais moyennées sur des cercles de 40 km de rayon centrés sur 220 points.

Le troisième ingrédient utilise un index de température défini comme la moyenne des températures du modèle sur la France. L'étape finale de l'algorithme de désagrégation, pour un jour  $j_0$  modélisé dont on connaît la pression au niveau moyen de la mer et l'index de température, cherche d'abord le régime de temps le plus proche de  $j_0$ . Parmi les jours appartenant à ce dernier, on cherche les jours  $j_i$  qui minimisent conjointement la distance entre les précipitations reconstruites (par régression multiple) du modèle et NCEP, et celle entre l'index de température modélisé et celui donné par la ré-analyse NCEP. On choisit ensuite de façon aléatoire un jour  $j_1$  parmi les jours  $j_i$  et toutes les données SAFRAN du jour  $j_1$  sont alors utilisées éventuellement pour le forçage du modèle d'impact. Un traitement spécifique est fait pour la température pour les simulations du climat futur afin de prendre en compte le réchauffement global. Si l'index de température modélisé du jour  $j_0$  est supérieur de plus de 2°C à celui du jour  $j_1$  de NCEP, on ajoute cet écart aux températures de la base SAFRAN pour le jour  $j_1$  tout en corrigeant les autres variables dépendantes, soient le rayonnement infrarouge et la partition des précipitations solide et liquide.

La validation de cette méthodologie est effectuée en vérifiant que les propriétés statistiques et les indices de persistance du champ de précipitations sont bien conservés par la méthode de désagrégation sur une période où nous disposons des données d'observations (SAFRAN) et de ré-analyse (NCEP).

## Traitement des incertitudes

---

En premier lieu, il est bien évident que la nature probabiliste des projections (ou scénarios)

climatiques impose nécessairement d'utiliser une approche ensembliste multi-modèle. Il est alors essentiel d'approfondir un peu la notion d'incertitude associée à ces scénarios climatiques et hydrologiques, en particulier lorsqu'on s'intéresse à l'ensemble du 21<sup>ème</sup> siècle et pas seulement à la période 2070-2099 où l'on peut s'attendre à un rapport signal sur bruit (signal climatique dû au forçage anthropique versus la variabilité interne au système climatique) important. Quelles sont les différentes sources d'incertitude et peut-on les quantifier et/ou les hiérarchiser ? La source d'incertitude climatique principale est celle qui vient des modèles climatiques globaux [3]. Notons que la désagrégation est aussi une technique de correction des biais des modèles climatiques globaux et qu'elle peut donc être utilisée pour fournir une estimation moins biaisée des incertitudes. L'analyse montre qu'il existe une dispersion importante parmi les modèles de la base GIEC sur les changements de fréquences d'occurrence des régimes de temps hivernaux, qui est responsable d'une fraction importante de la dispersion entre les modèles. Les causes de cette dispersion ne sont pas clairement identifiées : faible rapport signal sur bruit ou biais systématique de la circulation de grande échelle, d'où l'importance vitale d'utiliser une approche multi-scénarios lors de la réalisation d'études d'impacts. Une approche avec un scénario unique n'est pas viable scientifiquement.

## Définition des données quotidiennes brutes

---

Données quotidiennes :

- température à 2 m (en K)
- humidité spécifique à 2 m (en kg/kg)
- rayonnement global incident à la surface (en W/m<sup>2</sup>)
- rayonnement infrarouge incident à la surface (en W/m<sup>2</sup>)
- taux des précipitations liquides à la surface (en kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)
- taux des précipitations solides à la surface (en kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)
- force du vent à 10 m (en m/s)

## Définition des données quotidiennes dérivées

---

Ces données quotidiennes sont issues d'un calcul :

- température maximale à 2 m (en K)
- température minimale à 2 m (en K)
- humidité relative à 2 m (en %)
- humidité relative maximale à 2 m (en %)
- humidité relative minimale à 2 m (en %)
- taux d'évapotranspiration potentielle à 2 m (en kg m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>)

- taux des précipitations totales à la surface (en  $\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

## Les scénarios d'émission

---

La famille de scénarios A1 décrit un monde futur dans lequel la croissance économique sera très rapide, la population mondiale atteindra un maximum au milieu du siècle pour décliner ensuite et de nouvelles technologies plus efficaces seront introduites rapidement. Les principaux thèmes sous-jacents sont la convergence entre régions, le renforcement des capacités et des interactions culturelles et sociales accrues, avec une réduction substantielle des différences régionales dans le revenu par habitant.

La famille de scénarios A1 se scinde en trois groupes qui décrivent des directions possibles de l'évolution technologique dans le système énergétique. Les trois groupes A1 se distinguent par leur accent technologique:

- Forte intensité de combustibles fossiles (A1FI),
- Sources d'énergie autres que fossiles (A1T),
- Et équilibre entre les sources (A1B) (« équilibre » signifiant que l'on ne s'appuie pas excessivement sur une source d'énergie particulière, en supposant que des taux d'amélioration similaires s'appliquent à toutes les technologies d'approvisionnement énergétique et des utilisations finales).

La famille de scénarios A2 décrit un monde très hétérogène. Le thème sous-jacent est l'autosuffisance et la préservation des identités locales. Les schémas de fécondité entre régions convergent très lentement, avec pour résultat un accroissement continu de la population mondiale. Le développement économique a une orientation principalement régionale, et la croissance économique par habitant et l'évolution technologique sont plus fragmentées et plus lentes que dans les autres canevas.

La famille de scénarios B1 décrit un monde convergent avec la même population mondiale culminant au milieu du siècle et déclinant ensuite, comme dans le canevas A1, mais avec des changements rapides dans les structures économiques vers une économie de services et d'information, avec des réductions dans l'intensité des matériaux et l'introduction de technologies propres et utilisant les ressources de manière efficiente. L'accent est placé sur des solutions mondiales orientées vers une viabilité économique, sociale et environnementale, y compris une meilleure équité, mais sans initiatives supplémentaires pour gérer le climat.

La famille de scénarios B2 décrit un monde où l'accent est placé sur des solutions locales dans le sens de la viabilité économique, sociale et environnementale. La population mondiale s'accroît de manière continue mais à un rythme plus faible que dans A2, il y a des niveaux intermédiaires de

développement économique et l'évolution technologique est moins rapide et plus diverse que dans les canevas et les familles de scénarios B1 et A1. Les scénarios sont également orientés vers la protection de l'environnement et l'équité sociale, mais ils sont axés sur des niveaux locaux et régionaux.

En résumé :

- A1 : réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement économique sur le schéma actuel
- B1 : réduction des inégalités Nord-Sud avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable
- A2 : développement hétérogène avec un développement économique sur le schéma actuel
- B2 : développement hétérogène avec un développement soucieux de l'environnement et du développement durable

## Références

---

- [1] Boé, J. et L. Terray, 2008: Régimes de temps et désagrégation d'échelle. *La Houille Blanche*, **2**, doi:10.1051/lhb:2008016L05702.
- [2] Pagé, C., L. Terray et J. Boé, 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*, CERFACS, Toulouse, France.
- [3] Rowell, D. G., 2006: A Demonstration of the Uncertainty in Projections of UK Climate Change Resulting from Regional Model Formulation. *Climatic Change*, **79**, 243-257.