
L'UTILISATION D'ENSEMBLES DE SIMULATIONS CLIMATIQUES SUR MODELES DE CIRCULATION GENERALE DE L'ATMOSPHERE

CONCEPTS, METHODES ET APPLICATION A LA CLIMATOLOGIE DE L'ESPACE SUD-AFRICAIN

Fauchereau Nicolas : Centre de Recherches de Climatologie, UMR5080 CNRS–Université de Bourgogne, 6 Bd Gabriel, 21000 Dijon, Tel : 03 80 39 38 22, Fax : 03 80 39 57 41
nicolasf@u-bourgogne.fr

Richard Yves : Centre de Recherches de Climatologie, UMR5080 CNRS–Université de Bourgogne, 6 Bd Gabriel, 21000 Dijon, Tel : 03 80 39 38 22, Fax : 03 80 39 57 41
yrichard@u-bourgogne.fr

RÉSUMÉ. Les séries (ensembles) de simulations longues sur modèles numériques de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGA) - réalisées par la communauté des physiciens de l'atmosphère – offrent au géographe climatologue plusieurs informations relatives à la variabilité du climat complétant l'analyse des séries observées.

L'étude présentée ici se base sur un ensemble de 8 simulations longues (de 1948 à 1997) réalisées sur le MCGA français ARPEGE Climat - Version 3 (Centre National de Recherches Météorologiques). Ces simulations utilisent comme conditions aux limites l'énergie solaire et les champs de Températures de Surface de la Mer. Ces dernières varient en fonction des observations mensuelles et sont donc la principale source de la variabilité interannuelle du forçage exercé sur l'atmosphère.

Les principaux concepts (variabilité forcée de l'atmosphère versus variabilité interne ou « chaotique », prévisibilité de l'atmosphère) sont d'abord exposés. Les méthodes statistiques utilisées (Analyse de Variance, Analyse en Composantes Principales étendue) sont ensuite rapidement présentées. L'exemple donné concerne l'étude de la variabilité et de la prévisibilité des précipitations en Afrique Australe.

ABSTRACT. Series (ensembles) of long-term simulations on Atmospheric General Circulation Models (AGCM) – realized by the atmosphere physicists community - give to the physical geographer several informations on climate variability which complete those given by the study of observed time-series.

The study presented here is based on 8 simulations realized on the French AGCM ARPEGE Climat – release 3 (National Center for Meteorologic Research). These simulations use as boundary conditions the solar flux and the monthly varying Sea-Surface-Temperature fields, which are the main forcing source for the interannual variability of the Atmosphere.

The basic concepts (forced versus internal – “chaotic” – atmospheric variability, atmospheric predictability) are first exposed. The statistical methods (Analysis of Variance, extended Principal Component Analysis) are then rapidly presented. The example given concerns the study of rainfall variability and predictability over Southern Africa.

MOTS-CLÉS : climatologie, modélisation, prévisibilité, précipitations, Afrique Australe

KEY WORDS : climatology, modelling, predictability, rainfall, Southern Africa

« Le modèle est une représentation schématique de la réalité élaborée en vue de l'expliquer, ou encore de la comprendre et de la faire comprendre » (Durand-Dastès, 1992a). « Modéliser c'est réduire, et il n'y a pas de construction de la connaissance sans modélisation » (Chamussy et Uvietta, 1992). En climatologie, dont l'objet est l'étude des variables climatiques et atmosphériques, ainsi que de leurs combinaisons, plusieurs types de modèles sont développés. Les modèles géostatistiques ont pour but soit l'interpolation spatiale de variables connues ponctuellement (krigeage, co-krigeage, variogrammes, ...), soit la prévision (saisonniers des précipitations, quotidienne de la qualité de l'air, ...). Moins nombreux, car nécessitant plus de moyens (tant humains que de calcul) sont les modèles numériques. Parmi eux on distingue les modèles dédiés à des espaces bornés latéralement (modèles régionaux ou méso-échelle) ou des modèles intégrant l'ensemble de l'atmosphère : les Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGA). Tous les MCGA sont une représentation des processus atmosphériques se basant sur les équations de la thermodynamique de l'atmosphère et la paramétrisation de certains processus (convection, nuages, ...). Si l'on se réfère aux oppositions binaires caractérisant tous les modèles (Durand-Dastès, 1992b), les MCGA sont agrégés (et non désagrégés), déterministes (et non probabilistes) et dynamiques (et non statiques). En climatologie, les utilisations les plus fréquentes des MCGA sont :

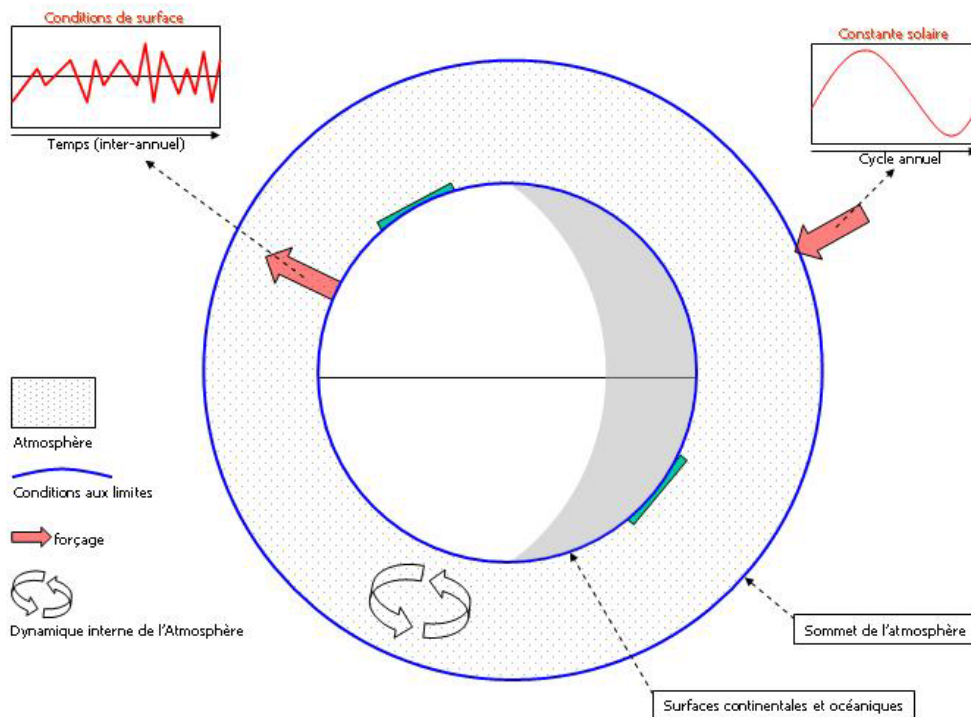
- La validation, par comparaison entre données simulées et observées en vue d'améliorer le modèle ;
- Les expériences de sensibilité aux changements dans la représentation des processus ;
- Les expériences de sensibilité aux forçages extérieurs à l'atmosphère (Trzaska et Richard, 2000), en modifiant les conditions aux limites : le rayonnement solaire ou les conditions de surface (continentale ou/et océanique) ;
- Les expériences de sensibilité aux forçages internes à l'atmosphère, en modifiant sa composition chimique (gaz à effet de serre et aérosols d'origine anthropique ou naturelle). Ces expériences sont utilisées pour simuler le changement climatique attendu au cours du XXI^{ème} siècle ;
- Des simulations permettant des reconstructions paléoclimatiques.

1 Les concepts

1.1 Le concept de forçage

Une grande partie des simulations relevant des trois derniers types repose sur le concept de « forçage ». Le schéma suivant illustre celui-ci de façon synthétique :

Figure1 : L'atmosphère et les conditions aux limites dans un MCGA



Les conditions aux limites sont d'une grande importance. Au sommet de l'atmosphère, celles-ci sont essentiellement l'énergie solaire reçue, variant selon la latitude et le cycle annuel. D'une année sur l'autre, cette énergie est considérée comme fixe (« constante » solaire). Ses variations (*e.g.* du fait des paramètres orbitaux de la Terre) deviennent sensibles aux échelles de temps de l'ordre du millénaire. Par contre, à la base de l'atmosphère, les conditions de surface continentale et océanique varient d'une année sur l'autre. Parmi elles, les Températures de Surface Océanique (TSO) sont particulièrement importantes car, sur 71% de la surface du globe, elles constituent la « mémoire » du système climatique grâce à l'inertie thermique des océans. En cela elles ont un potentiel prédictif à l'échelle de la saison. Ce fait a ainsi motivé de nombreux travaux se plaçant dans le cadre de la climatologie diagnostique. Cette climatologie analyse fréquemment les relations statistiques entre des variables atmosphériques, comme les précipitations continentales, et les conditions de surface. On peut considérer que l'évolution temporelle d'une variable climatique (les précipitations par exemple) consiste en la combinaison linéaire d'une **composante forcée** en réponse aux conditions aux limites variant en fonction du temps (et donc potentiellement prévisible) et d'une **composante interne** à l'atmosphère, non linéaire, chaotique¹.

1.2 Les ensembles de simulations

L'estimation du rapport entre ces deux composantes (forcée par la TSO et interne à l'atmosphère) est impossible par l'analyse des séries observées : dans le monde réel on ne dispose que d'une seule réalisation du système climatique. Si l'on disposait d'un nombre infini de réalisations, la composante de l'évolution du système atmosphérique déterminée par le forçage externe dépendant du temps serait tout simplement la partie commune à tous les membres de cet hypothétique ensemble infini de réalisations (la « moyenne » de cet ensemble, (Venzke *et al.*, 1999). Dans la réalité, on se tourne vers un **ensemble** fini de J réalisations climatiques. Leurs conditions aux limites (constante solaire, TSO) sont similaires. En revanche leurs conditions initiales (état de l'atmosphère au départ de la simulation) sont différentes.

Dans cette étude, l'ensemble consiste en 8 simulations (« runs ») réalisées sur le MCGA Arpège-Climat version 3 cycle 18 (Centre National de Recherches Météorologiques) par L. Terray et C. Cassou du Centre Européen de Recherche et de Formation avancée en Calcul Scientifique (CERFACS, 1998). Ces 8 « runs » ont les mêmes conditions aux limites : constante solaire d'une part, TSO et extension de glace observées de janvier 1948 à décembre 1997 d'autre part. Ces deux derniers éléments varient donc d'une année sur l'autre. Les observations (fichier GISST 2.3b du UKMO) consistent en la compilation de données *in-situ* (bateaux) et de mesures satellitales. Les valeurs des différents paramètres atmosphériques ont été extraites sur une grille gaussienne d'environ 2.8 degrés de latitude sur 2.8 degrés de longitude, sur 31 niveaux verticaux, ce au pas de temps mensuel.

2 Méthode

A partir de cet ensemble de runs, l'estimation de la variance forcée d'une série ou d'un champ atmosphérique, par rapport à la variance interne, dérive de l'Analyse de Variance (ANOVA) mise en œuvre en expérimentation agricole afin de déterminer s'il existe un effet catégoriel sur une variable quantitative (Trzaska, 2002). Ici J est le nombre de catégories (*i.e.* le nombre de simulations) : 8. n est le nombre d'échantillons dans chaque catégorie, soit le nombre d'observations, par exemple pour des cumuls saisonniers, $n = 49$ ou 50 ans.

La variance totale de l'ensemble est définie par :

$$\text{var}_{\text{totale}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J (x_{ij} - \bar{x}_{\infty})^2$$

Avec \bar{x}_{∞} étant la moyenne de toutes les observations sur toutes les catégories (climatologie de l'ensemble).

La variance totale est partitionnée en variance intra-catégories (représentant la variance liée à la dynamique interne de l'atmosphère) et variance inter-catégories (variance forcée par les TSO), ces deux quantités étant estimées sans biais respectivement par :

¹ Noter que cette hypothèse est réductrice, car dans un système non linéaire la variabilité interne et la composante forcée peuvent *interagir*. Par exemple, la réponse à une configuration particulière d'anomalies de TSO peut être une augmentation de la *variabilité* des trajectoires de tempêtes, sans effet notable sur le flux moyen.

$$\text{var}_{\text{intra}} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J (x_{ij} - \bar{x}_{i_o})^2$$

Pour la variance intra-catégories, avec \bar{x}_{i_o} étant la moyenne de toutes les observations pour chacune des catégories (climatologies de chaque run de l'ensemble) et :

$$\text{var}_{\text{inter}} = \sum_{i=1}^n (\bar{x}_{i_o} - \bar{x}_{o_o})^2 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^J (x_{ij} - \bar{x}_{i_o})^2$$

Pour la variance inter-catégories. La part de variance forcée est alors définie par le coefficient de détermination :

$$R^2 = \frac{\text{var}_{\text{inter}}}{\text{var}_{\text{inter}} + \text{var}_{\text{intra}}}$$

3 Application à la variabilité des précipitations en Afrique Australe

L'exemple présenté concerne le cas de la variabilité pluviométrique en Afrique Australe. Si cet espace n'a pas été le cadre de forts changements depuis 50 ans en termes de volumes précipités, il n'en présente pas moins des éléments indiquant que la variabilité pluviométrique est une question fondamentale (Camberlin *et al.*, 2002) :

- Sa **variabilité pluviométrique** interannuelle (déficits / excédents) importante qui fait peser des sévères contraintes sur les ressources en eau, la production alimentaire, le développement économique et la protection des écosystèmes naturels ;
- Sa **situation géographique**, entre les latitudes tropicales (où la variance forcée est potentiellement plus forte du fait de la nature quasi-stationnaire de la circulation divergente) et les latitudes extratropicales (où la variance interne est potentiellement plus forte à cause de la nature transitoire de la circulation tempérée) ;
- L'existence reconnue de **relations statistiques** entre la variabilité des précipitations et celle des TSO d'échelles globale (El Niño – Southern Oscillation – ENSO) ou régionale (Océan Indien et Atlantique). Ces relations sont complexes, par exemple, la relation statistique avec l'ENSO est modulée à différents pas de temps : inter-décennal à inter-annuel (Richard *et al.*, 2000).

Etant donné le caractère intégrateur et discret (dans le temps et dans l'espace) des précipitations, il y a une certaine dépendance au pas de temps considéré. Ici des cumuls saisonnier sur 3 mois sont calculés (ASO, SON, ..., MAM). Cette méthode permet de déterminer la distribution spatiale et temporelle (*i.e.* au cours du cycle annuel) de la part de la variabilité des précipitations forcée par les TSO. On spatialise une quantité (exprimée en pourcentage) relative à la prévisibilité potentielle des précipitations.

Les valeurs maximales de variance forcée par les TSO n'excèdent pas 60 %. Elles se situent aux latitudes tropicales, mais présente de fortes variations en fonction de la saison.

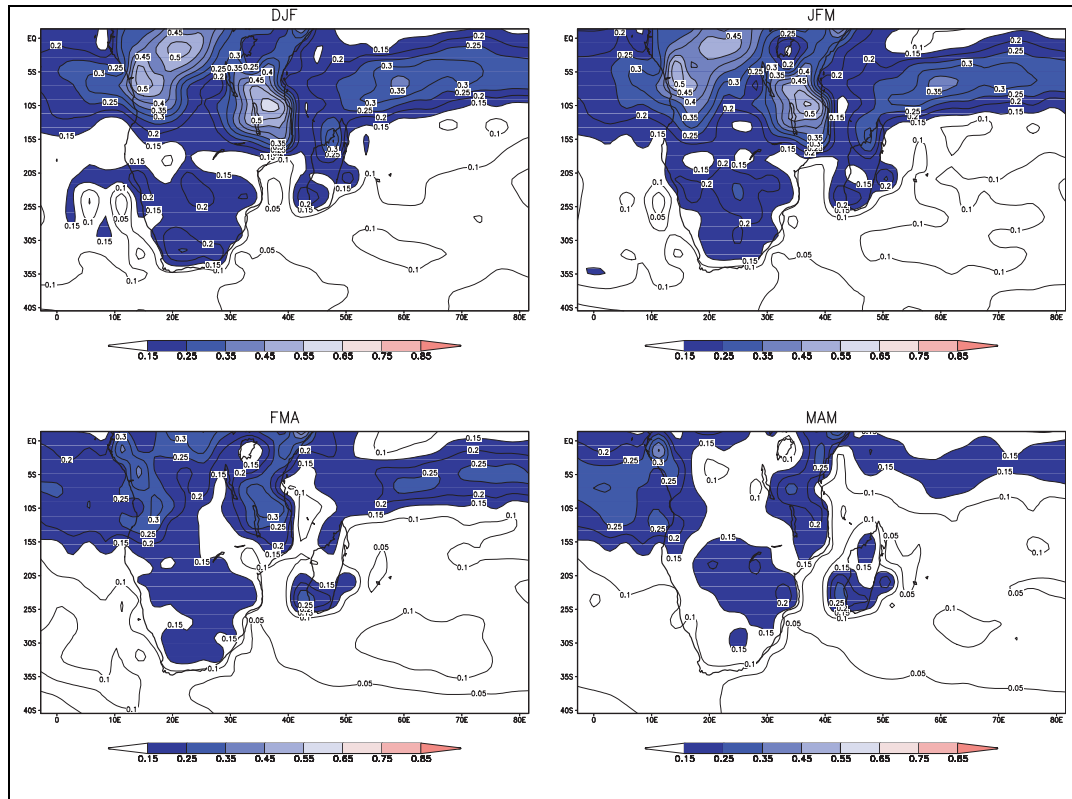
En automne boréal (SON) les parts les plus fortes concernent le Kenya, de l'Ouganda. Ce point est cohérent avec les études montrant que les « short rains », plus que les pluies des autres saisons, sont fortement influencées par les TSO d'échelle régionale (Beltrando et Camberlin, 1995 ; Richard *et al.*, 1998). Au fur et à mesure de l'avancée de la saison, la part de variance forcée diminue sur cette région. Deux noyaux s'individualisent successivement au-dessus du Kenya, de la Tanzanie, du Mozambique à l'Est et de l'Angola, du Congo, de l'ouest du Zaïre à l'Ouest. Aux latitudes subtropicales, la part de variance forcée par les TSO est faible pendant la 1^{ère} partie de la saison des pluies (SON, OND) puis augmente pour atteindre plus de 15 % (localement > 20 %) en deuxième partie de saison avec un maximum en DJF, saison au sein de laquelle la cohérence saisonnière de la variabilité pluviométrique interannuelle est maximale (Richard *et al.*, 2002). A partir de FMA, les parts de variance forcée baissent nettement, notamment sur les régions tropicales préalablement caractérisées par de forts pourcentages.

Globalement, les valeurs, notamment sur les régions subtropicales, peuvent paraître peu élevées, mais il faut rappeler le fait que, à l'opposé d'un champ continu comme par exemple la pression, les précipitations sont par nature discrètes dans le temps et dans l'espace. En outre elles sont le résultat de l'intégration de plusieurs champs de « 1^{er} ordre » (*i.e.* elles sont liées plus dépendantes de la physique du modèle que le champ de pression par exemple).

Des analyses supplémentaires (non-montrées), basées sur des méthodes multivariées (ACP étendue), indiquent que le mode forcé dominant de la variabilité interannuelle des précipitations de décembre à février présente une signature spatiale similaire à celle obtenue dans l'observation (*e.g.* Goddard and Graham, 1999). Cette signature spatiale en forme de « tripôle », oppose d'une part Afrique Australe Ouest tropicale et dans une moindre mesure

Afrique Australe subtropicale à l' Afrique Australe Est tropicale d'autre part, montrant ainsi de façon cohérente les poids les plus forts là où les parts de variance forcées sont importantes en moyenne à cette saison.

Figure 2 : part de variance des précipitations saisonnières en Afrique Australe forcée par les TSO



4 Conclusion

L'application de l'Analyse de Variance sur un ensemble de simulations climatiques sur Modèle de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGA) forcées par les mêmes Températures de Surface de l'Océan (TSO) observées, permet d'évaluer la prévisibilité potentielle d'un champ atmosphérique, exprimée en pourcentage de la variance totale. Appliquée aux précipitations saisonnières en Afrique Australe (Sud de l'équateur), elle montre de fortes variations spatiales et saisonnières de ce potentiel. Les parts de variances forcées par les TSO sont logiquement plus fortes aux latitudes tropicales, mais deviennent non négligeables (eut égard à la nature discrète des précipitations) aux latitudes subtropicales en fin de saison des pluies (DJF). Des études supplémentaires indiquent que le mode dominant de la variabilité des précipitations forcé par les TSO présente une signature spatiale cohérente avec l'observation ainsi qu'avec la distribution spatiale des parts de variance forcée montrée plus haut.

En perspective, l'utilisation de méthodes multivariées, dérivées de l'Analyse en Composantes Principales ou de méthodes de classifications, ouvre la possibilité d'évaluer année par année l'intensité du forçage des TSO sur les précipitations, ainsi que de caractériser sa signature spatiale.

BIBLIOGRAPHIE

- BELTRANDO G. CAMBERLIN P., (1995). Les Sécheresses en Ethiopie et dans l'est de l'Afrique. *Sécheresse*, **6**, 87-94.
- CAMBERLIN P., BELTRANDO G., FONTAINE B., RICHARD Y. (2002). Pluviométrie et crises climatiques en Afrique Tropicale : changements durables ou fluctuations interannuelles ? *Historiens et Géographes*, **379**, 263-273.
- CHAMUSSY H., UVIETTA P., (1992). Du nombre à la structure (Modèles numériques et modèles quantitatifs). *Géopoint*, **92**, 59-62.
- DURAND-DASTES F., (1992a). Questions sur les modèles. *Géopoint*, **92**, 9-17.
- DURAND-DASTES F., (1992b), Les modèles en géographie. In *Encyclopédie de géographie*, Economica, Paris, 1132 p.
- GODDARD, L. et N. E. GRAHAM (1999). Importance of the Indian Ocean for simulating rainfall anomalies over eastern and southern Africa." *Journal of Geophysical Research*, **104**(D16): 19099-19116.
- RICHARD Y., CAMBERLIN P. BELTRANDO G., (1998). Recherche de structures spatio-temporelles en climatologie : l'exemple de la variabilité pluviométrique en Afrique orientale. *L'Espace Géographique*, **27**, 31-40.
- RICHARD Y., CAMBERLIN P., FAUCHEREAU N., MULENGA H., (2002). Cohérence intrasaisonnière de la variabilité pluviométrique interannuelle en Afrique du Sud. *L'Espace Géographique*, **31**, 63-72.
- RICHARD Y., TRZASKA S., ROUCOU P., ROUAULT M., (2000). Modification of the Southern African rainfall variability /El Niño Southern Oscillation relationship. *Climate Dynamic*, **16**, 883-895.
- TRZASKA S., RICHARD Y., (2000). Utilisation des Modèles de Circulation Générale en climatologie - Application à la variabilité interannuelle des précipitations en Afrique. Actes du colloque *Géopoint 2000 L'explication en géographie*, 81-87.
- TRZASKA, S. (2002). Impacts des anomalies de TSO globales sur l'atmosphère tropicale dans la région péri-Atlantique dans ARPEGE-Climat. Application à la variabilité climatique en Afrique de l'Ouest et en Afrique Australe. *Thèse de 3^{ème} cycle*, Géographie - option climatologie. Université de Bourgogne
- VENZSKE, S., M. R. ALLEN, R.T. SUTTON et D.P. ROWELL (1999). The Atmospheric Response over the North Atlantic to Decadal Changes in Sea Surface Temperatures. *Journal of Climate* **12**: 2562-2584.