

Approches méthodologiques et outils de l'évaluation des impacts des changements climatiques

Auteur : Amadou Idrissa BOKOYE
Spécialiste en climatologie, Environnement-Canada, Canada

Résumé : L'évaluation des impacts induits par le changement climatique fait appel à des formalismes méthodologiques et des outils appropriés pour leur mise en œuvre. Ces méthodes peuvent être régies par des approches croisées, sectorielles ou multisectorielles. La présente contribution s'inscrit dans le cadre de la dissémination de ces outils sous l'angle des recommandations de la convention cadre des Nations Unies sur les CC. Les outils les plus représentatifs liés aux approches multisectorielles et croisées ainsi que ceux relatifs à des secteurs spécifiques comme l'agriculture, le secteur de l'eau, la santé humaine ou les ressources côtières sont présentés. La génération de données climatiques à haute résolution spatio-temporelle servant d'entrées aux modèles d'impacts constitue une étape cruciale de l'application méthodologique. Selon plusieurs études, l'Afrique reste, en raison de ses caractéristiques climatiques et économiques une des régions les plus vulnérables au CC. De ce fait, un portrait et une perspective africaine quant à l'utilisation et le développement des outils considérés ici sont présentés. Les méthodes statistiques de réduction d'échelle (passage de la donnée globale à la régionale ou locale) plus appropriées à ce contexte régional et qui présentent l'avantage d'être moins onéreuses en terme de coût de mise en œuvre sont utilisées. Une étude de cas d'application à l'évaluation du cycle hydrologique et de la température en terme de comparaison de modèles est présentée et discutée.

DESCRIPTION SOMMAIRE DES MÉTHODES DE MISE A ECHELLE STATISTIQUE (MAS)

Amadou I. Bokoye

Environnement Canada @ Ouranos Inc.

Montréal (Québec)
Canada

Novembre 2007

1. Introduction

La mise à l'échelle statistique (MAS) est un ensemble de méthodes qui permet de générer de l'information climatique ou de changement climatique de haute résolution spatiale à partir de données de modèles climatiques globaux (MCG) de résolution spatiale relativement grossière. Les MCGs ont typiquement des résolutions de l'ordre de 150-400 km x 150-400 km. Les méthodes de MAS visent à répondre aux besoins des études et applications en impacts et adaptation climatiques qui nécessitent de l'information à l'échelle de l'ordre de 50 km ou moins. Le principe de MAS repose sur l'établissement de relations entre les variables observées à l'échelle locale (souvent à l'échelle de la station climatique) [prédicteurs] et les variables caractéristiques de la circulation générale à large échelle (MCG) [prédicteurs]. Contrairement à la MAS dynamique (modélisation régionale du climat) qui nécessite des ressources informatiques importantes pour la modélisation numérique, la mise à l'échelle statistique s'avère moins onéreuse et s'opère rapidement sur des ordinateurs de type PC. La MAS permet de générer de longues séries temporelles de variables à partir de données d'observation et de MCG(s). La considération de plusieurs MCGs est de nature à contribuer à l'évaluation des incertitudes associées aux simulations climatiques dans le cadre du GIEC.

Une des limitations importantes de la MAS est la nécessité d'avoir une longue série d'observations à la station pour les variables d'intérêt. Les relations empiriques prédictant-prédicteurs peuvent être élaborées à partir de plusieurs méthodes: méthodes de régression linéaire, méthodes de classification synoptique du temps (CST) ou "Weather Typing", les méthodes basées sur les générateurs stochastiques de conditions météorologiques et les méthodes d'interpolation. La section suivante décrit ces différentes méthodes auxquelles sont associées des hypothèses. La section 3 résume les outils de MAS disponibles ou qui peuvent être disponibles au public. Une bibliographie relative aux contributions majeures pour chaque méthode de MAS considéré est présentée en section 4.

2. Les méthodes de mise à échelle statistique

- **Les méthodes de régression linéaire**

Les méthodes de MAS basées sur la technique de régression linéaire sont les suivantes: La régression linéaire multiple, les réseaux de neurones, l'analyse de corrélation canonique et le krigeage.

- La régression linéaire multiple

Pour un prédicteur donné, cette méthode permet de déterminer une relation empirique entre celui-ci et un ensemble de prédicteurs connus couvrant une période d'observation dite d'étalonnage. Les meilleurs coefficients l'équation de régression linéaire multiple correspondent à ceux qui minimisent l'écart quadratique moyen entre prédicteur estimé et observé sur la période ci-dessus. La variance expliquée permet de mesurer la qualité de la relation prédicteur-prédicteur établie. Une des difficultés associée à la méthode est la délicatesse du choix des prédicteurs. Il existe une alternative à la sélection manuelle et judicieuse des prédicteurs; celle-ci est la régression par étape ou "stepwise regression". Celle-ci-consiste à opérer une sélection automatique des prédicteurs en établissant dans une première étape, une équation de régression prédicteur-prédicteurs avec chaque élément de

l'ensemble des prédicteurs. Le prédicteur affichant l'erreur minimum est ainsi choisi comme premier prédicteur. Soit N le nombre total de prédicteurs. En deuxième étape, les N-1 prédicteurs sont considérés pour établir une équation de régression avec chacun des N-1 prédicteurs avec le prédicteur de l'étape 1. Le deuxième prédicteur est choisi avec l'équation qui correspond à l'écart quadratique moyen minimum. Le processus est ainsi répété à chaque étape en ajoutant un prédicteur à partir de ceux qui ne sont pas utilisés. La pertinence de l'ensemble des prédicteurs sélectionnés peut se mesurer avec une opération de validation avec les observations hors de la période d'étalonnage. Généralement on considère la période 1961-1990 ou 1961-1975 pour la construction du modèle de régression linéaire multiple (fonction de transfert) et respectivement 1991-2000 ou 1976-1990 pour la validation du modèle.

Les avantages, inconvénients et hypothèses associés à la méthode sont les suivants:

- Avantages
 - Application par étapes clairement identifiées
 - Utilisation du potentiel d'un ensemble de prédicteurs
 - Logiciel disponible gratuitement
 - Études de cas au Québec (Gachon et al., 2005)
- Inconvénients
 - Pauvre représentation de la variance
 - Données supposées normale et/ou linéaire
 - Pauvre représentation des extrêmes (comparativement aux échelles statistiques) et de la variance
- Hypothèses
 - Les prédicteurs sont des variables appropriés et sont raisonnablement modélisables par le MCG
 - La fonction de transfert est valide dans le futur
 - Les prédicteurs choisis représentent pleinement le signal de changement climatique
- LOCI

Cette méthode de MAS connue souvent sous le nom de LOCI (Local Intensity scaling factor) est basée sur la considération du champ de précipitation comme prédicteur principal. Cette variable est censée intégrer une bonne partie des prédicteurs de la circulation atmosphérique. Un rapport d'échelle défini par le rapport de l'intensité de précipitation observée à celle simulée par un MCG est calculé pour corriger celui-ci en terme de biais. Les autres variables comme la température sont calculées à partir de ce rapport d'échelle qui peut-être mensuel ou quotidien. La méthode peut servir de référence pour les études d'inter-comparaison des méthodes de MAS (Schmidli et al., 2006 ; Salathé, 2003). La méthode s'avère moins performante que la modélisation dynamique et régionale du climat dans les localités avec une topographie conséquente.

- La régression canonique

La méthode MAS basée sur l'analyse de corrélation canonique (ACC) peut-être perçue comme un cas général de la régression linéaire multiple. L'ACC permet d'étudier la relation entre un ensemble de variables dépendantes et un ensemble de variables indépendantes. La corrélation canonique est optimisée de façon à ce que la corrélation entre

les deux ensembles de variables soit maximale. Cependant, contrairement à la régression multiple, il y a plusieurs variables dépendantes et, par conséquent, il y a plus d'une façon de relier les deux ensembles. Toutefois, chaque nouvelle représentation est non corrélée avec les précédentes. L'ACC se distingue de la régression linéaire multiple par la possibilité de considérer plusieurs prédicteurs simultanément.

L'ACC présente globalement les mêmes avantages, inconvénients et hypothèses associés à méthode de régression linéaire.

- Le réseau de neurones artificiel

La MAS par réseau de neurones artificiel (RNA) est basée sur des modèles à l'image du fonctionnement du réseau de neurone chez l'humain. Ces modèles apparaissent comme une boîte noire permettant l'estimation d'un nombre de paramètres à partir des paramètres des prédicteurs, les deux ensembles sont reliés par des relations non-linéaires entre prédicteur et prédicteurs. Les modèles de réseau de neurones ont généralement une structure de type entrée-espace caché-sortie (input-hidden-output). Le principal avantage du RNA en MAS est que la fonction de transfert initial du système a besoin d'être choisi et par la suite tous les paramètres se déterminent à partir d'une séquence d'apprentissage sur la période d'étalonnage considéré.

A titre d'inconvénients, le RNA s'avère compliqué comme méthode et n'offre pas tous des résultats faciles à interpréter. De nombreuses applications des RNA ont été réalisées l'occurrence au Canada notamment en hydrologie et variabilité du climat: Coulibaly et al. (2000, 2001) et Dibike et al. (1999, 2002).

- **Les méthodes de classification synoptique du temps**

La MAS basée sur la circulation atmosphérique à l'échelle synoptique s'appuie sur le principe de classification synoptique du temps (CST) et l'établissement de fonction de transfert prédicteur-prédicteurs pour chaque type de temps. La classification synoptique du temps (CST) ou "Weather Typing" est une méthode algorithmique qui est capable de distinguer différentes configurations météorologiques typiques. La classification est l'ensemble des techniques dont le but est de discriminer des groupes d'objets avec deux catégories principales: haute homogénéité interne (au sein de chaque classe) et haute hétérogénéité externe (entre les classes). Les premiers concepts de CST ont été élaborés par Baur et al. (1944) et Lamb (1972). Aujourd'hui, la méthode connaît une revitalisation avec le débat sur les changements climatiques et le développement de prédicteurs avec la modélisation globale.

Il existe principalement deux types de "Weather Typing" en terme d'approches:

- l'approche analogie temporelle (Zorita et al., 1995 ; Martin et al., 1997) où la classification est conduite de façon à choisir les prédicteurs en fonction du degré de similitude des états synoptiques passés avec l'état courant. Cette approche s'avère efficace pour la construction de séries temporelle de type multi-sites et multi-variables. Cette approche a été appliquée avec un certain succès à la qualité de l'air et les événements météorologiques extrêmes du centre-sud du Canada (Cheng et al., 1993-2006).
- L'approche qui classifie la distribution spatiale de l'occurrence des patrons de précipitation en utilisant une approche stochastique de chaîne de Markov où ce

dernier est associé à un type de temps synoptique ou état synoptique. Le processus stochastique de chaîne de Markov peut comporter plus d'un ordre. Avec l'ordre 1 l'état au temps t dépend de l'état au temps $t-1$, pour l'ordre 2 l'état au temps t dépend de l'état au temps $t-1$ et $t-2$ ainsi de suite. Le passage de l'état de veille à l'état courant s'exprime par des probabilités conditionnelles. Il existe une alternative à l'approche ci-dessus et elle est basée sur des chaînes de Markov non-homogènes où les probabilités sont conditionnées par des prédicteurs atmosphériques et varient ainsi dans le temps contrairement au cas précédent avec un ordre donné pour la chaîne de Markov. Des détails sur la CST et les chaînes de Markov peuvent être trouvés dans les articles suivants pour ne citer que ceux-là: Zucchini and Guttorp (1991), Hughes and Guttorp (1994), Hughes et al. (1999), Charles et al. (1999), Bellone et al. (2000), Charles et al. (2003) and Charles et al.(2004), Robertson et al. (2004).

Quelle que soit l'approche en CST, une relation est développée entre prédictant et prédicteurs autrement dit entre l'échelle synoptique et l'échelle locale. Cette relation repose entre autres sur l'hypothèse de l'invariance temporelle c'est-à-dire que le modèle statistique développé sur la période historique ou courante restera valable dans le futur.

La MAS via la CST présente l'avantage de:

- générer des résultats physiquement interprétables en lien avec la circulation atmosphérique et le climat de surface
- être approprié pour l'analyse des extrêmes climatiques
- être applicable à plusieurs domaines: qualité de l'air, santé, météorologie,

La tâche additionnelle de classification synoptique et la possibilité de non-capture de la variabilité au sein de chaque type de temps constituent les limites généralement associées à cette méthode.

• Les générateurs stochastiques de conditions météorologiques

Un générateur stochastique de conditions météorologiques ou "Weather Generator" (WG) est un modèle qui reproduit les attributs statistiques (moyenne et variance) d'une variable climatique considérée à l'échelle locale (Wilby et al., 2004). La variable de sortie de ce type de modèle est une série chronologique artificielle de données météorologiques à très haute résolution temporelle à la limite des ressources informatiques.

Il existe deux types de générateurs stochastiques. Le type « Richardson » (Richardson, 1981; Richardson et Wright, 1984) ou WGEN et le type « en série » (Racsko et al., 1991; Semenov et al., 1998) ou LARS-WG.

WGEN se caractérise par la modélisation de la variable considérée à l'aide de chaîne de Markov qui décrit généralement deux états comme sec ou humide pour la précipitation. Une modélisation de type ordre 1 de chaîne de Markov prend en compte l'état courant et l'état veille de la variable considérée. Des modèles plus complexes peuvent prendre en compte jusqu'à trois états (faible, moyenne et élevé) ou plus. La méthode de Markov fournit de l'information sur les probabilités conditionnelles de passage d'un état à l'autre (par exemple dans le cas de la précipitation c'est la probabilité qu'un jour humide suive un jour sec ou sur la probabilité qu'un jour humide suive un jour humide) calculées à partir des données d'observation de la station. Les séquences d'états en l'occurrence la distribution des jours humides dans le cas de la précipitation est modélisée à partir d'une fonction préalablement définie comme la distribution gamma ou des distributions exponentielles

mixtes. En général c'est l'occurrence de la précipitation qui est modélisée en première instance et les variables climatiques restantes sont alors calculées en fonction de leurs corrélations les unes avec les autres et du statut humide ou sec de chaque jour.

Les générateurs stochastiques de conditions météorologiques sont limités quant à prédire avec précision la durée des séquences sèches ou humides importante pour bien des domaines comme l'agriculture. Une alternative pour s'affranchir de cette limite est le générateur de type série (LARS-WG) qui modélise les jours secs et humides relativement à la précipitation, les autres variables comme la température sont déduites à partir des modèles de jours secs et humides. WGEN se distingue de LARS-WG par le fait que le second utilise un modèle de distribution empirique à la place de la distribution prédéfinie utilisée dans le premier cas. Ainsi la précision de la modélisation augmente [Semenov et al. (1998)] de l'utilisation directe des observations pour élaborer le modèle séquentiel de distribution d'un état plutôt que l'ajustement d'une distribution prédéfinie aux observations.

Dans le domaine des scénarios climatiques et de la MAS, les générateurs stochastiques de conditions météorologiques sont utilisés pour générer des chroniques météorologiques à l'échelle quotidienne pour répondre aux besoins en étude d'impact et adaptation au climat. De grandes incertitudes sont associées aux données quotidiennes des MCG avec une résolution grossière de plusieurs centaines de kilomètres. Ces incertitudes sont de moindre nature avec l'information mensuelle à partir de laquelle, il reste possible de générer de l'information quotidienne à partir d'un générateur stochastique de conditions météorologiques comme LARS-WG. Ce dernier outil a été spécialement conçu pour générer des scénarios climatiques via la MAS. On peut relever plusieurs études relatives à la génération de scénarios climatiques à l'échelle locale via les générateurs stochastiques de conditions météorologiques: Wilks and Wilby, 1999; Semenov and Barrow, 1998; Mearns et al., 1996 et Katz et Parlange, 1998.

La MAS via un générateur stochastique de conditions météorologiques stochastique de conditions météorologiques présente l'avantage d'être très efficace pour la MAS temporelle avec une capacité de générer de l'information climatique à l'échelle locale via une fonction de transfert entre paramètres de distribution statistique du prédictant considéré et les variables de la circulation atmosphérique à grande échelle. Et ceci avec une très haute résolution temporelle qui peut-être sub-quotidienne (Kilsby et al., 1998 ; Fowler et al., 2000).

A l'instar des autres méthodes décrites ci-dessus, les paramètres du modèle du générateur stochastique sont déterminés sur une période d'entraînement à partir des observations. Le modèle ainsi défini est ensuite validé sur autre fenêtre temporelle des observations.

Les limites associées aux générateurs stochastiques de conditions météorologiques relativement à la MAS restent l'ajustement arbitraire des paramètres pris en compte pour le climat futur et l'incidence des paramètres de modélisation de l'occurrence des précipitations sur les autres variables comme la température.

- **La méthode des deltas**

La méthode des deltas reste encore la procédure la plus populaire pour générer des scénarios climatiques à l'échelle locale ou pour une région d'intérêt. On considère d'abord une climatologie de référence pour le site ou la région d'intérêt. Selon l'application considérée, cette climatologie peut-être représentative de moyenne à long-terme (1961-1990) ou les enregistrements météorologiques à l'échelle quotidienne. Le changement moyen ou delta correspondant à un point de grille du MCG proche du site d'intérêt est ensuite calculé en considérant la différence des moyennes (généralement sur une base mensuelle) des valeurs de la variable considérée entre une projection future et la climatologie de référence. Cette

différence est ensuite ajoutée aux observations quotidiennes du mois considéré à la station considérée et sur la période de référence.

La méthode des deltas intègre aussi bien des détails de la climatologie de la station considérée que le changement régional moyen spécifique à la variable considérée et le point de grille du MCG considéré.

Il convient de noter que pour le champ de précipitation, le champ d'observation considéré au niveau local est multiplié par le rapport des moyennes mensuelles du climat futur et de référence.

Les avantages et les inconvénients associés à la méthode sont les suivantes:

➤ **Avantages:**

- Mise en œuvre relativement rapide du fait de la disponibilité des données de simulations (modèle climatique + scénarios d'émission) associés à plusieurs MCGs
- Méthode opérationnelle à Ouranos
- Possibilité de générer des scénarios sur de longues périodes de l'ordre de 100 ans.

Faiblesses:

- L'hypothèse selon laquelle les biais du MCG calculé pour la période de référence sont les mêmes que pour le futur
- La distribution spatiale du climat de référence est supposée constante dans le futur
- La variabilité climatique et la distribution statistique de la variable considérée restent inchangées (i.e. identiques à la période de référence).

3. Les outils de mise à échelle statistique

La présente section donne une description sommaire (données d'entrée, données de sortie, caractéristiques) des outils de réduction d'échelle et d'analyse climatique à partir de données d'observation à la station et de MCGs.

SDSM (Statistical DownScaling Method)	
Description	Logiciel usuel avec interface graphique pour la génération de scénarios climatiques aux échelles de la station climatique et quotidienne
Méthodologie	Régression linéaire multiple, générateur stochastique de conditions météorologiques
Utilisation	Fourniture de projection climatique pour les études d'impact. Nécessité d'avoir des données d'observation de haute qualité, de données de réanalyse (NCEP) et des variables de circulation atmosphérique (prédicteurs) des MCGs.
Échelle d'application	Station climatique, tout domaine
Entrée(s) principales	Données de haute qualité en observation quotidienne à l'échelle locale et des données à large-échelle de modèles climatiques globaux (MCG). Données MCG pour le futur comme entrée pour le modèle de réduction d'échelle (fonction de transfert)
Sorties(s) principales	Série quotidienne (scénarios) de température minimum, de température maximum ou de précipitation... et des paramètres statistiques : variances, fréquences, extrêmes,...
Facilité d'utilisation	Logiciel assez facile d'utilisation. Le manuel utilisateur est très compréhensible et pratique
Formation nécessaire	Connaissance sommaire en science du climat mais une certaine expertise est nécessaire pour l'analyse et l'interprétation des sorties
Formation disponible	Aucune
Exigence informatique	PC avec le système Windows
Documentation	De nombreuses publications dans la littérature scientifique
Applications	Applications dans plusieurs domaines en études d'impacts Applications dans plusieurs régions
Contact, Acquisition et documentation	Les usagers peuvent télécharger les documents associés à : https://copublic.lboro.ac.uk/cocwd/SDSM/ .
Coût	Logiciel gratuit

ASD (Automatic Statistical Method)	
Description	Logiciel en langage matlab avec sélection automatique de l'ensemble de prédicteurs pour la génération de scénarios climatiques aux échelles de la station climatique et quotidienne
Méthodologie	Régression linéaire multiple, générateur stochastique de conditions météorologiques
Utilisation	Fourniture de projection climatique pour les études d'impact. Nécessité d'avoir des données d'observation de haute qualité, de données de réanalyse (NCEP) et des variables de circulation atmosphérique (prédicteurs) des MCGs.
Échelle d'application	Station climatique, tout domaine en étude d'impact
Entrée(s) principales	Données de haute qualité en observation quotidienne à l'échelle locale, données de réanalyse (NCEP ou ERA40) et des données à large-échelle de modèles climatiques globaux (MCG). Données MCG pour le futur comme entrée pour le modèle de réduction d'échelle (fonction de transfert)
Sorties(s) principales	Série quotidienne (scénarios) de température minimum, de température maximum ou de précipitation... et des paramètres statistiques : variances, fréquences, distributions
Facilité d'utilisation	Logiciel assez facile d'utilisation. Le manuel utilisateur est très compréhensible et pratique
Formation nécessaire	Connaissance sommaire en science du climat mais une certaine expertise est nécessaire pour l'analyse et l'interprétation des sorties
Formation disponible	Convention d'utilisation possible
Exigence informatique	PC avec le système Windows
Documentation	Voir publication ASD
Applications	Applications dans plusieurs domaines en études d'impacts Applications dans plusieurs régions
Contact, Acquisition et documentation	Les usagers peuvent acquérir le logiciel en écrivant à : philippe.gachon@mail.mcgill.ca
Coût	Gratuit mais avec convention d'utilisation non disponible à date

Clim.pact (Climate analysis and empirical-statistical downscaling (ESD) package)	
Description	Logiciel en R comprenant un ensemble de routines pour l'analyse climatique et la mise à échelle statistique
Méthodologie	Régression linéaire multiple, analyse de corrélation canonique, analyse en composante principale, ...
Utilisation	Fourniture de scénarios climatiques aux échelles mensuelles et quotidiennes. Nécessité d'avoir des données d'observation de haute qualité et des variables de circulation atmosphérique (prédicteurs) des MCGs.
Échelle d'application	Station climatique, tout domaine
Entrée(s) principales	Données de haute qualité en observation quotidienne à l'échelle locale, de données de réanalyse et des données à large-échelle de modèles climatiques globaux (MCG). Données MCG pour le futur comme entrée pour le modèle de réduction d'échelle (fonction de transfert)
Sorties(s) principales	Série quotidienne (scénarios) de température minimum, de température maximum ou de précipitation avec correction de biais... et des paramètres statistiques : variances, fréquences, extrêmes,...
Facilité d'utilisation	Manuel utilisateur disponible. Connaissance de R nécessaire
Formation nécessaire	Connaissance sommaire en science du climat mais une certaine expertise est nécessaire pour l'analyse et l'interprétation des sorties
Formation disponible	Aucune.
Exigence informatique	Serveur linux/Unix, PC avec le système Windows
Documentation	De nombreuses publications dans la littérature scientifique
Applications	Applications dans plusieurs domaines en études d'impacts Application en Europe
Contact, Acquisition et documentation	Contact: Rasmus Benestad : rasmus.benestad@met.no Documentation: http://cran.r-project.org/doc/packages/clim.pact.pdf Téléchargement : http://cran.rproject.org/src/contrib/Descriptions/clim.pact.html
Coût	Logiciel gratuit

Weaclim (Weather Climatology)	
Description	Logiciel en Matlab d'analyse, de transformation et de génération de séries quotidiennes à partir de la classification synoptique du temps pour la mise à échelle statistique
Méthodologie	Méthode analogique, classification synoptique du temps et mise à l'échelle locale, ...
Utilisation	Génération de scénarios climatiques quotidiens de précipitation. Nécessité d'avoir des données d'observation de haute qualité, de réanalyse et des variables de circulation atmosphérique (prédicteurs) des MCGs.
Échelle d'application	Station climatique, tout domaine climat et étude d'impact
Entrée(s) principales	Données de haute qualité en observation quotidienne à l'échelle locale et des données à large-échelle de modèles climatiques globaux (MCG). Données MCG pour le futur comme entrée pour le modèle de réduction d'échelle (fonction de transfert)
Sorties(s) principales	Série quotidienne (scénarios) de précipitation
Facilité d'utilisation	Pas de manuel utilisateur
Formation nécessaire	Connaissance sommaire en science du climat mais une certaine expertise est nécessaire pour l'analyse et l'interprétation des sorties
Formation disponible	Aucune.
Exigence informatique	Matlab sous linux ou Matlab sous système Windows
Documentation	publications de Moron et al.
Applications	Applications à l'étude du régime des précipitations Application en Afrique
Contact, Acquisition et documentation	Contact: Vincent Moron, Université de Marseille (France)
Coût	Logiciel gratuit (voir site www.mathworks.com)

LARS-WG (LARS-WG stochastic weather generator)	
Description	Logiciel pour la génération de série temporelle de variable climatique à une station climatique donnée
Méthodologie	Générateur stochastique de conditions météorologiques
Utilisation	Évaluation des risques climatiques en agriculture et en hydrologie. Possibilité de dériver de l'information climatique pour des sites sans observation. Génération de scénarios climatiques à moindre coup et à haute résolution temporelle.
Échelle d'application	Station climatique, hydrologie, agriculture,...
Entrée(s) principales	Données de haute qualité en observation quotidienne à l'échelle locale et des données à large-échelle de modèles climatiques globaux (MCG). Données MCG pour le futur comme entrée pour le modèle de réduction d'échelle (fonction de transfert)
Sorties(s) principales	Série quotidienne ou sub-quotidienne (scénarios) de variable climatique
Facilité d'utilisation	Documentation associée au logiciel est un bon guide
Formation nécessaire	Connaissance sommaire en science du climat mais une certaine expertise est nécessaire pour l'analyse et l'interprétation des sorties
Formation disponible	Aucune.
Exigence informatique	PC Windows
Documentation	De nombreuses publications dans la littérature scientifique
Applications	Études d'impact en agriculture et hydrologie dans plusieurs régions du monde
Contact, Acquisition et documentation	www.rothamsted.bbsrc.ac.uk/mas-models/larswg.php
Coût	Logiciel gratuit

4. Bibliographie

- **Méthodes de régression linéaire**

- Coulibaly, P., Anctil F. et Bobée. B. 2001. Multivariate reservoir inflow forecasting using temporal neural networks. *Journal of Hydrologic Engineering*, ASCE, 6(5), 367-376.
- Coulibaly, P., Anctil, F., Ramussen, P. et Bobée, B. 2000. A recurrent neural networks approach using indices of low-frequency climatic variability to forecast regional annual runoff. *Hydrological Processes*, 14(15), 2755-2777.
- Dibike, Y.B., 2002, Developing generic hydrodynamic models using artificial neural networks, *Journal of Hydraulic Research*, Vol.40, No.2 pp. 183-190.
- Dibike, Y.B. Solomatine, D. and Abbott, M.B. 1999. On the encapsulation of numerical-hydraulic models in artificial neural network, *Journal of Hydraulic Research*, 37, No.2 pp. 147-161.
- Dibike Y. B. and Coulibaly P., 2006. Temporal Neural Networks for Downscaling Climate Variability and Extremes, *Neural Networks (Special issue on Earth Sciences and Environmental Applications of Computational Intelligence)*, Vol. 19, No. 2, pp. 135-144.
- Dibike Y. B., Gachon P., St-Hilaire A., Ouarda T. B.M.J. and Nguyen V-T-V. (in press, 2007). Uncertainty Analysis of Statistically Downscaled Temperature and Precipitation Regimes in Northern Canada, *Theoretical and Applied Climatology* (available online, DOI 10.1007/s00704-007-0299-z)
- Gachon P. and Dibike Y. B. 2007. Temperature change signals in northern Canada: Convergence of statistical downscaling results using two driving GCMs, *International Journal of Climatology*, 27(12): pp. 1623-1641.
- Wilby, R.L., Dawson, C.W. and Barrow E.M., 2002. SDSM - a decision support tool for the assessment of regional climate change impacts, *Environmental Modelling & Software*, 17, 147– 159.

- **Méthodes LOCI**

- Schmidli J, Frei C, Vidale PL 2006. Downscaling from GCM precipitation: a benchmark for dynamical and statistical downscaling. *Int J. Climatol.* 26:679–689.
- Salathé, Eric P., Jr.2003. Comparison of various precipitation **downscaling** methods for the simulation of streamflow in a rainshadow river basin. *International Journal of Climatology*, 23(8).887-901.

- **Méthodes de classification synoptique du temps**

- Baur, F., Hess, P. and Nagel, H.: 1944, 'Kalender der Grobwetterlagen Europas 1881–1939'. Bad Homburg, FRG.
- Brazel, A., et al., 2007. Determinants of changes in the regional urban heat island in metropolitan Phoenix (Arizona, USA) between 1990 and 2004. *Climate Research*, 22, 171-182.
- Dixon, P.G., and T.L. Mote, 2003. Patterns and causes of Atlanta's Urban at-Island Precipitation. *Journal of Applied Meteorology*, 42, 1273-1284.

- Dolney, T.J., and S.C. Sheridan, 2006. The relationship between extreme heat and ambulance calls for the city of Toronto, Ontario, Canada. *Environmental Research*, 101, 94-103.
- Dyer, J.L. and T.R. Mote, 2007. Trends in snow ablation over North America. *International Journal of Climatology*, 27, 739-748.
- Charles, S., Bates, B., and Hughes, P. 1999. A spatio-temporal model for downscaling precipitation occurrence and amounts. *J. Geoph. Res.*, 104, 31657-31669.
- Charles, S., Bates, B. and Vilney, N. 2003. Linking atmospheric circulation to daily rainfall patterns across the Murrumbidgee River Basin, *Water Science and Technology*, 48, 223-240.
- Charles, S. Bates, B., Smith, I. and Hughes, P. 2004. Statistical downscaling of daily precipitation from observed and modeled atmospheric fields. *Hydrological Process*, 18, 1373-1394.
- Cheng, S.C., Campbell, M., Li, Q, Auld, H., Day, N., Pengelly, D., Gingrich, S., and Yap, D. 2006. A Synoptic Climatological Approach to Assess Climatic Impact on Air Quality in South-central Canada. Part I: Historical Analysis. *Water Air Soil Pollut.* doi 10.1007/s11270-006-9327-3.
- Cheng, S. C. & Campbell, M., LI, Q., Li, G., Auld, H., Day, N., Pengelly, D., Gingrich S., Yap D. 2006. A Synoptic Climatological Approach to Assess Climatic Impact on Air Quality in South-central Canada. Part II: Future Estimates. *Water Air Soil Pollut.* doi 10.1007/s11270-006-9326-4.
- Cheng S., Ye H., and Kalkstein LS. 1992: An evaluation of pollution concentrations in Philadelphia using an automated synoptic approach. *Middle States Geographer*, 25, 45–51.
- Cheng, S and Kalkstein LS, 1993. An evaluation of climate change in Phoenix using an automatic synoptic climatological approach. *World Resource Review*, 5, 180–189.
- Cheng, S and Kalkstein LS, 1997. Determination of climatological seasons for the East Coast of the U.S. using an air mass-based classification. *Climate Research*, 8, 107–116.
- Cheng, S and Lam KC, 1998. An analysis of winds affecting air pollution concentrations in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 32, 2559–2567.
- Cheng, S. and Lam K.C, 2000. Synoptic typing and its application to the assessment of climatic impact on concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong. *Atmospheric Environment*, 34, 585–594.
- Cheng S, Auld H, Li G, Klaassen J, Tugwood B, Li Q, 2004. An automated synoptic typing procedure to predict freezing rain: An application to Ottawa, Ontario, Canada. *Weather and Forecasting*, 19, 751–768.
- Cheng, S and Kin-Che Lam. 2000. Synoptic typing and its application to the assessment of climatic impact on concentrations of sulfur dioxide and nitrogen oxides in Hong Kong. *Atmospheric Environment.*, 34(5), 585-594.
- Grundstein, A., 2003: A synoptic-scale climate analysis of anomalous snow water equivalent over the Northern Great Plains of the USA. *International Journal of Climatology*, 23, 871-886.
- Hartz, M., De Dear, R. and Hyde, R. 2006. A Synoptic climatology of tropospheric ozone episodes in Sydney, Australia. *Int. J. Climatol.* 26: 1635–1649. doi: 10.1002/joc.1332.
- Hughes, J.P., Guttorp P. and Charles, S. 1999. A nonhomogeneous hidden Markov model for precipitation occurrence. *J R. Stat. Soc. Ser C*, 48, 15-30.

- Kalkstein, A.J. and R.C. Balling Jr., 2004. Impact of unusually clear weather on United States daily temperature range following 9/11/2001. *Climate Research*, 26, 1-4.
- Kalkstein, L.S., J.S. Greene, D.M. Mills, A.D. Perrin, J.P. Samenow, and J.-C. Cohen, 2007: The development of analog European heat waves for U.S. cities to analyze the impacts on heat-related mortality. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88, in press.
- Kalkstein, L.S., C.D. Barthel, M.C. Nichols, and J.S. Greene, 1996. A New Spatial Synoptic Classification: Application to Air Mass Analysis, *International Journal of Climatology*, 16:983-1004.
- Lamb HH.1972. British Isles weather types and a register of the daily sequence of circulation patterns, 1861–1971. Meteorological Office, *Geophysical Memoir*, No. 116. HMSO, London.
- Leathers, D.J., D.Y. Graybeal, T. Mote, 2004. The role of air mass types and surface energy fluxes in snow cover ablation in the central Appalachians. *Journal of Applied Meteorology*, 43, 1887-1898.
- Leathers, D.J., T.L. Mote, A.J. Grundstein, D.A. Robinson, K. Felter, K. Conrad, L. Sedywitz, 2002: Associations between continental-scale snow cover anomalies and air mass frequencies across eastern North America. *International Journal of Climatology*, 2,. 1473-1494.
- Makra, L, Juhász, M, Mika, Janos, Bartzokas, A, Béczi R. and Sümegehy, Z. 2006. An objective classification system of air mass types for Szeged, Hungary, with special attention to plant pollen levels. *International Journal of Biometeorology*, 50(6), pp 403-421.
- Martin E, Timbal B, Brun E. 1997. Downscaling of general circulation model outputs: simulation of the snow climatology of the French Alps and sensitivity to climate change. *Clim Dyn*, 13:45–56.
- McGregor, G.R., D. Bower, D. Hannah, S.C. Sheridan, 2007. Development of a Spatial Synoptic Classification Scheme for Western Europe. *International Journal of Climatology*, 9999(9999), 24 pp.
- Merrill, R.M., E.C. Shields, G.L. White Jr., D. Druce, 2005. Climate conditions and Physical Activity in the United States. *American Journal of Health Behavior*, 29, 371-381.
- Michelozzi P., et al, 2006. Temperature and summer mortality: geographical and temporal variations in four Italian cities. *Journal of Epidemiology and Community Health*, 60, 417-423.
- Morabito, M. et al. 2006. Winter air mass based synoptic climatological approach and hospital admission for myocardial infarction in Florence, Italy. *Environmental Research*, 102, 52-60.
- Moron, V., Robertson, A. W., Ward, M. N., N'Diaye, O. 2006. Weather Types and Rainfall over Senegal. Part I: Observational Analysis. *Journal of climate*. Submitted.
- Power, H.C., S.C. Sheridan, and J.C. Senkbeil, 2006. Synoptic climatological influences on the spatial and temporal variability of aerosols over North America. *International Journal of Climatology*, 26, 723-741.
- Rainham, D.G.C., K.E. Smoyer-Tomic, S.C. Sheridan, and R.T. Burnett. 2005. Synoptic weather patterns and modification of the association between air pollution and human mortality. *International Journal of Environmental Health Research*, 15, 347-360.

- Robertson, A.W., Kirshner,S. and Smyth,P. 2004. Downscaling of daily rainfall occurrence over Northeast Brazil using a Hidden Markov Model, *J. Climate*, 17, 4407-4424.
- Robinson, P.J., 2006. Implications of long-term precipitation amount changes for water sustainability in North Carolina. *Physical Geography*, 27, 286-296.
- Senkbeil, J.C. and S.C. Sheridan. 2007. The sensitivity of tree growth to air mass variability and the Pacific Decadal Oscillation in coastal Alabama. *International Journal of Biometeorology*, 51, 483-492.
- Sheridan, C. The redevelopment of a weather type classification scheme for north America. 2002. *Int. J. Climatol.* 22, 51–68. doi: 10.1002/joc.709.
- Sheridan, S.C. 2003. North American weather-type frequency and teleconnection indices. *International Journal of Climatology*, 23, 21-45.
- Sheridan, S.C. 2004. The development of heat-warning systems for cities worldwide. In *WorldMinds: Geographical Perspectives on 100 Problems*, Association of American Geographers, D.G. Janelle, B. Warf, K. Hansen, eds., 487-492.
- Sheridan, S.C. and T.J. Dolney. 2003. Heat, mortality, and level of urbanization: Measuring vulnerability across Ohio, USA. *Climate Research*, 24, 255-265.
- Sheridan, S.C. and L.S. Kalkstein, 2004. Progress in Heat Watch-Warning System Technology. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85, 1931-1941.
- Sheridan, S.C. and L.S. Kalkstein. 2004. A synoptic Climatological approach to separate weather- and pollution-induced impacts on human mortality. *Epidemiology*, 15, S40.
- Sheridan, S.C, H.C. Power, and J.C. Senkbeil. 2007. A further analysis of the spatio-temporal variability in aerosols across North America: incorporation of lower-tropospheric flow. *International Journal of Climatology*, in press.
- Zorita E, Hughes JP, Lettemaier DP, von Storch H. 1995. Stochastic characterization of regional circulation patterns for climate model diagnosis and estimation of local precipitation. *J. Clim*, 8:1023–1042.
- Zucchini, W. and Guttorp, P. 1991. A hidden Markov model for space-time precipitation. *Water Resour. Res.*, 27, 1917-1923.

- **Générateurs stochastiques de conditions météorologiques**

- Bellone, E., Hughes,J.P. and Guttorp, P. 2000. A hidden Markov model for relating synoptic scale patterns to precipitation amounts. *Climate Research*, 15, 1-12.
- Fowler, H. J., C. G. Kilsby, et al. 2000. A stochastic rainfall model for the assessment of regional water resource systems under changed climatic conditions. *Hydrology and Earth System Sciences* 4(2): 263-282.
- Hughes, J.P. and Guttorp,P. 1994. A class of stochastic models for relating synoptic atmospheric patterns to regional hydrologic phenomena. *Water Resour. Res.* 30, 1535-1546.
- Katz, R. W. and M. B. Parlange.1998. Overdispersion phenomenon in stochastic modeling of precipitation. *J. Climate*, 11, 591–601.

- Kilsby, C. G., Cowpertwait, P.S.P., O'Connell, P.E. and Jones, P.D., 1998. Predicting rainfall statistics in England and Wales using atmospheric circulation variables. *Int. J. Climatol.*, 18, 523–39.
- MacDonald, I. and Zucchini, W. 1997. *Hidden Markov and other models for discretevalued time series models*. Chapman & Hall, London.
- Mearns, L.O., C. Rosenzweig, and R. Goldberg. 1996. The effect of changes in daily and interannual climatic variability on CERES-Wheat: A sensitivity study. *Clim. Change* 32:257–292.
- Racsco, P., Szeidl, L. et Semenov, M.A. 1991. A serial approach to local stochastic weather models. *Ecological Modelling* 57, 27-41.
- Richardson, C.W. 1981. Stochastic simulation of daily precipitation, temperature and solar radiation. *Water Resources Research*, 17, 182-190.
- Richardson, C.W. et Wright, D.A. 1984. *WGEN: a model for generating daily weather variables*. US Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-8, 83 pp.
- Semenov, M.A., Brooks, R.J., Barrow, E.M. et Richardson, C.W. 1998. Comparison of the WGEN et LARS-WG stochastic weather generators for diverse climates. *Climate Research*, 10, 95-107.
- Wilks, D.S., and R.L. Wilby, 1999. The weather generation game: a review of stochastic weather models. *Progress in Physical Geography*, 23, 329-357.