

PROJET ACCLIMATE ETUDE SIM-CLIM

THEME 3 : ANNEXE 1

Etat de l'art de la modélisation du climat et synthèse sur les techniques de descentes d'échelle climatique

Sommaire

1. INTRODUCTION	3
2. LA MODELISATION CLIMATIQUE - ETAT DE L'ART	3
3. POURQUOI UTILISER UNE METHODE DE DESCENTE D'ECHELLE ?.....	5
4. LES DIFFERENTS TYPES DE METHODE	7
4.1 L'approche dynamique.....	7
4.2 L'approche statistique.....	8
4.2.1 Type de temps.....	9
4.2.2 Modèle de régression.....	10
4.2.3 Générateur de séries.....	10
4.3 Combinaison des approches statistiques et dynamiques.....	11
5. SYNTHESE ET RECOMMANDATIONS GENERALES	12
5.1 Schéma récapitulatif : les différentes étapes d'une descente d'échelle climatique.....	12
5.2 Recommandations d'ordre générale pour la mise en œuvre d'une descente d'échelle climatique.....	12
5.2.1 Incertitudes	12
5.2.2 Validation des modèles globaux du climat (AOGCM)	13
5.2.3 Descente d'échelle dynamique	14
5.2.4 Descente d'échelle statistique	15

6. EXEMPLES DE DESCENTES D’ECHELLE DEJA MISES EN ŒUVRE DANS LES PAYS DE LA COI..... 16



1. Introduction

Pour répondre aux questions posées par le changement climatique et ses impacts, le GIEC utilise les modèles du système climatique et des études économiques et démographiques. Ces modèles composent, non pas des prévisions, irréalisables à l'échelle de plusieurs décennies, mais des scénarios d'évolution du climat, supposés couvrir un large éventail d'évolutions possibles.

Les simulations climatiques sont réalisées à partir d'un modèle atmosphérique de circulation générale. La principale différence par rapport à un modèle de prévision numérique du temps est la nécessité de forcer le modèle vers des valeurs climatologiques (ou leur évolution probable) pour éviter des dérives trop fortes du modèle. Ces valeurs climatologiques sont généralement des moyennes mensuelles permettant ainsi de prendre en compte le cycle annuel saisonnier.

Les études climatiques classiques se font à partir de modèles numériques appelés GCM (General Circulation Model) qui couvrent l'ensemble du globe, représentent la dynamique de l'atmosphère et ses lois physiques. Pour étudier le climat global de la planète, les modèles atmosphériques sont couplés à des modèles représentant les autres parties du système terre : l'océan, la végétation, les fleuves, la biogéochimie marine, la chimie atmosphérique, les calottes polaires, le cycle du carbone.

Néanmoins, les modèles globaux du climat couplés océan-atmosphère, appelés AOGCMs dans la suite du document, ont une résolution spatiale trop faible (généralement supérieure à 100km) pour permettre une représentation réaliste de certains phénomènes d'échelle locale (pluies convectives intenses, cyclones, perturbations des paramètres météorologiques par le relief...). De manière générale, sur la région COI, seul Madagascar est résolu dans la grille des AOGCMs. Les « petites » îles (La Réunion, Maurice, Seychelles, Comores) ne sont pas représentées. La mise en œuvre de techniques de descente d'échelle à partir des données des AOGCMs permet de corriger partiellement ces lacunes et de traduire certaines des tendances mises en évidence par les AOGCMs sur les paramètres locaux.

Il existe à ce jour une grande variété de méthodes qui ne sont pas toutes adaptées au contexte régional et local des pays de la COI. Ce document a pour objectif de réaliser une synthèse des méthodes de descente d'échelle disponibles, d'en analyser les avantages et inconvénients et de dresser un certain nombre de recommandations pour leur mise en œuvre.

2. La modélisation climatique – état de l'art

Les modèles climatiques ont progressé en même temps que la puissance des ordinateurs et au grès des progrès dans la connaissance du fonctionnement du système climatique dans son ensemble. La figure 1 montre l'évolution au cours des décennies du niveau de complexité (en termes de couplage des différentes composantes du système terrestre) des modèles climatiques globaux. Dans les années 1970, les modèles du climat ne considéraient que l'atmosphère. Ce n'est que dans les années 1990 qu'un réel couplage entre les données atmosphériques et océaniques est mis en œuvre dans

les modèles du climat. C'est alors la naissance des modèles globaux du climat couplés océan-atmosphère (AOGCMs). Le terme couplage fait référence à une interaction dans les 2 sens entre les éléments considérés. Si on parle de couplage océan-atmosphère, cela signifie donc que les fluctuations des températures de surface de la mer vont altérer la température de l'atmosphère qui a son tour agit sur la température de l'océan, le tout étant piloté par les flux en surface (rayonnement, turbulence...).

Aujourd'hui, certains modèles considèrent l'atmosphère, les océans, les sols et la végétation, les banquises, les aérosols sulfatés, et dans certains cas l'hydrologie continentale, le cycle du carbone incluant la biosphère et les écosystèmes marins, ou encore l'ozone stratosphérique. Mais bien souvent, les modèles ne couplent pas de manière complète l'ensemble de ces éléments pour des questions de coût de calcul. Les éléments non couplés sont alors introduits sous la forme de forçages externes. Au minimum, les versions les plus récentes des AOGCMs (exploités par le GIEC) couplent l'atmosphère, la surface terrestre et l'océan.

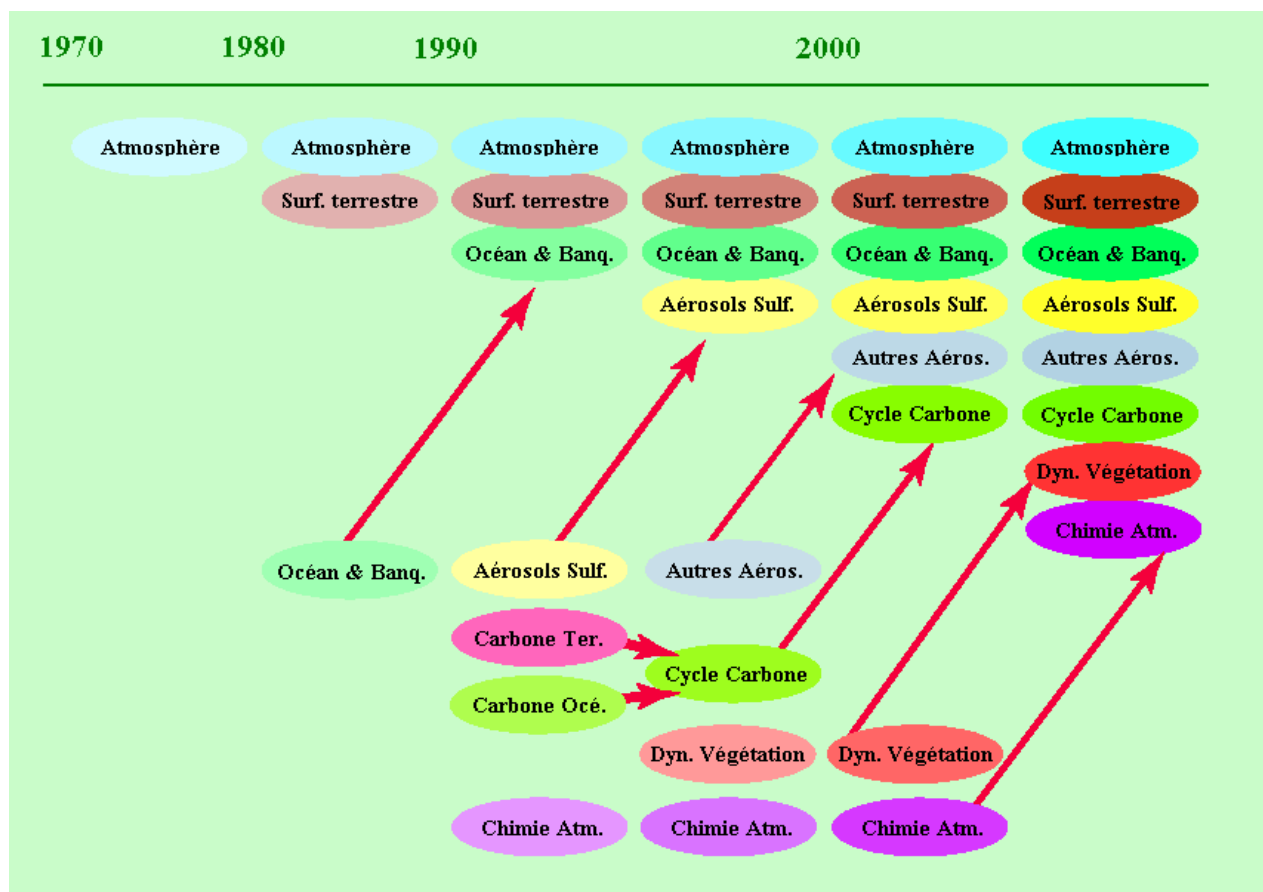


Figure 1

Pour le 5^{ème} exercice du GIEC, 33 modèles (17 centres de modélisation) fourniront des scénarios climatiques à l'échelle globale. Par rapport au 4^{ème} exercice, la résolution horizontale et verticale des

modèles est augmentée d'un facteur 2 environ (c.f. tableau 1). Pour ce nouvel exercice, on note un nombre croissant de modèles considérant un cycle du carbone complet et/ou avec de la chimie des aérosols interactive.

	GIEC 4		GIEC 5	
	Résolution horizontale	Nombre de niveaux	Résolution horizontale	Nombre de niveaux
Atmosphère	1.4° à 4°	12 à 56	0.7° à 4°	18 à 95
Océan	1° à 2.5°	16 à 47	0.5° à 2°	20 à 80

Tableau 1

Enfin, en termes de régionalisation des scénarios climatiques, les données issues des simulation des modèles climatiques globaux couplés océan-atmosphère du GIEC-5 alimenteront le projet CORDEX (Coordinated Regional Downscaling Experiment) qui devrait livrer plus d'une vingtaine de scénarios « haute-résolution » (50 km ou moins) couvrant un certain nombre de régions du globe dont une grande région Afrique incluant la zone COI.

3. Pourquoi utiliser une méthode de descente d'échelle ?

Les modèles de type AOGCM constituent l'outil principal pour l'étude des évolutions du climat global soumis à un forçage anthropique (gaz à effet de serre, aérosols...). Or, ces modèles, qui couplent généralement plusieurs modèles numériques entre eux (atmosphère, sol, océan, banquise...), sont complexes et coûteux à mettre en œuvre ce qui a pour principal effet de limiter leur résolution spatiale. Actuellement, la résolution de ces AOGCMs est comprise entre 100 et 300km.

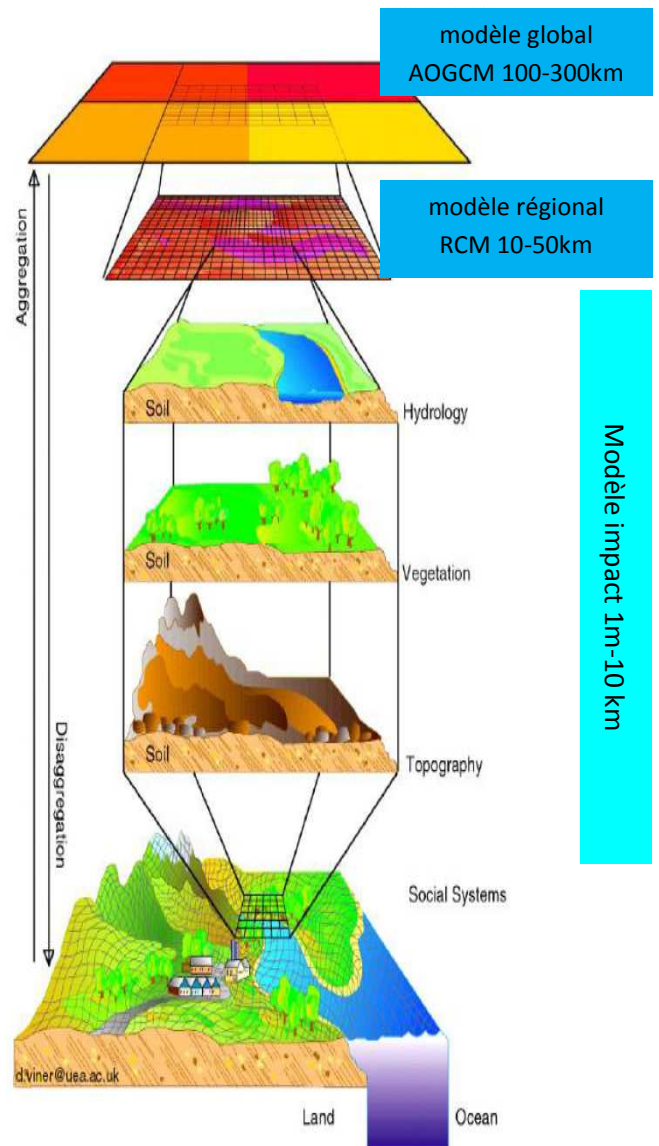
La mise en place de politiques d'adaptation en lien avec certains enjeux régionaux ou locaux nécessite la mise en œuvre de modèles d'impact qui supposent de disposer de projections de certaines variables météorologiques à des échelles spatiales plus fines que celles proposées par les AOGCMs. En effet, le climat peut, selon les caractéristiques physiographiques d'une zone géographique donnée, présenter une variabilité spatiale à des échelles très fines. Certaines particularités telles que l'usage des sols, la topographie, les contrastes terre-mer des régions côtières ou insulaires sont primordiales dans la détermination du climat régional ou local.

Une variable en point de grille issue d'un AOGCM représente une moyenne sur une maille dont la taille dépend de la résolution du modèle (ex : 100 km x 100 km = 10 000 km² pour une maille de 100 km). Plus la résolution est faible, plus la valeur modèle s'éloigne des valeurs observées en un point précis. De plus, les phénomènes physiques qui prennent place à des échelles spatiales plus fines que

la maille du modèle ne sont pas explicitement résolus et doivent donc être approximés par une paramétrisation. Ces paramétrisations physiques n'étant pas parfaites, des biais plus ou moins importants apparaissent sur certaines variables du modèle de climat. C'est plus particulièrement le cas pour les précipitations dont la nature convective dans les régions tropicales fait intervenir des processus de très fine échelle qui ne sont pas représentés de manière réaliste dans les AOGCMs.

Plus concrètement, pour la région COI, les « petites » îles (La Réunion, Maurice, Comores et Seychelles) ne sont pas représentées par les AOGCMs. Or, on sait par exemple que la pluviométrie des ces îles est fortement contrainte par la présence de relief ou par le contraste terre-mer qui induisent localement une forte variabilité spatio-temporelle des précipitations. Cette contrainte n'étant pas simulée par le modèle de climat, les valeurs de pluie prévues par le modèle sont bien souvent largement sous-estimées.

Les méthodes de descente d'échelle permettent donc d'exploiter l'information climatique de grande échelle disponible dans les scénarios proposés par les AOGCMs pour dériver des scénarios régionaux voir locaux pour la ou les variables météorologiques d'intérêt et pour la mise en œuvre d'un modèle d'impact. On parle également de désagrégation.



4. Les différents types de méthode

Deux approches existent en matière de méthodes de descente d'échelle :

- **l'approche dynamique** qui consiste à résoudre explicitement la physique et la dynamique du système climatique régional ;
- **l'approche statistique** qui repose sur la recherche d'une relation statistique entre les variables locales et les variables modèles de grande échelle.

Ces deux approches peuvent être utilisées de façon indépendante ou combinée (méthodes statistico-dynamiques). L'approche dynamique est souvent plus coûteuse en temps de calcul. L'approche statistique quant à elle nécessite de trouver une méthode adaptée au type d'impact que l'on souhaite étudier (paramètres, domaine, ...) et de disposer de données historiques sur une période aussi longue que possible (une vingtaine d'années étant un minimum sous lequel il est difficile de descendre) pour la construction du modèle statistique.

Mettre en œuvre plusieurs méthodes de descente d'échelle pour un même problème est un moyen de quantifier une partie de l'incertitude introduite par la descente d'échelle et d'évaluer le degré de confiance que l'on peut accorder aux résultats obtenus.

4.1 L'approche dynamique

Les méthodes de descente d'échelle dynamique consistent à utiliser un modèle atmosphérique global à haute résolution (les forçages externes étant fournis par les AOGCM) ou un modèle atmosphérique régional dit à aire limitée couplé à un modèle de climat global (GCM ou AOGCM).

La première méthode consiste donc à utiliser un GCM à haute résolution et couvrant l'ensemble du globe. Certains modèles, comme ARPEGE-Climat (Météo-France), utilisent une maille variable avec un pôle de compression sur une partie du globe et, à l'opposé, un pôle de dilatation. Ils permettent ainsi d'atteindre des résolutions fines (50 km sur les versions actuelles d'ARPEGE –Climat) sur la région du globe d'intérêt tout en conservant un coût de calcul raisonnable. Ces modèles sont « forcés » en données initiales par les AOGCMs dont la résolution est comprise entre 100 et 300 km. Les ressources de calcul nécessaires pour ce type de simulation peuvent être réduites en identifiant les périodes d'intérêt et en ne faisant tourner le GCM « haute-résolution » que sur ces périodes, alors que le modèle de plus grande échelle (AOGCM) simule l'évolution générale du climat sur les phases transitoires. Les périodes d'intérêt doivent à la fois couvrir le climat actuel et le climat du futur et être suffisamment longues (au moins 30 ans) pour simuler les différents modes de variabilité (interannuelle, inter décennale). Ceci permet d'une part d'évaluer la capacité du modèle à reproduire le climat présent et de calculer les changements sur les variables climatiques pertinentes.

La deuxième solution est l'utilisation de modèles à aire limitée appelés modèles climatiques régionaux (RCMs). Ces modèles couvrent seulement une partie du globe. Ils permettent d'atteindre des hautes résolutions de l'ordre de 10 à 20 km. De la même manière que pour les GCMs « haute-résolution », ils se concentrent sur des périodes d'intérêt multi décennales. Ils sont capables de

décrire les mécanismes climatiques d'interactions agissant à l'échelle régionale mais également de résoudre partiellement les effets du relief sur les paramètres locaux. Ces modèles sont « forcés » en données initiales et sur leurs limites géographiques par les simulations des AOGCMs. Les principales limitations théoriques de cette technique sont donc les effets des erreurs systématiques du champ de grande échelle, provenant du modèle global et le manque d'interaction « two-way » entre le climat régional et le climat global (les modifications de la circulation atmosphérique simulés par le modèle régional ne sont pas reportées dans le modèle globale). En d'autres termes, le RCM est contraint (ou forcé) par le modèle global coupleur au niveau de sa circulation de grande échelle et ne peut donc pas développer sa propre circulation. Les erreurs introduites par la représentation de grande échelle du GCM, sont donc transmises aux RCMs. Des simulations en mode « two ways » existent mais sont très coûteuses en temps de calcul et donc peu utilisées dans la pratique.

Il est également reconnu que les RCMs génèrent eux-mêmes des biais qui ne sont pas attribuables au biais transmis par les modèles coupleurs de grande échelle. Les biais régionaux typiques de la température de surface et des précipitations sont de l'ordre de 2°C et de 50 à 60% des valeurs observées, respectivement. L'exploitation des données en sortie des RCMs nécessite généralement de les corriger par des méthodes statistiques calibrées sur les observations d'une période du climat passé (ex : méthode « quantile-quantile », Déqué, 2007).

Pour chaque application, une étude précise est nécessaire pour certains aspects de la configuration du modèle tels que les paramétrisations physiques, la taille du domaine et la résolution, ainsi que la technique d'assimilation du forçage de grande échelle.

4.2 L'approche statistique

Les méthodes de descente d'échelle statistique reposent sur la détermination de relations quantitatives entre les variables de grande échelle et les variables locales de surface. Elles sont basées sur le fait que le climat régional dépend de deux facteurs : le climat de grande échelle et les caractéristiques locales ou régionales telles que la topographie, l'indice terre/mer, le type de surface, la couverture du sol... Les méthodes statistiques permettent de mettre en évidence des relations physiquement interprétables entre les champs de grande échelle et les conditions climatiques de surface mais présentent parfois l'inconvénient d'une mauvaise représentation de la variance observée ou des phénomènes extrêmes.

L'information locale ou régionale est obtenue à partir d'un modèle statistique qui relie les variables de grande échelle (prédicteurs) aux variables locales ou régionales (prédictand).

Les méthodes statistiques reposent sur trois hypothèses implicites, qui s'appliquent également partiellement à l'approche dynamique :

- (H1) Les prédicteurs sont des variables appropriées pour le problème étudié (climat régional/local) et sont simulés de façon réaliste par les modèles numérique de simulation du climat (AOGCM).
- (H2) Le modèle statistique reste valable pour le climat perturbé (**hypothèse de stationnarité**). Cette hypothèse forte ne peut être vérifiée ou invalidée formellement.

Idéalement, les données observées devraient couvrir une large palette de conditions climatiques incluant les modifications futures des prédicteurs climatiques.

- (H3) Les prédicteurs climatiques doivent être représentatifs du signal du changement climatique.

Les méthodes statistiques ont pour avantage d'être en générale peu coûteuses en temps de calcul et d'être capables d'apporter une information localisée (ponctuelle) sur un ou plusieurs sites.

La principale faiblesse est liée au fait que l'hypothèse de stationnarité (H2) ne peut être vérifiée (on suppose que les relations calculées sur le climat présent restent valides pour le climat futur). Une autre contrainte de l'approche statistique est de disposer de données homogènes sur la période observée pour permettre le calage du modèle statistique.

Il existe 3 grandes catégories de méthodes statistiques que l'on peut combiner entre elles :

- classification par type de temps
- modèle de régression
- Générateur de séries

4.2.1 Type de temps

Cette famille de méthode repose sur des techniques de classification objective de l'état de l'atmosphère sur un domaine géographique donné décrit à l'aide d'un ou plusieurs prédicteurs de grande échelle. Cette classification permet de mettre en évidence des types ou régimes de temps. L'hypothèse principale est que les types ou régimes de temps sont associés à une distribution spécifique des variables climatiques locales (prédictand) que l'on souhaite déterminer (température ou précipitations à petite échelle).

Plusieurs méthodes permettent de relier le prédictand aux différentes classes de type de temps. On peut par exemple reconstituer une variable locale à l'aide d'une fonction de transfert qui est construite statistiquement à partir des observations et/ou réanalyses (champs de grande échelle) disponibles du climat passé. On peut également déterminer la ou les variables locales en s'appuyant sur des méthodes dites « des analogues » qui consistent à trouver dans le passé des dates « étalons » dont le contexte de grande échelle est proche de celui de la situation considérée et de supposer que les paramètres seront proches des valeurs observés à cette date étalon. La mise en œuvre pour la prévision saisonnière de ce type de méthode montre cependant que des situations analogues en terme de circulation de grande échelle ne sont pas nécessairement analogues en terme d'impacts à l'échelle locale ce qui constitue en soit une limitation de méthode.

✓ avantages :

- approche intuitive et puissance explicative,
- peut s'adapter aussi bien aux températures qu'aux précipitations ou au vent et permet de traiter des problèmes multi variés et spatiaux,

- La méthode peut-être complétée par une approche en descente d'échelle dynamique (jusqu'à la meso-échelle) pour l'étude de certains événements extrêmes en choisissant des journées particulières.
- ✓ contraintes ou inconvénients :
 - nécessite un lourd travail de classification,
 - nécessite de trouver un ou plusieurs prédicteurs de grande échelle discriminant pour le paramètre auquel on s'intéresse.
 - Certains schémas basés sur les types de temps peuvent être insensibles au forçage climatique futur

4.2.2 Modèle de régression

Les modèles de régression permettent de relier une variable locale linéairement ou non-linéairement à des prédicteurs de grande échelle bien corrélés à la variable locale d'intérêt. Les modèles sont en général construits à partir d'un échantillon d'observation du climat passé pour la variable locale et des données de ré-analyses correspondant au même échantillon pour les paramètres de grande échelle. La validation du modèle se fait sur un échantillon disjoint de l'échantillon utilisé lors de la construction du modèle.

On distingue dans cette catégorie, les méthodes de :

- régression linéaire multiple
 - analyse canonique (les prédicteurs sont condensés par une analyse en composante principale)
 - réseau de neurones (régressions non linéaires).
- ✓ avantages :
 - Relativement simples à utiliser
 - Grande variété de prédicteurs disponibles
 - Solutions sur étagères et logiciels disponibles facilement
 - Permet de reconstituer facilement des séries à l'échelle d'un point de mesure
 - ✓ Contraintes ou inconvénients :
 - Sous-estime la variance temporelle
 - Non adapté aux problèmes multi-variés, suppose souvent la linéarité ou la normalité de la distribution de la variable locale
 - Mauvaise reconstitution des phénomènes extrêmes

4.2.3 Générateur de séries

Les générateurs de séries permettent de reproduire les caractéristiques statistiques d'une variable locale mais pas des événements observés. Ils permettent en particulier d'augmenter artificiellement les longueurs des séries en conservant les caractéristiques statistiques.

Ces méthodes ont été principalement utilisées pour les précipitations pour des applications hydrologiques. Elles peuvent être utilisées pour des études d'impact des changements climatiques en reliant les paramètres permettant de générer les séries à des prédicteurs de grande échelle, des types de temps ou aux caractéristiques de précipitations.

Ces méthodes permettent une désagrégation d'échelle temporelle, par exemple pour désagréger des quantités mensuelles de précipitations et de nombre de jours pluvieux en quantités quotidiennes de précipitations ou des quantités quotidiennes en quantités pour des périodes inférieures à 24h.

- ✓ avantages :
 - Production de larges ensembles pour le calcul d'incertitudes ou des simulations longues d'extrêmes
 - Interpolation spatiale des paramètres du modèle utilisant les variables d'environnement ou des conditions de surface
 - Peuvent générer de l'information à l'échelle sub-quotidienne
- ✓ Contraintes ou inconvénients :
 - En cas de modification des paramètres du générateur dans le climat futur simulé, risque d'interactions inattendues entre variables pouvant déboucher sur une amplification ou diminution artificielle de l'impact des changements climatiques.
 - Ajustement arbitraire des paramètres du générateur pour le climat futur

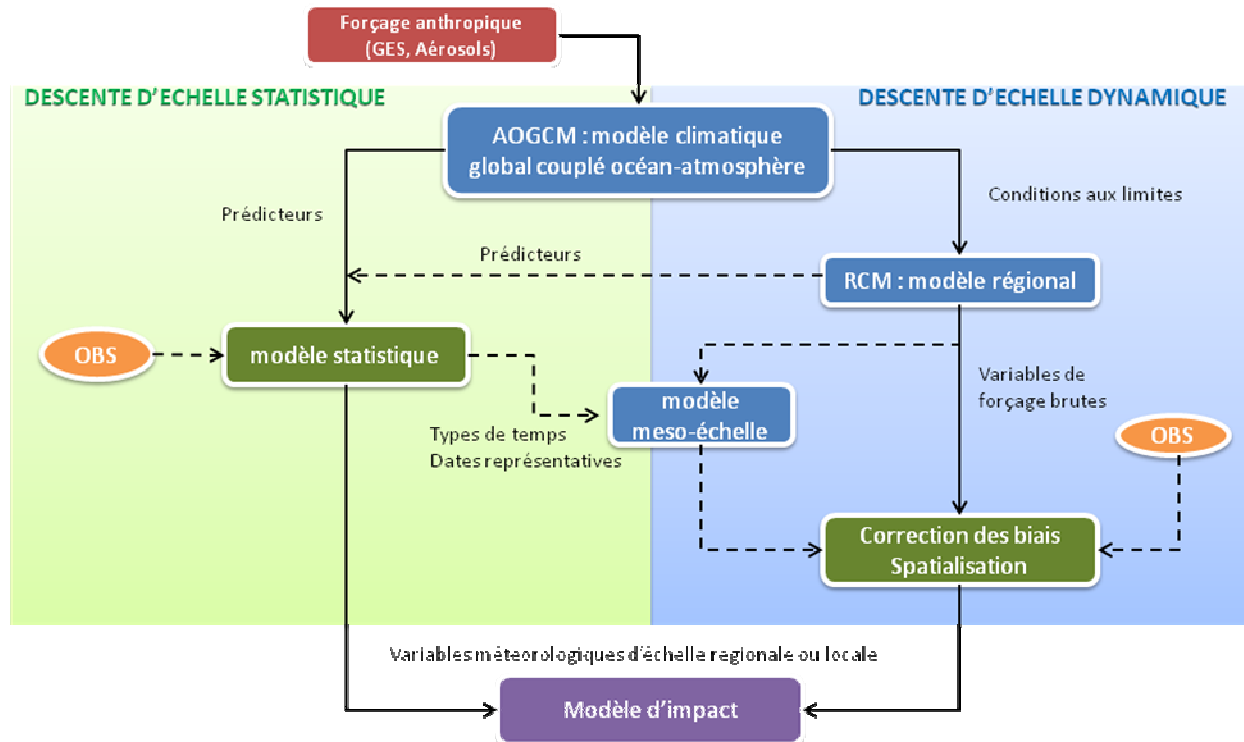
4.3 Combinaison des approches statistiques et dynamiques

La combinaison des approches statistique et dynamique peut se faire de deux façons :

- utilisation des sorties d'un modèle à méso-échelle pour développer les modèles statistiques
- identification de périodes d'intérêt par des méthodes statistiques (types de temps correspondant à des phénomènes extrêmes déterminés à partir d'indicateur de grande échelle) pour réaliser des simulations à haute résolution ou à résolution variable, afin d'obtenir des détails spatiaux sur ces périodes d'intérêt.

5. Synthèse et recommandations générales

5.1 Schéma récapitulatif : les différentes étapes d'une descente d'échelle climatique



5.2 Recommandations d'ordre générale pour la mise en œuvre d'une descente d'échelle climatique

5.2.1 Incertitudes

Le processus d'évaluation de l'impact du changement climatique rencontre un grand nombre de sources d'**incertitude** qui contribuent à l'incertitude finale. Ces incertitudes forment une série ou cascade liée aux étapes suivantes :

- Scénarios d'émission et conversion en termes de concentration
- Conversion de ces concentrations en forçage climatique
- Réponse de la modélisation du climat global ou régional aux forçages externes
- Incertitude intra-modèles (paramétrisations physiques, schéma de transport...)

- Conversion des paramètres de sorties brutes de modèles en paramètres exploitables pour l'étude d'impact (descente d'échelle statistique)
- Modélisation de l'impact
- Evolutions potentielles des conditions environnementales régionales et locales (e.g. occupation des sols, ...)

L'évaluation de l'impact du changement climatique nécessite la prise en compte de cette série d'incertitudes. Chaque étape du processus de descente d'échelle génère de l'incertitude qui se transmet à l'étape suivante.

La méthode utilisée pour obtenir des résultats à haute résolution introduit des incertitudes propres à la méthode elle-même : différents modèles régionaux (ou différentes méthodes de descente d'échelle statistiques) peuvent ainsi produire des résultats différents, même s'ils sont pilotés par le même modèle de grande échelle (Machenauer et al., 1998; Pan et al., 2001 ; Murphy, 1999, 2000). Jones et Page (2001), dans une étude sur les changements de ressource en eau au Sud-Ouest de l'Australie, montrent que les deux tiers du total de l'incertitude, dans les impacts sur les précipitations, sont dus aux différences entre les modèles globaux, et que l'incertitude dans le réchauffement global lui-même contribue à 25% de la variation.

L'incertitude liée à la modélisation haute résolution doit être évaluée par rapport aux effets d'autres incertitudes. Par exemple, ce serait une erreur de mettre des ressources considérables dans la préparation de l'information à haute résolution, si d'autres incertitudes, potentiellement plus significatives que les résultats, n'ont pas été estimées préalablement.

Des recherches ont identifié les incertitudes sur les scénarios d'émission et les incertitudes sur les réponses climatiques du modèle aux forçages externes, comme étant les deux parties principales de la cascade des incertitudes (Visser et al., 2000 ; Wigley et Raper, 2001). Cependant des programmes actuels comme PRUDENCE (Prévisions des 'scénarios' régionaux et Incertitudes pour la définition des risques et des effets du changement climatique en Europe) considèrent de multiples incertitudes incluant celles liées aux descentes d'échelle spatiale (Christensen et al., 2002).

Enfin, la mise en œuvre de plusieurs méthodes (statistiques ou dynamiques ou combinées) de descente d'échelle pour une même problématique, est une manière d'évaluer le degré de confiance que l'on peut accorder aux scénarios produits.

5.2.2 Validation des modèles globaux du climat (AOGCM)

Les AOGCMs sont le point de départ des techniques de régionalisation utilisées actuellement. Par conséquent, il est très important que les AOGCMs aient une bonne performance dans la simulation de la circulation de grande échelle et les traits climatiques qui affectent le ou les climats régionaux auxquels on s'intéresse.

L'amélioration des AOGCMs est une condition nécessaire pour une amélioration, à long terme, des projections du changement climatique régional. On peut cependant noter que l'amélioration d'un

modèle global doit être vu dans son ensemble et ne concerne pas uniquement ce qui se passe sur la région d'intérêt. Par exemple, certaines modifications sur le couplage sol/végétation/atmosphère apportées dans le modèle pourront améliorer son comportement dans certaines zones du globe mais le dégrader sur la région par manque d'observations des propriétés du sol raisonnablement fiables.

Comme signalé dans le chapitre précédent sur les incertitudes, l'évaluation de la performance du ou des modèles de grande échelle utilisés et de l'incertitude associée aux scénarios climatiques proposés par ces modèles est un pré-requis pour la mise en œuvre d'une technique de régionalisation en aval.

5.2.3 Descente d'échelle dynamique

De manière générale, l'approche dynamique, qu'on utilise des GCMs « haute-résolution » ou des RCMs, nécessite d'évaluer les performances du modèle utilisé. Cette évaluation se fait sur des périodes du climat passé. On vérifie sa capacité à reproduire les caractéristiques du climat régional auquel on s'intéresse et on évalue les biais transmis par l'AOGCM coupleur mais aussi les biais générés par le modèle régional lui-même. Il est également important de contrôler la cohérence spatio-temporelle entre les paramètres du RCM et ceux du modèle coupleur de grande échelle. Si des différences importantes apparaissent, il convient d'en comprendre la cause (processus physique identifiable, réponse à un forçage d'échelle régionale non pris en compte dans le modèle global ...). Cette étape est fondamentale pour évaluer le niveau de confiance que l'on peut accorder aux sorties brutes de ces modèles régionaux mais aussi pour évaluer la valeur-ajoutée potentielle de l'utilisation de méthodes statistiques pour corriger les biais constatés.

Compte-tenu du fait que différents RCMs donnent généralement des réponses variables au même forçage de grande échelle aux limites, de même qu'un RCM unique réagira différemment à différents forçages de grande échelle, l'approche multi-modèle est fortement recommandée pour évaluer une part de l'incertitude associée à la descente d'échelle dynamique. Dans la pratique, cette approche multi-modèle est difficile à mettre en œuvre car couteuse en ressources de calcul. Un effort particulier a d'ailleurs été produit, dans le cadre du 5^{ème} exercice du GIEC, pour fournir des scénarios régionaux en provenance de plusieurs modèles à aire limitée (cf. projet CORDEX).

Enfin, on peut signaler qu'il existe également des modèles régionaux hautes résolutions comme ALADIN-Climat qui permettent entre autres d'aborder la problématique du niveau des océans à l'échelle régionale avec pour limitation que seul l'effet de dilatation lié au réchauffement des océans est actuellement pris en compte.

Quelle est la valeur ajoutée des modèles régionaux ?

- Une des raisons de développer des modèles régionaux est de prendre en compte les effets du forçage à petite échelle, dans des régions caractérisées par une variabilité spatiale fine (relief et conditions de surface). Dans beaucoup de régions, la topographie et le couvert végétal affectent la distribution spatiale des variables climatiques et génèrent des

circulations atmosphériques qui ne sont pas décrites par les modèles globaux de type AOGCMs.

- L'augmentation de la résolution spatiale permet aussi une description améliorée des circulations atmosphériques, à l'échelle locale ou régionale : les systèmes synoptiques ou frontaux, les jets d'altitude, les processus de cyclogenèse, les ondes de gravité, les systèmes convectifs à méso-échelle, les brises de mer et les types de temps extrêmes (tempêtes tropicales). Les processus tels que la formation des nuages et des précipitations peuvent être améliorés par la résolution spatiale plus élevée.
- Les techniques de régionalisation peuvent aussi améliorer l'information du modèle de grande échelle (AOGCM), au niveau temporel : échelle journalière ou inférieure à la journée. Les modèles régionaux peuvent améliorer la simulation de la variabilité de la vitesse du vent de surface, de la fréquence de pluie quotidienne ou de la distribution de son intensité et d'une manière générale améliorer la simulation des valeurs extrêmes (si importantes en terme d'adaptation et de décisions associées).

5.2.4 Descente d'échelle statistique

Les lignes directrices avant de procéder à une descente d'échelle sont les suivantes :

- Considérer les objectifs de l'étude d'impact et la valeur ajoutée potentielle.
- Le temps et les ressources nécessaires à la mise en place d'une méthode de descente d'échelle sont-ils justifiés ou peut-on obtenir des résultats similaires en utilisant des méthodes plus simples (interpolation, modification des facteurs à partir des anomalies, ...)
- Etre conscient des forces et faiblesses des techniques de descente d'échelle
- Toujours garder en tête que : d'un côté, les méthodes statistiques sont intéressantes pour des études d'impacts dans des environnements hétérogènes (îles, zones montagneuses ou à fort contraste terre/mer); lorsqu'une échelle en points précis est demandée (inondations très localisées, phénomènes d'érosion, drainage urbain, ...); pour modéliser des prédictands exotiques (indices de canicule, périodes de floraison, hauteurs de vagues, ...). D'un autre côté, les méthodes statistiques nécessitent des données d'observations nombreuses, sont appliquées off-line (donc ne prennent pas en compte les interactions avec la surface) et supposent une stationnarité des relations entre prédictands et prédicteurs sur des périodes de plusieurs dizaines d'années.
- Incorporer la connaissance locale des processus dans le choix des prédicteurs. Prendre en compte le fait que la prédictabilité et les scores varient avec la saison, avec des conséquences sur le choix de la taille et du domaine des champs utilisés comme prédicteurs et selon les périodes d'enregistrement. Se souvenir que les prédicteurs idéaux sont

fortement corrélés avec le prédicteur, ont un sens physique, sont bien représentés par le modèle et capturent la variabilité multi-annuelle.

- Tester le modèle statistique sur une période indépendante ou a minima utiliser des méthodes palliatives (validations croisées, bootstrap, ...). Appliquer ensuite le modèle statistique à partir de simulations climatiques obtenues avec différents modèles pour estimer les incertitudes associées aux différents scénarios d'émission. Utiliser si possible des modèles régionaux (ou d'autres méthodes de descente d'échelle statistiques) en parallèle pour explorer les incertitudes dues à la méthode de descente d'échelle utilisée (en tenant compte du fait que le modèle régional n'est pas forcément meilleur).

Comment savoir si les méthodes de descente d'échelle statistiques sont appropriées à une étude d'impact ?

Les méthodes statistiques sont appropriées dans les cas suivants :

- environnement hétérogène avec forts gradients de relief, présence d'île ... lorsque les relations avec le forçage de grande échelle sont fortes
- pour générer des scénarios climatiques pour des processus à l'échelle locale comme les phénomènes d'érosion pour lesquels on ne peut utiliser d'autres approches
- pour disposer d'information à l'échelle sous-maille concernant certains événements extrêmes comme les vagues de chaleur, les fortes précipitations, les inondations localisées (avec les limitations concernant la qualité des résultats)
- lorsque les ressources en calculateur sont faibles.
- Lorsque les biais des modèles numériques sont trop importants sur la région concernée

Les méthodes statistiques ne sont pas appropriées dans les cas suivants :

- lorsque les données observées sont des séries non homogènes ou trop courtes
- lorsque le forçage de surface doit être pris en compte (lorsque les interactions avec la surface sont fortes et impactent les changements locaux de climat)
- lorsque les relations statistiques varient dans le temps (changement climatique des régimes de temps ou changements climatiques rapides).

6. Exemples de descentes d'échelle déjà mises en œuvre dans les pays de la COI

La Réunion :

Ajustement des données issues de la simulation ARPEGE 50km (scénario A2) par la méthode « quantile-quantile ».

Description de la méthode utilisée :

Déqué M., 2007 : Frequency of precipitation and temperatures extremes over France in an anthropogenic scenario : Model results and statistical correction according to observed values. Global and Planetary Change 57 (2007) 16-26.

Résultats obtenus :

Roy et al, 2009, Etude pour l'identification des évolutions et changements climatiques à La Réunion, Météo-France, DIRRE/BECLIM

Madagascar :

Utilisation d'une méthode de descente d'échelle de type « générateur de séries quotidiennes de précipitation » à partir d'une classification automatique réalisée sur des prédictors de grande échelle et des PDF de précipitation associés à chaque « type de temps ». L'étude a été menée par le Climat Systems Analyses Group d'Afrique du Sud.

Description de la méthode utilisée :

Hewitson, B. C. and R. G. Crane (2006). Consensus between GCM climate change projections with empirical downscaling: precipitation downscaling over South Africa. International Journal of Climatology 26(10): 1315-1337.

Résultats obtenus:

Madagascar Climate Report (2008) : CSAG (université de Cape Town) et Direction Générale de la Météorologie Madagascar.