



HAL
open science

Etudes climatiques régionales Applications à la variabilité pluviométrique en Afrique australe et orientale et à la qualité de l'air en Bourgogne

Yves Richard

► **To cite this version:**

Yves Richard. Etudes climatiques régionales Applications à la variabilité pluviométrique en Afrique australe et orientale et à la qualité de l'air en Bourgogne. Géographie. Université de Bourgogne, 2004. tel-00447543

HAL Id: tel-00447543

<https://theses.hal.science/tel-00447543>

Submitted on 15 Jan 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Etudes climatiques régionales

Applications à la variabilité pluviométrique en Afrique australe et orientale et à la qualité de l'air en Bourgogne



Synthèse d'activité scientifique pour un dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches

Yves RICHARD

Université de Bourgogne 06 février 2004

Rapporteurs : Gérard Beltrando, Pr. Université de Paris VII
Serge Janicot, DR IRD LODYC
Claude Kergomard, Pr, Ecole Normale Supérieure

Examineurs : Annick Douguédroit, Pr. Université d'Aix-Marseille I
Bernard Fontaine, DR CNRS Université de Bourgogne
Jocelyne Pérard, Pr. Université de Bourgogne
Mathieu Rouault, Chef de Projet Université de Cape Town

Tome 1 : Dossier scientifique



Remerciements

Mes remerciements les plus sincères sont adressés à toutes les personnes avec qui j'ai eu le plaisir de collaborer autour des thématiques développées dans ce document. Je pense en particulier à :

Bernard Fontaine, qui m'accueille depuis 10 ans dans l'équipe qu'il dirige, qui privilégie toujours le dialogue et la collégialité des décisions, qui apporte sa rigueur scientifique, son enthousiasme et son dynamisme, et qui a accepté de me prodiguer ses conseils pour élaborer ce document.

Gérard Beltrando, Annick Douguédroit, Serge Janicot, Claude Kergomard, Jocelyne Pérard Mathieu Rouault, qui ont accepté de lire ce document et de me faire part de leurs critiques constructives.

Pierre Camberlin, Jean-Pierre Chabin, Pascal Roucou, collègues du CRC et du département de géographie qui contribuent chaque jour à rendre notre métier d'enseignant-chercheur plus riche, plus stimulant et moins conflictuel.

Gérard Beltrando, Laurent Bergonzini, Sylvain Bigot, Pierre Camberlin, Jean-Pierre Chabin, Pascale Chevrant, M'baye Diop, Nicolas Fauchereau, Bernard Fontaine, Françoise Gasse, Constant Houndenou, Marie-Laure Houzé, Nathalie Long, Ion-Florin Mihailecu, Valérie Mannone, Clotilde Marcel, Sandrine Monteiro, Henry Mulenga, Romuald Mbayi, Vincent Moron, Nathalie Philippon, Olivier Planchon, Isabelle Pocard, Mathieu Rouault, Pascal Roucou, Josyane Ronchail, Armelle Santiago, Bruno Siéja, Serge Taboulot, Denis Thévenin Sylwia Trzaska, Gilles Valentin-Smith, Sandrine Virost et Yan Zhao, avec qui préparer un article ou une communication fut un exercice passionnant que je souhaite renouveler autant que faire se peut.

Pascale Chevrant, Serge Taboulot et Denis Thévenin (Météo France), Pierre Deléaz, Sandrine Monteiro et Bruno Siéja (réseaux de surveillance de la qualité de l'air), Thierry Castel (ENESAD) pour le soutien logistique, financier et scientifique aux recherches sur la qualité de l'air.

Nicolas Fauchereau, Marie-Laure Houzé, Isabelle Pocard pour les collaborations accompagnant les recherches doctorales que j'ai co-encadrées ou que je co-encadre, et à tous les étudiants qui ont effectué ou effectuent leur maîtrise ou leur DEA sous ma direction et sans qui un grand nombre de résultats présentés ici ne seraient pas.

Michèle Dalby, Karine Hernandez, Pascal Oettli et Corinne Quintar, qui au quotidien font que le CRC est un lieu où le matériel fonctionne, les livres et les revues sont rangés, les comptes sont tenus, le site web est mis à jour, les plantes sont arrosées et le café ne manque pas !

Nicole pour la traque aux coquilles et à Véronique, Pablo, Anita et Boris.

Organisation

1. Dossier d'HDR

Mes recherches effectuées depuis le Doctorat (1993) ne correspondent pas toutes à un projet préalablement établi et scrupuleusement respecté. Hormis pour les travaux relatifs à l'Afrique australe, effectuer une synthèse reviendrait à trouver une cohérence *a posteriori*. Néanmoins, ce dossier d'Habilitation à Diriger des Recherches (HDR) offre l'opportunité d'analyser l'ensemble de ces recherches.

Le tome 1 constitue le dossier scientifique et administratif.

Le tome 2 regroupe les copies de mes publications, classées selon le plan du tome 1.

Le tome 3 regroupe les éléments pédagogiques et administratifs.

2. Dossier scientifique (tome 1)

L'analyse concerne principalement (4 chapitres sur 5) les recherches dévolues à un espace : l'Afrique. Les précipitations en Afrique australe y occupent une place prépondérante. Des études sur l'Afrique orientale et l'Afrique de l'Ouest sont également analysées. Elles viennent généralement éclairer les travaux portant sur l'Afrique australe, en montrant la particularité de ce sous-continent au sein de l'Afrique. L'articulation entre les chapitres suit une logique temporelle. Les aspects intra-saisonniers de la variabilité pluviométrique sont présentés dans le premier chapitre à caractère essentiellement descriptif. Le second traite des variations interannuelles de la pluviométrie au travers de leur impact sur la végétation et de leurs liens avec la température de surface océanique, la convection et la dynamique de l'atmosphère. Le troisième met en évidence des phénomènes d'échelle décennale dans la pluviométrie ainsi qu'en son lien avec les variations de niveau de quelques grands lacs d'Afrique orientale. Il s'attache à en donner des éléments d'interprétation. Le quatrième ouvre la question du changement pluviométrique en Afrique du Sud, question replacée dans le contexte d'augmentation anthropogénique des gaz à effet de serre.

Le cinquième chapitre présente des travaux portant sur des régions françaises ou européennes et sur des variables plus diversifiées : climatiques ou de composition chimique de l'atmosphère. Il regroupe des études relatives aux précipitations en Dobroudja roumaine et à la qualité de l'air en Bourgogne.

Dans le dossier scientifique, chaque chapitre est structuré en deux ou trois axes au sein desquels sont présentés a/ les objectifs, b/ les résultats et c/ les perspectives. Les références des travaux appelés dans le texte figurent en bibliographie, en fin de tome 1. Les articles auxquels j'ai contribué sont signalés en **bleu**, précédés du numéro qui leur est affecté dans le tome 3, et placés à la fin de chaque chapitre en fonction de leur ordre d'appel dans le texte, qui correspond à celui de leur présentation dans le tome 2. Les communications auxquelles j'ai participé sont signalées en **bleu-vert** et également précédées de leur numéro du tome 3.

Sommaire

Remerciements.....	2
Organisation.....	3
Sommaire.....	4
Avant propos.....	5
Introduction.....	11
I Afrique.....	11
II Dobroudja et Bourgogne.....	15
<i>Note : Les chapitres 1 à 4 concernent l'Afrique, et essentiellement l'Afrique australe</i>	
Chapitre 1 : Aspects spatiaux et saisonniers de la variabilité pluviométrique.....	16
Axe 1 : Sécheresses.....	19
Axe 2 : Structures spatiales.....	24
Axe 3 : Cohérence intra saisonnière.....	27
Conclusions principales.....	32
Publications.....	33
Chapitre 2 : Variabilité interannuelle.....	34
Axe 1 : Impact sur la végétation.....	35
Axe 2 : Liens avec la Température de Surface Océanique.....	39
Axe 3 : Convection et dynamique de l'atmosphère.....	47
Conclusions principales.....	53
Publications.....	54
Chapitre 3 : Variabilité décennale.....	55
Axe 1 : Changements dans la relation précipitation / hydrologie.....	56
Axe 2 : Caractéristiques de la variabilité pluviométrique décennale.....	60
Axe 3 : Expliquer le changement d'impact des ENSO.....	68
Conclusions principales.....	74
Publications.....	75
Chapitre 4 : RSA : changements pluviométriques.....	76
Axe 1 : Quels changements au xx ^e siècle ?.....	77
Axe 2 : Prospective pour le xx ^e siècle.....	83
Conclusions principales.....	93
Publications.....	94
Chapitre 5 : Dobroudja et Bourgogne.....	95
Axe 1 : Précipitations en Dobroudja roumaine.....	96
Axe 2 : Qualité de l'air en Bourgogne.....	99
Conclusions principales.....	110
Publications.....	111
Conclusion générale.....	112
Références bibliographiques.....	120
Table des figures.....	131
Acronymes.....	133
Résumé.....	134

Avant propos

Géographe climatologue, mes recherches en sciences de l'environnement traitent d'interactions entre climat et société. Les applications portent sur des régions du fuseau Eurafrique. Trois thèmes sont étudiés : la variabilité spatiale et temporelle de la ressource en eau (Afrique, principalement australe), l'impact des sociétés sur la physico-chimie de la basse atmosphère (qualité de l'air en Bourgogne) et l'influence de la géographie physique sur le climat (variabilité spatiale des pluies en Dobroudja).

Unité méthodologique, application à des espaces et à des thèmes diversifiés.

Les recherches présentées dans ce dossier ont pour points communs la considération d'espaces « régionaux » déterminés de manière cohérente du point de vue climatique tout en étant contraints par les jeux de données (observées ou simulées), l'accent mis sur la variabilité des phénomènes (climatiques ou de qualité de l'air), les techniques mises en œuvre (analyse des données, modélisation statistique), le travail en équipe (au sein du Centre de Recherches de Climatologie ou avec d'autres partenaires) et la volonté systématique d'insérer mes recherches dans des programmes (nationaux ou internationaux).

1. Une méthode

Une problématique.

L'objectif est de décrire et d'expliquer des variations spatiales, temporelles ou spatio-temporelles de phénomènes climatiques ou/et atmosphériques affectant les sociétés, ou bien engendrés par ces mêmes sociétés, ce afin de les mieux comprendre et dans certains cas de les mieux prévoir. L'hypothèse forte est que les phénomènes étudiés ne sont pas répartis de manière aléatoire dans l'espace et dans le temps, qu'il existe des structures d'ordre demandant à être identifiées, interprétées, expliquées et prévues.

Des données.

La faisabilité dépend en premier lieu de l'existence et de l'accessibilité d'un jeu de données adapté. Deux conditions principales sont requises. La première est de disposer d'un réseau de lieux, à savoir de mesures ou de simulations effectuées dans les mêmes conditions en plusieurs points ou aires correctement répartis sur l'espace considéré. « Plusieurs » signifie quelques points en ce qui concerne la qualité de l'air en Bourgogne, ou quelques centaines de points ou d'aires pour ce qui est de la pluie et des autres variables climatiques utilisées dans les études dédiées aux régions d'Afrique. La seconde est de disposer de séries homogènes dans le temps, disponibles selon un pas régulier, ne souffrant pas de longue interruption ou d'un trop grand nombre de lacunes, ceci tout en étant suffisamment longues. La longueur nécessaire varie selon le pas de temps. Pour l'étude de la qualité de l'air en Bourgogne,

quelques années sont suffisantes car elles permettent d'avoir plusieurs milliers de valeurs horaires. Pour les études de variabilité décennale en Afrique, plusieurs décennies sont nécessaires.

Des techniques et des outils.

Les bases de données étant constituées ou sélectionnées, les premières techniques employées le sont dans l'objectif d'effectuer des contrôles. Vérifier que les données revêtent des caractères d'homogénéité dans l'espace et dans le temps, et qu'elles ne comportent pas de valeurs aberrantes, est une première étape soutenue par des techniques statistiques classiques. Rechercher des éléments communs à différents points ou aires (stations météorologiques, mailles d'un modèle, ...) de l'espace étudié ou bien à différents moments (jours, mois, années, décennies) constitue la seconde étape. Ici encore la statistique descriptive est employée. Modéliser les phénomènes étudiés à partir de techniques statistiques explicatives est une étape qui suit parfois, en fonction de la problématique (exemple des prévisions pour l'ozone). Le diagnostic (pourquoi ces covariances, à quoi sont-elles associées ?), vient ensuite. Il s'appuie également sur des techniques empruntées à la statistique.

Des partenaires.

Travailler sur des espaces et des thématiques diversifiés suppose de nombreuses collaborations et explique que la très grande majorité de mes travaux et publications soient le fruit de recherches collectives. Au-delà du caractère indispensable, à mes yeux, des collaborations, je considère que celles-ci sont stimulantes, enrichissantes et favorisent les remises en question et l'ouverture d'esprit.

2. Qu'entend-on par « études régionales » ?

Des espaces cohérents du point de vue du climat et de sa variabilité.

« Etudes régionales » ne comprend pas les études microclimatiques. Je n'ai pas travaillé à des échelles fines. Même en ce qui concerne la qualité de l'air, mon objectif est toujours de rechercher ce qui est commun à plusieurs stations. « Etudes régionales » exclut également les recherches zonales (exemple : les climats équatoriaux), hémisphériques (exemple : les bandes de nuages dans l'hémisphère sud) ou planétaires (exemple : évolution de la température globale).

Le contour des aires étudiées est défini en fonction de la problématique. Il respecte la cohérence climatique. Par exemple, la région du Cap, au climat très différent du reste de la RSA tant en termes de régimes qu'en ce qui concerne les caractéristiques de la variabilité interannuelle et décennale, n'est jamais pris en compte dans mes études.

Des espaces de dimension variable et non de véritables « régions ».

Le concept de région a donné lieu à de nombreuses et solides analyses en géographie. Mon objet n'est nullement de le revisiter. J'entends simplement par « région » des espaces de taille

très variable : de quelques milliers de Km² (Dobroudja, Bourgogne orientale) à plusieurs millions de Km² (Afrique australe). Ces espaces ne sont pas des territoires bien délimités. Souvent, ils n'existent pas en tant que « régions » du point de vue de la géographie physique ou/et humaine. Il s'agit d'espaces pour lesquels des jeux de données cohérents sont disponibles. Par exemple, pour la qualité de l'air, la région étudiée pourrait correspondre à la région administrative « Bourgogne » en raison de la répartition spatiale des réseaux de surveillance en France. Le problème est que l'Yonne et la Nièvre n'ont pas, du fait de la plus petite taille de leurs principales agglomérations, bénéficié des mêmes mesures que la Côte d'Or et que la Saône-et-Loire. La région étudiée est donc « la Bourgogne orientale ». Second exemple, en Afrique australe la densité et la profondeur historique du réseau de RSA font que cet espace est parfois la région étudiée, même si les frontières politiques n'ont aucune réalité du point de vue du climat. Les aires étudiées sont donc en partie contraintes par les données.

3. Les régions : en Afrique, en Roumanie et en France.

Afrique australe.

Dans un contexte de croissance démographique et de changement climatique, la question de la ressource en eau, élément renouvelable mais de quantité finie, sera au XXI^e siècle l'une des questions environnementales majeure. Les régions situées aux latitudes subtropicales sont pour beaucoup celles au sein desquelles la disponibilité de cette ressource est la plus réduite. Entre océan Indien et océan Atlantique, entre latitudes tropicales et subtropicales, l'Afrique australe est un excellent terrain pour étudier 1/ la sensibilité des précipitations aux conditions de surface océaniques, 2/ les interactions entre latitudes tropicales et tempérées et 3/ l'impact de la variabilité pluviométrique sur les états de surface continentaux comme la végétation. Néanmoins, cet espace est peu étudié en France et l'analyse de la pluviométrie en Afrique australe, qui s'inscrit dans le prolongement de mes recherches doctorales, est donc une priorité. Elle correspond ainsi aux recherches que j'ai développées de la manière la plus continue.

Tel que j'ai précisé ce que j'entendais par région, travailler sur un espace de ce type ne signifie ni connaître le terrain, ce serait illusoire car il est trop vaste (grand comme l'Europe de l'Atlantique à l'Oural), ni connaître les phénomènes climatiques (je ne travaille pas au pas de temps quotidien). Travailler sur l'Afrique australe c'est surtout s'imprégner d'une culture bibliographique et acquérir une certaine expertise permettant d'obtenir des résultats, de monter des projets et d'encadrer des recherches.

Autres régions d'Afrique.

Effectuer des recherches avec des spécialistes de l'Afrique de l'Ouest, de l'Afrique centrale ou de l'Afrique de l'Est m'offre la possibilité de replacer l'Afrique australe au sein d'un ensemble plus vaste et ainsi d'en mieux appréhender les spécificités. Changer d'échelle permet également de tester la robustesse de certains résultats (structures spatiales de variabilité par exemple). Très influencée par l'océan Indien, la variabilité pluviométrique de l'Afrique australe partage beaucoup avec celle de l'Afrique orientale. Plusieurs de mes travaux relèvent donc de collaborations avec des collègues spécialistes de cet espace.

Bourgogne.

En ce qui concerne les états de surface continentaux, l'homme modifie significativement son environnement depuis le néolithique. En revanche, son environnement atmosphérique n'est significativement affecté que depuis la révolution industrielle, et n'est étudié que très récemment. Connaître et prévoir la qualité de l'air que nous respirons est aujourd'hui une priorité. La Bourgogne n'est pas la région la plus polluée. Mais, être enseignant chercheur dans une université signifie s'inscrire dans un territoire, en l'occurrence la Bourgogne. C'est aussi répondre à des attentes, être réactif. Les étudiants, très majoritairement natifs et résidents de la région, aspirent pour beaucoup à travailler en Bourgogne et, dans cette optique, souhaitent que leurs stages de maîtrise et de DEA portent sur son territoire. Par ailleurs, les partenaires susceptibles de soutenir scientifiquement ou/et financièrement des recherches, outre le ministère et l'Europe, sont fréquemment des collectivités territoriales ou des associations dont les prérogatives s'inscrivent sur tout ou partie d'une région administrative. Développer des recherches sur la Bourgogne m'est donc apparu comme une nécessité, une réponse à des attentes, le moyen de développer des collaborations nouvelles, au sein mais aussi à l'extérieur de l'université et des instances de recherche, ainsi que d'investir des thématiques plus appliquées.

Dobroudja.

La géographie physique exerce une influence sur l'environnement climatique. C'est vrai à différentes échelles de temps et d'espace, des changements de positions absolues et relatives des continents et des océans aux échelles géologiques jusqu'en microclimatologie. J'ai travaillé ce thème à l'échelle topoclimatique. La Dobroudja roumaine, dont le relief est relativement simple et le trait de côte quasi linéaire, est un espace test pour mettre en évidence le rôle du relief et de la mer Noire dans la distribution spatiale des pluies, et ce à différentes saisons.

4. Les temporalités : des échelles emboîtées.

La prise en compte de différentes temporalités concerne essentiellement les recherches effectuées sur l'Afrique, et plus fréquemment l'Afrique australe.

Les précipitations varient selon des échelles emboîtées dans le temps.

Les temporalités dépendent de la problématique et de l'échelle spatiale associée. Les précipitations sont une variable climatique discrète dont la nature (neige, grêle ou pluie) et l'intensité sont contrôlés par des mécanismes relevant d'échelles temporelles emboîtées. A un instant « t » quelconque, la probabilité d'occurrence des précipitations, leur nature et leur intensité varient selon :

1/ L'heure de la journée. En Afrique australe, les précipitations étant essentiellement convectives, les pluies présentent un caractère diurne net (Hastenrath, 1970) ;

2/ Le jour et la configuration météorologique associée. Située aux latitudes subtropicales, les fluctuations météorologiques quotidiennes sont importantes et le rôle de la circulation tempérée d'ouest est non négligeable (Tyson, 1986) ;

3/ Le mois de l'année. Deux régimes sont bien marqués : tropical sur la majeure partie de la RSA (Tyson, 1986) et plus encore du subcontinent (Richard, 1993), avec des valeurs maximales en été (décembre ou janvier) ; méditerranéen dans l'extrême sud-ouest (région de Cape Town), avec des valeurs maximales en hiver (juillet). Deux autres régimes sont également présents : aride sur la frange littorale concernée par les eaux froides du courant de Benguela et les upwellings associés, avec des valeurs maximales automnales (mars ou avril) ; équinoxial sur la côte sud, dans la région de Port Elisabeth, avec des maxima d'octobre et d'avril. A noter que ce régime est beaucoup plus développé sur le proche océan.

4/ L'année. La variabilité interannuelle est forte, comme partout, mais plus particulièrement dans les régions les plus sèches, et donc en RSA dans le Nord de la province du Cap (Tyson, 1986). Elle présente des modulations quasi biennales de 2-3 ans emboîtées dans des modulations pluriannuelles de 3-5 ans (Tyson, 1986).

5/ La décennie. Des oscillations d'environ 10-12 et 18 ans sont observées en RSA, respectivement dans la région du Cap et dans le nord-est du pays (Tyson, 1986). Les oscillations de 18 ans constituent un contexte de fond sur lequel se surimpose la variabilité interannuelle, dont celle liée à l'ENSO (Kruger, 1999). L'origine des cycles de 18 ans reste relativement méconnue. Certains travaux établissent une relation avec le cycle luni-solaire de 18.6 ans (Currie, 1991 ; 1993). Sur les bandes de fréquence de 18 ans, Mason (1990) a mis en évidence un lien statistique entre TSO du sud-ouest de l'océan Atlantique (tout spécialement le long de la convergence subtropicale au niveau de la confluence entre courants du Brésil et des Malouines), TSO du sud-ouest de l'océan Indien et précipitations en RSA. Sur cette question, la décennie 1990 n'a pas, à ma connaissance, donné lieu à des avancées très significatives.

6/ Le siècle. En Afrique australe les témoignages écrits ne sont pas très anciens et les premières séries de mesures ne sont effectuées au Cap que depuis 1850 (ce qui constitue néanmoins une des plus longues séries d'Afrique). Des correspondances de missionnaires permettent d'identifier quelques séquences sèches et humides au cours du XIX^{ème} siècle (Nash et Endfield, 2002), séquences *a priori* comparable à celles du XX^{ème} siècle. La dendroclimatologie permet ensuite de remonter jusqu'au XIII^{ème} siècle. Périodes favorables ou défavorables à la croissance des arbres, interprétées selon l'essence et la région comme plus moins chaudes ou froides (régions du Cap et de montagne), ou bien humides ou sèches (autres régions), alternent, sans qu'aucune tendance ou rupture nette n'apparaisse (Tyson, 1986).

7/ Les périodes géologiques. Depuis la fin du tertiaire, et postérieurement à la mise en place du courant circumpolaire après que le continent antarctique occupe approximativement sa position actuelle, la théorie astronomique des climats (Berger et Andjelic, 1988) est, en Afrique australe comme ailleurs, l'élément explicatif des variations climatiques. Lors des périodes glaciaires, des données géomorphologiques, paléontologiques, archéologiques et palynologiques attestent du déplacement vers le nord de la circulation d'ouest, avec un climat tempéré plus humide et plus étendu vers le nord qu'aujourd'hui et un climat tropical plus frais et repoussé plus au Nord (Van Zinderen Bakker, 1976).

L'approche régionale conditionne partiellement les temporalités appréhendées.

Parmi ces 7 échelles temporelles, celles qui ont été considérées sont liées à l'échelle spatiale à laquelle j'ai travaillé. Ici encore les précipitations observées en tout point s'inscrivent dans un jeu d'échelles emboîtées, que je ne décrirai pas, car mon travail de recherche ne met pas réellement l'accent sur ce point.

Travaillant à l'échelle de la RSA ou de l'Afrique australe, il n'était pas possible d'appréhender, à défaut de données disponibles en assez grand nombre, le pas de temps horaire. Il m'est maintenant possible de travailler au pas quotidien, mais à condition de restreindre l'aire à la RSA, afin d'étudier l'évolution séculaire du nombre de jours de pluie et de l'intensité des pluies quotidiennes.

Travaillant à partir de mesures et non d'indicateurs (cernes des arbres, enregistrements sédimentaires, ...) je n'ai pas eu l'opportunité de travailler les échelles plus longues que le siècle. Le faire, impliquerait de m'associer avec des collègues ayant des compétences dans d'autres branches de la climatologie (dendroclimatologie, climatologie historique, géologie, ...). Néanmoins, les données issues de ces sciences permettent rarement de constituer des jeux cohérents spatialement, de véritables réseaux de données tels que ceux que j'ai l'habitude de traiter.

Le spectre des études dédiées à des régions d'Afrique va ainsi de l'échelle mensuelle (chapitre 1), à l'échelle interannuelle (chapitre 2), à l'échelle décennale (chapitre 3) et à l'échelle séculaire avec la thématique du changement climatique (chapitre 4). Les pas de temps considérés vont généralement du mensuel à l'année, plus rarement quotidien.

Les travaux portant sur la Bourgogne considèrent le pas de temps quotidien. L'échelle quotidienne est privilégiée ce qui n'exclut pas des études préliminaires aux échelles saisonnières à interannuelles. Ils sont présentés dans le chapitre 5 à la suite de ceux portant sur la Dobroudja où le pas mensuel est privilégié au sein d'études portant sur l'échelle saisonnière uniquement.

Introduction

I La climatologie en Afrique australe : rapide état des lieux.

Pour des raisons historiques, l'Afrique australe n'est pas sous les projecteurs de la recherche française. En revanche, c'est une des régions d'Afrique où la recherche, au moins pour le domaine qui me concerne, la climatologie, est la plus dynamique et avancée.

Une recherche forte en Afrique du Sud

Deux raisons essentielles intrinsèquement liées expliquent le développement de ces recherches : la présence en Afrique du Sud 1/ d'un réseau de mesures ancien et dense, plus proche des réseaux européens que de ceux qui sont rencontrés dans la majorité des pays africains, 2/ de chercheurs disposant de bonnes conditions de travail (organisation, matériel...).

Les météorologues sud-africains s'appuient sur un réseau de mesures ancien : première station ouverte en 1850 à Cape Town, puis multiplication des stations dans les principales villes à partir de 1880. Le début du xx^e siècle est une période perturbée par des guerres (dont la guerre des Boers...). À partir de 1920, le réseau devient rapidement assez dense. Plusieurs centaines de postes pluviométriques fonctionnent. Ni les tensions liées à l'apartheid, ni le changement de régime, n'ont globalement perturbé le bon fonctionnement du South African Weather Bureau (SAWB), aujourd'hui nommé South African Weather Service (SAWS).

S'appuyant sur ce réseau, de bonnes structures et une excellente formation, les climatologues sud-africains ont développé des recherches de niveau international depuis plusieurs décennies.

En 1993, par ordre alphabétique et sans citer leurs nombreux travaux, D'Abreton, Diab, Dyer, Harangozo, Harrison, Jury, Lindesay, Lutjeharms, Kelbe, Mason, Miron, Olivier, Pathack, Preston White, Schulze, Stockton, Taljaard, Theron, Terblanche, Torrance, Tyson, Van Heerden ou Vogel, pour n'en retenir que quelques uns parmi les principaux, publient régulièrement en Afrique du Sud comme dans les revues internationales.

Depuis 1993, certains ont pris leur retraite, quitté l'Afrique du Sud ou/et la recherche (deux cas fréquents). D'autres, dont Jury, Mason et Tyson poursuivent leurs recherches, accompagnés maintenant de Hewitson, Joubert, Kruger, Landman, Rautenbach, Reason, Tennant et Van der Heever (sans citer leurs nombreuses publications que l'on retrouvera tout au long du dossier).

et en émergence dans les autres pays d’Afrique australe.

Les services météorologiques des autres pays d’Afrique australe ne bénéficient pas des mêmes conditions de travail. Certains chercheurs de ces pays ont néanmoins contribué, indépendamment ou au côté de collègues sud-africains, au développement de la connaissance.

- Chipanshi (1989), Mulenga (Fauchereau *et al.* 2003 ; Jury *et al.* 1999 ; 2000 ; Reason et Mulenga 1999 ; Richard *et al.* 2002) ou Sichingabula (1998) pour la Zambie ;
- Makarau (1995, et Jury 1997) ; Matarira (1988, 1990a, b et c, et Flocas 1989 ; et Jury 1992), Unganai (et Mason 2002) ; Zinyowera (et Unganai 1992) pour le Zimbabwe ;
- Bhalotra (1984 ; 1987) ou Van Regenmortel (1995) pour le Botswana ;
- Van Langenhove, Amakali et de Bruine (1998) pour la Namibie ;
- Manhique pour le Mozambique.

Une recherche également alimentée par des chercheurs extérieurs au sous-continent.

Des chercheurs extérieurs à l’Afrique australe ont également publié sur cet espace. Pour certains, les publications dédiées à cette région sont ponctuelles.

Cook (2000, 2001), Currie (1991, 1993), Engert (Jury et Engert 1999), Ismaïl (1987) ; Heine (1988), Landman (et Mason 1999), Lyons (1991), Misra (2003), Nash (et Endfield 2002), Nieuwolt, (1972), Rocha et Simmonds (1997a et b), Sharon (1981), Shinoda (et Kawamura, 1996), Smakhtina (1998), Todd et Washington (1998 ; 1999), Waliser (Jury *et al.* 1993 ; 1994 ; Jury et Waliser 1990), Washington (et Todd, 1999) ou Waylen et Henworth (1996).

D’autres auteurs, toujours par ordre alphabétique, publient plus régulièrement sur cet espace.

- Fauchereau (1999; *et al.* 2003a et b ; Richard *et al.*, 2001 ; 2002a et b ; Rouault *et al.* 2003 ; Trzaska (*et al.*, 2002, et Richard, 2003).
- Hastenrath (1970 ; *et al.* 1995) ;
- Hudson (et Hewitson, 1997 ; et Jones 2002) ;
- Nicholson (1986b ; 1989 ; *et al.* 2001) ;
- Pocard (Richard et Pocard 1998 ; Richard *et al.* 2001 ; 2002) ;
- Rouault (Reason et Rouault 2002 ; Richard *et al.* 2000 ; 2001 ; et Richard 2003 ; *et al.* 2003) ;
- Trzaska (*et al.* 2002 ; Fauchereau *et al.* 2003 ; Richard *et al.* 2000 ; 2001) ;
- Walker (1987 ; 1989 ; 1990 ; et Lindesay 1989 ; et Mey 1986 ; *et al.* 1984).

Je m’inscris dans ce dernier groupe au sein duquel ne sont pas mentionnés :

- Les auteurs qui, à l’image de Hulme, ne publient pas spécifiquement sur l’Afrique australe, mais contribuent grandement à la connaissance de son climat ;
- Les paléoclimatologues pour qui l’Afrique du Sud est un bon terrain d’étude, entre autres du fait de la diversité de sa végétation et ses climats ;
- Des biogéographes utilisant le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) et ayant travaillé sur le Kalahari ;
- ...

1. Les acquis (1993)

Le terrain scientifique investi à la fin des années quatre-vingt était donc tout sauf vierge. Voici une brève synthèse de l'état des connaissances à cette époque (1993).

Connaissance du climat moyen

La description des régimes pluviométriques sur le continent (Dyer, 1977a), ainsi que des conditions météorologiques permettant de les expliquer, était chose acquise dans les grandes lignes. La connaissance des systèmes synoptiques pluvio-gènes associés (Diab et Garstang, 1986 ; Diab *et al.*, 1991) avait également bénéficié de nombreuses études s'appuyant entre autres sur un réseau de radio-sondages très correct pour l'Afrique (Dyer, 1976 ; Taljaard, 1986 ; Tyson, 1986 ; Theron, 1990).

Doublee d'une expertise en variabilité interannuelle.

Nombreux travaux, dont tout particulièrement ceux de Tyson, ont dès les années soixante-dix (Tyson, 1971) contribué à développer la connaissance de la variabilité interannuelle du climat. Décrite dans l'espace comme dans le temps, en particulier en termes de cyclicités (Tyson, 1981, 1984, 1986), cette variabilité était mise en relation avec des anomalies de la Température de Surface Océanique (TSO) (Walker, 1990 ; Mason, 1992 ; Richard, 1993), de pression, de vent (Richard, 1993) et de convection profonde (Jury, 1992) via les fichiers OLR. Les principales téléconnexions, en particulier avec l'ENSO avec pour initiatrice Lindesay (1988), étaient identifiées.

Ces acquis étaient considérables. Outre les raisons développées dans les pages précédentes, ils témoignent d'un fort lien entre océanographes et géographes, d'une grande maîtrise des techniques statistiques et d'une utilisation ancienne et développée de l'outil informatique.

2. Des zones d'ombre (1993)

Le lien entre la variabilité interannuelle et le cycle saisonnier

La variabilité interannuelle peut-elle être interprétée en termes de modification du cycle pluviométrique ? Est-elle préférentiellement modulation (atténuation/amplification) de sa magnitude ou une perturbation du calendrier habituel ?

La faiblesse du lien avec l'ENSO

Les cartes de corrélations publiées faisaient en général état de valeurs qui avoisinaient 0.4, pour culminer à 0.5, ce qui ne faisait en tout et pour tout que 16 à 25 % de variance commune. Comment expliquer la faiblesse de ce lien statistique et par là même, quel est le mode de transmission entre l'ENSO, phénomène se développant sur le Pacifique, et la pluviométrie en Afrique australe, à plusieurs milliers de kilomètres de cet océan ?

La variabilité décennale

Les résultats obtenus sur des données allant *grosso modo* de la seconde guerre mondiale aux années quatre-vingt sont-ils robustes lorsqu'ils sont soumis à l'épreuve de l'intégration de données sur les décennies quatre-vingt et quatre-vingt-dix ? L'établissement par Nicholson (1986a) d'un parallèle entre Afrique australe et Afrique boréale au vu de la période 1958-1973 ne fut pas vérifié dans les années soixante-dix où les pluies furent très abondantes en Afrique australe. Est-il pertinent au regard des années quatre-vingt et quatre-vingt-dix ?

La question du changement climatique

Cette question nouvelle émergeait au début des années quatre-vingt-dix. La profondeur historique des relevés météorologiques en Afrique du Sud permet-elle d'observer des changements, sachant que les principaux auteurs (Tyson, 1986 ; Hulme, 1992) n'en avaient jusqu'alors pas détecté ? Par ailleurs, travailler sur des simulations climatiques longues intégrant une augmentation des GES, ce dans une optique d'étude d'impact régional, devient-il concrètement réalisable et pertinent ?

Ces zones d'ombre sont majoritairement à relier à l'absence ou à la faible disponibilité, en 1993, de certains produits : MNT, réanalyses, runs issus de MCG...

II Dobroudja et Bourgogne

Mener des études à des échelles différentes des travaux portant sur l'Afrique australe et sur des espaces plus proches, français ou européens, étaient des perspectives qui m'intéressaient, en particulier sur des questions environnementales, dans la continuité de mon DEA. Mais il fallait que certaines conditions soient réunies : définir des problématiques pertinentes, trouver des partenaires, disposer de données et d'outils adaptés et s'appuyer sur des supports financiers.

1. Précipitations en Dobroudja roumaine

Hiver et printemps 1994, Ion-Florin Mihalescu, Université de Constata, Roumanie, fit un séjour au Centre d'Etudes Climatiques, dirigé par Annick Douguédroit, à Aix-en-Provence, en tant que Professeur invité. Nous avons alors mis en place une collaboration. Celle-ci s'est poursuivie à Dijon à partir de l'automne 1994, renforcée par Olivier Planchon. Une convention a été signée en 1995 entre nos laboratoires respectifs. De cette collaboration est issu un article publié dans *International Journal of Climatology*). Ce travail traite de la spatialisation des précipitations en Dobroudja roumaine et met l'accent sur les rôles joués par le relief et les cellules de brises côtières.

2. Qualité de l'air en Bourgogne

L'expérience du DEA traitant de la pollution en dioxyde de soufre sur la région d'Aix Marseille (Richard, 1988) m'a incité à poursuivre cette orientation. Pendant quelques années, le contexte local ne permettait pas l'émergence de recherches dédiées à la qualité de l'air en Bourgogne. La nomination en 1997 d'un Directeur, Bruno Siéja, du REseau de SURveillance de la qualité de l'air Pour l'Agglomération DIjonnaise (RESUPADI) a permis d'amorcer une collaboration qui s'est avérée durable et fructueuse. Plusieurs programmes ont été soumis, un réseau de collaboration a été tissé, de nombreux étudiants sont venus alimenter ces recherches que nous commençons à présenter lors de colloques et à publier. Ce thème est aujourd'hui ma seconde priorité, en termes de recherches, après l'Afrique australe.

Chapitre 1

Aspects spatiaux et saisonniers de la variabilité pluviométrique

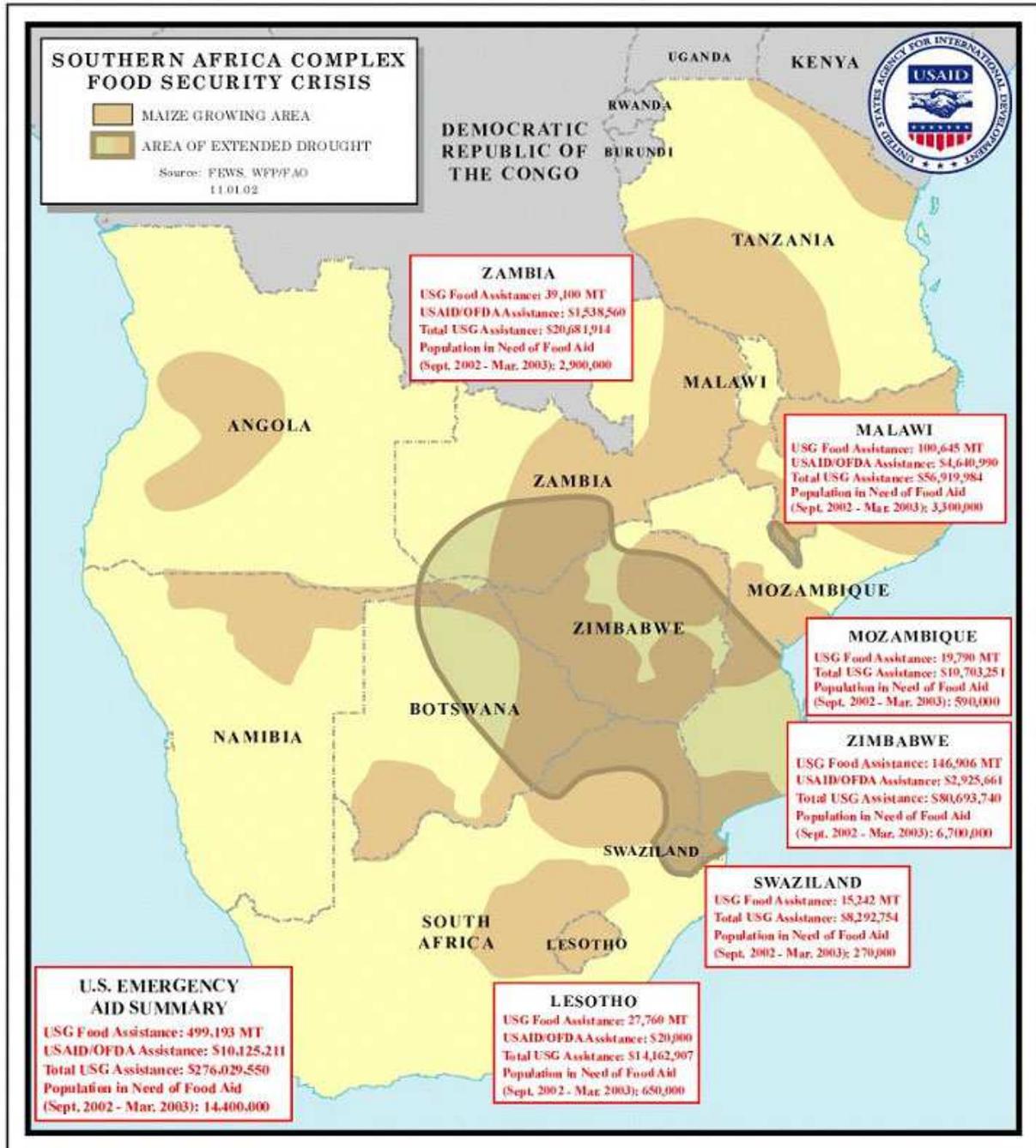
La sécheresse est le risque naturel majeur en Afrique australe.

L'Afrique australe est relativement épargnée par les risques tectoniques et volcaniques. Elle n'est concernée que marginalement par les cyclones tropicaux (côtes du Mozambique). Le risque naturel principal est la sécheresse. En effet, pour sa latitude (10 à 35° Sud), le climat de ce sous-continent est relativement sec. Les zones arides (Namib) et semi arides (Kalahari) sont étendues. Les prairies (veld) et bush constituent les plus vastes superficies. Les forêts (miombo par exemple) ne sont pas sempervirentes. De surcroît, l'Afrique australe, du fait de sa géographie (socle surélevé), ne bénéficie pas d'apport fluvial exogène conséquent comme cela est le cas pour certaines régions arides à semi-arides d'Afrique de l'Ouest (Niger), d'Afrique de l'Est (Nil) ou d'Inde (Indus). Au total, la région étudiée dispose de ressources en eau relativement faibles. Le risque associé à la sécheresse est néanmoins très variable. Il dépend de la vulnérabilité des sociétés ainsi que des aléas météorologiques.

La vulnérabilité est très variable d'un pays à l'autre.

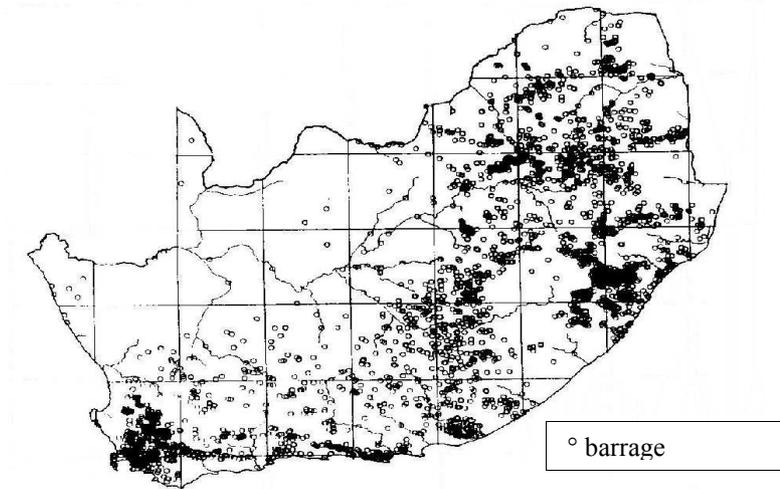
La vulnérabilité est très liée au niveau de développement économique. L'Afrique du Sud est dans une situation très différente de celles des autres pays du sous-continent. La crise alimentaire la plus récente, liée à une sécheresse, a eu lieu en 2002-2003 (Fig. 1). L'Afrique du Sud n'a pas eu besoin d'aide alimentaire, contrairement à ses proches voisins (Swaziland, Zimbabwe, Mozambique, Malawi et Zambie, ainsi que le Lesotho, enclavé au sein de la l'Afrique du Sud). La vulnérabilité est atténuée par certaines infrastructures dont les barrages, très nombreux en Afrique du Sud (Fig. 2), ou les transferts entre bassins versants (Fig. 3).

Figure 1 : Complexité des crises alimentaires en Afrique australe : l'exemple de 2002.



Source : <http://www.reliefweb.int>

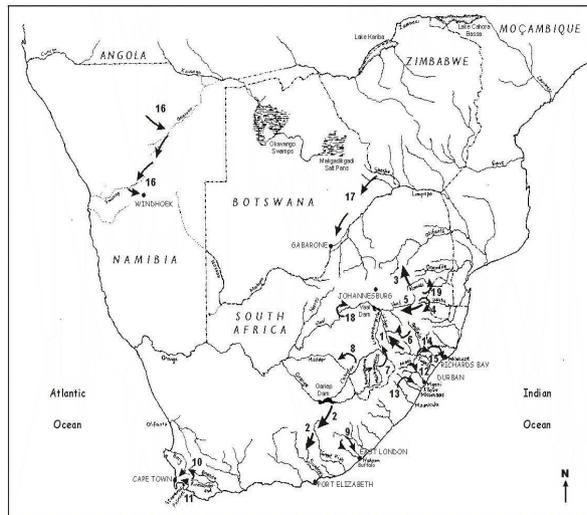
Figure 2 : Principaux barrages répertoriés en Afrique du Sud.



Source : <http://www.nbi.ac.za/landdeg/webpage/literature.htm#exec>

D'après : K.O.Bang & C. Stimie, Institute for Soil, Climate and Water (ISCW) in Hoffman *et al.*, 1999 (Figure 4.3a A map of the registered dams in South Africa).

Figure 3 : Transferts entre bassins versants en Afrique australe.



Source : <http://www.nbi.ac.za/landdeg/webpage/literature.htm#exec>

D'après : K.O.Bang & C. Stimie, Institute for Soil, Climate and Water (ISCW) in Hoffman *et al.*, 1999.

Axe 1 : Sécheresses

a/ Objectifs

Mieux connaître l'aléa climatique occasionnant des sécheresses.

Le risque climatique dépend également de l'aléa météorologique. Toutes les sécheresses ont pour dénominateur commun d'être associées à un déficit pluviométrique. Mais, selon la durée, l'intensité et l'extension spatiale de ce déficit, les sécheresses sont tantôt agricoles, tantôt hydrologiques. Repérer l'extension géographique des sécheresses et identifier les saisons où elles interviennent préférentiellement constitue un premier objectif.

La sécheresse est un déficit pluviométrique important.

Lorsque l'on utilise le terme « sécheresse », de quoi parle-t-on exactement ? Pour définir la sécheresse, Beltrando et Chemery (1995) retiennent trois sens principaux, seuls les deux premiers sont considérés ici :

1/ *Période de déficit important (ou d'absence) de précipitations.* Il reste à définir, pour l'Afrique australe, ce que l'on entend par important. Mesure-t-on cette importance en valeur absolue ? On l'exprime alors en mm. Ou bien la mesure-t-on en valeurs relatives ? Dans le premier cas, les plus grosses sécheresses interviendront dans les régions et lors des saisons les plus pluvieuses. Dans le second, elles concerneront préférentiellement les régions et saisons habituellement peu pluvieuses. Dans les deux cas, il est impossible de comparer l'intensité des sécheresses observées lors de deux saisons ou dans deux régions différentes.

La sécheresse est calculée sur une période saisonnière à pluriannuelle.

2/ *Déficit important de l'humidité (pluies, eaux souterraines, écoulement) d'un milieu naturel par rapport à la disponibilité moyenne, sur une surface importante et pendant une période suffisamment longue pour que l'économie de la région en souffre.* En Afrique australe, sur quelle période quantifier les sécheresses ? Un mois ? Quelques mois ? Un an ? Plusieurs années ? La récente sécheresse en France (2003) illustre bien ce point : sécheresse météorologique sévère, sécheresse agricole dépendant de la possibilité ou non d'irriguer et sécheresse hydrologique relativement modérée du fait d'un bon niveau de remplissage des nappes en fin d'hiver 2003.

Au final, Quel(s) produit(s) fournir aux décideurs pour mettre en place un plan efficace de lutte contre les effets de la sécheresse ?

2) Résultats

Sécheresses et excédents sont souvent définis sur des aires dont les contours sont fixes sur une période donnée. Dans le meilleur des cas, des outils statistiques, tels que les ACP, ont été utilisés pour définir des aires. Mais ces moyennes statistiques ne doivent pas faire oublier qu'à chaque événement correspond une aire particulière. En première approche, il est pertinent de se confronter avec des séries de cartes permettant de visualiser l'extension des principales sécheresses mais aussi des excédents les plus forts. La difficulté réside dans l'unité à considérer. Nous avons appliqué à l'Afrique du Sud (24/ Rouault et Richard, 2003) une méthode développée aux Etats-Unis (Hayes *et al.*, 1999), jusqu'alors jamais utilisée en Afrique australe.

A partir du réseau pluviométrique de qualité de la RSA,

La spatialisation des sécheresses en RSA a été rendue possible par la mise à disposition, par le South African Weather Service (SAWS), d'un fichier comportant 93 séries pluviométriques mensuelles sur la période 1920-1999. Ces séries ne correspondent pas à des postes pluviométriques, mais à des aires au sein desquelles le SAWS a calculé des moyennes spatiales à partir de stations dont le nombre varie dans le temps comme dans l'espace.

le calcul du SPI sur des périodes allant de trois mois à deux ans

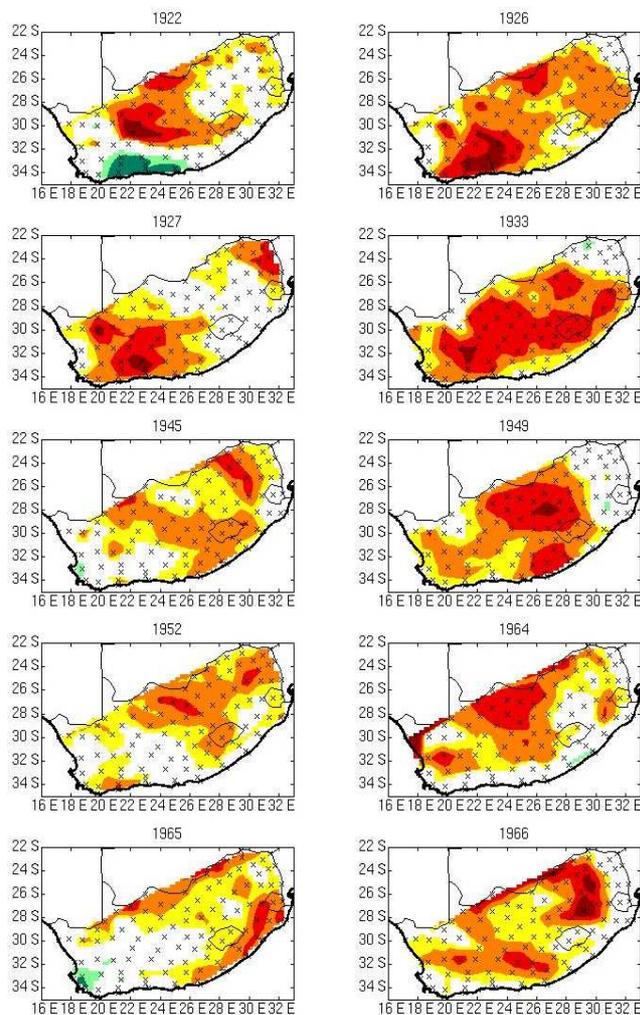
L'utilisation d'un Indice Standardisé de Précipitations (SPI, Hayes *et al.*, 1999) permet de s'affranchir de manière acceptable d'une double difficulté. 1/ Un écart pluviométrique à la moyenne peut s'exprimer en millimètres. Le problème est que l'importance de ces écarts dépend beaucoup du cumul pluviométrique mensuel moyen, variant à la fois dans l'espace et au sein de l'année. 2/ L'aspect intégrateur de cet indice permet de distinguer deux types de sécheresses. 1/ Les sécheresses de quelques mois à une saison des pluies affectent principalement l'agriculture pluviale (essentiellement les prairies et la maïsiculture (Fig. 1) en RSA). Les sécheresses plus longues, six mois à deux ans, sont préjudiciables, compte tenu des temps d'écoulement des cours d'eau caractérisés par de nombreux aménagements (Fig. 2 et 3), à la ressource en eau pour les besoins urbains, industriels et de l'agriculture irriguée (agrumes, ...).

permet de mieux appréhender les sécheresses.

Outre l'article (24/ Rouault et Richard, 2003), les résultats ont été communiqués à colloque (27/ Rouault et Richard) et sont accessibles en ligne sur le site de Mathieu Rouault (<http://www.egs.uct.ac.za/~rouault>). Cette banque cartographique est utilisable par toute personne travaillant sur la pluviométrie en RSA. En résumé :

- 1/ Sécheresses et excédents sont des événements récurrents en RSA (Fig. 4) ;
- 2/ Le pays n'est jamais affecté dans son intégralité (Fig.4), car les saisons des pluies ne sont pas les mêmes sur tout le pays ;
- 3/ Les anomalies pluviométriques se développent fréquemment sur l'ensemble des aires connaissant le même régime pluviométrique (exemples : plateau intérieur à précipitations estivales, région du Cap à pluies d'hiver).

Figure 4 : Extension spatiale du SPI 6 mois fin avril lors des 10 années les plus sèches en Afrique du Sud (1920-1990).



Code couleur : marron (-3 à -2), rouge (-2 à -1.5), orange (-1.5 à -1), jaune (-1 à -0.5) bleu foncé (3 à 2), bleu clair (2 à 1.5), Vert foncé (1.5 à 1), vert (1 à 0.5).

Code couleur : marron (-3 à -2), rouge (-2 à -1.5), orange (-1.5 à -1), jaune (-1 à -0.5) bleu foncé (3 à 2), bleu clair (2 à 1.5), Vert foncé (1.5 à 1), vert (1 à 0.5).

<http://www.egs.uct.ac.za/~rouault>

En conséquence :

1/ Il n'est pas pertinent de travailler sur l'ensemble de la RSA qui correspond à une mosaïque de régimes. Ceci n'interdit pas de travailler sur une aire beaucoup plus vaste intégrant le plateau sud africain à pluies estivales mais excluant les régions dont les précipitations ne sont pas estivales (province de Western Cape et littoraux de Northern et Eastern Cape).

2/ Il est pertinent de définir des indices pluviométriques à partir de méthodes objectives. La représentativité spatiale de ces indices sera variable (importante pour les régions à pluies d'été, étendues en RSA, plus réduite pour les régions à pluies équinoxiales ou hivernales, moins étendues).

3/ Ces indices gagneraient à ne pas intégrer les douze mois de l'année, mais à regrouper les mois au sein desquels les anomalies pluviométriques tendent à persister.

c/ Perspectives

Mettre en relation des variables environnementales

Il apparaît nécessaire de replacer les anomalies pluviométriques converties en SPI dans leur contexte environnemental : états des sols et de la végétation par exemple (Fig. 5). Pour cela, il convient de mettre en place différentes couches d'information :

- Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) de type ETOPO ;
- Le suivi par satellite de l'activité chlorophyllienne avec des produits de type NDVI ;

avec des anomalies pluviométriques issues de satellites converties en SPI

- L'estimation des précipitations par satellite : croiser des produits accessibles par l'Internet de type CMAP avec les produits issus de la nouvelle génération européenne de satellite MSG dans le cadre d'un projet de Groupement De Recherche (GDR) proposé par l'Université de Paris VII.

au sein d'un SIG

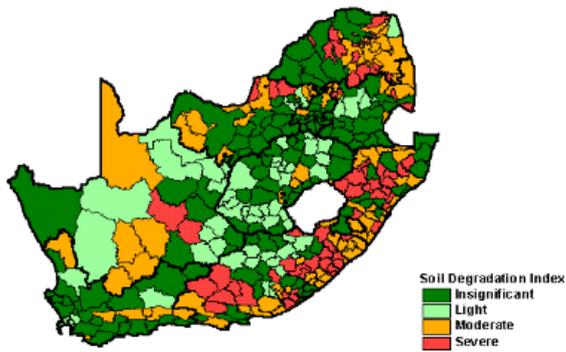
L'utilisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) serait susceptible d'aider à mieux définir et comprendre l'extension des zones affectées par les sécheresses (co-krigeage). C'est dans cette optique que Pierre Camberlin et moi-même avons depuis l'hiver 2003 sollicité des collègues de l'ENESAD afin de développer une collaboration autour d'une technique, le SIG, et d'un logiciel ARC/INFO ARC/VIEW. Une première étape fut l'organisation d'une formation de 3 jours (3-4-5 juin 2003) par Thierry Castel, formation dont ont bénéficié 15 membres du CRC.

qui pourrait être dédié à l'Okavango.

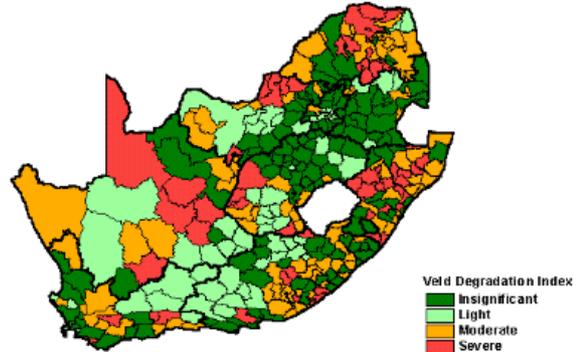
Une première piste sera de suivre l'extension des zones humides, tout particulièrement le bassin de l'Okavango (Fig. 6). Extrêmement plat, ce delta intérieur est en effet un extraordinaire enregistreur, au travers des variations des surfaces ennoyées (Fig. 7), des anomalies pluviométriques étant intervenues sur un très vaste bassin.

Figure 5 : Indices de dégradation en RSA.

a) Des sols

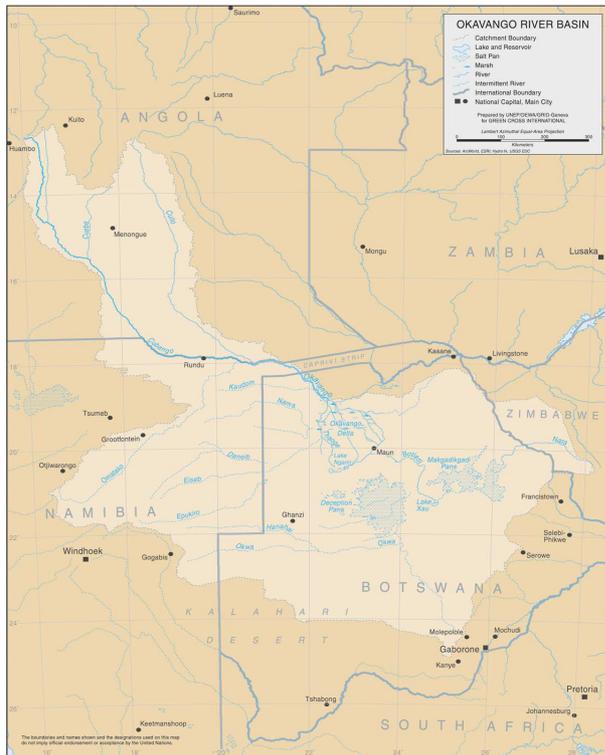


b) Des prairies



Source : <http://www.nbi.ac.za/landdeg/index.htm>

Figure 6 : Carte du bassin de l'Okavango.



<http://www.grid.unep.ch/proser/maps/africa/okavango.fr.php>

Figure 7: Photographie aérienne dans le bassin de l'Okavango.



<http://isuisse.ifrance.com/photosafrique/delta.html>

Axe 2 : Structures spatiales

a/ Objectifs

Les structures spatiales des climats sont connues en Afrique.

La géographie des climats est un champ de recherche ancien. La pluviométrie en Afrique du Sud n'a pas échappé à ces recherches (Dyer 1977a, pour les travaux les plus récents). Dans l'hypothèse où le climat est stable à l'échelle de quelques décennies, hypothèse de plus en plus fragile compte tenu du réchauffement global, ce champ de recherche pourrait éventuellement s'attacher à l'amélioration des critères sur lesquels reposent les typologies, mais ne constitue pas une priorité.

Celles qui sont associées à la variabilité des éléments du climat le sont moins.

En revanche, la géographie des structures spatiales de variabilité est un domaine qui n'est sérieusement investi que depuis les années 1980. Dans de nombreuses études, les structures de variabilité, parfois appelées modes ou structures spatio-temporelles, ne sont qu'en toile de fond. Elles sont détectées pour constituer des indices régionaux, ensuite croisés avec divers champs climatiques.

Dépasser le cadre strict de l'Afrique australe pour en mieux identifier la spécificité.

Dans ma thèse, des méthodes objectives, en particulier l'Analyse en Composantes Principales (ACP), avaient été employées pour déterminer sur la base des régimes moyens les contours de l'Afrique australe tropicale. Six aires cohérentes du point de vue de l'histoire pluviométrique (1946-1979) avaient été identifiées. Cette classification en six régions n'a pas été réutilisée depuis. Certes, les régions identifiées sont cohérentes, mais le signal pluviométrique qui leur est associé était trop contraint par l'orthogonalité entre les modes. L'effet préjudiciable de cette contrainte est que les anomalies pluviométriques étendues et récurrentes, liées généralement à l'ENSO, ne peuvent pas être bien décrites.

Ce constat a depuis conduit à ne développer des analyses que sur les seuls premiers axes des ACP, ce dans le cadre de collaborations avec des collègues ne travaillant pas sur l'Afrique australe : Gérard Beltrando et Pierre Camberlin. L'objectif était de constituer une base de données relative à un espace étendu afin, sur le critère de la variabilité interannuelle des précipitations : 1/ de mieux identifier les limites entre deux régions distinctes : l'Afrique orientale et l'Afrique australe et 2/ d'apprécier les spécificités saisonnières des deux aires.

b/ Résultats

Un dipôle pluviométrique entre Afrique orientale et Afrique australe.

Ces recherches, présentées en colloque (7/ Camberlin et al., 1994), ont montré la grande cohérence spatiale des anomalies pluviométriques. En octobre-décembre, Afrique orientale équatoriale et Afrique australe sont fréquemment soumises à des anomalies de signe opposé, la limite se situant aux environs de 15° Sud au Mozambique (Figure 4, in 10/ Camberlin et al., 1994).

Un dipôle net en octobre-décembre, pas aux autres saisons.

L'opposition de signe entre Afrique orientale et australe en octobre-décembre ne semble pas vérifiée lors des autres saisons où les deux signaux pluviométriques sont relativement indépendants l'un de l'autre. Lors des autres saisons, en Afrique orientale exclusivement, la cohérence intra-régionale est également moins nette. Tel est par exemple le cas de juillet-septembre (Figure 2, in 19/ Richard et al., 1998).

Un dipôle lié à la circulation zonale sur l'océan Indien.

Les short rains en Afrique orientale, connaissent des anomalies pluviométriques plus fortement corrélées à des phénomènes d'échelle supra régionale à planétaire, que celles observées lors des autres saisons (Ogallo, 1989). Les corrélations avec les fréquences d'occurrence des nuages à sommets froids, publiées dans *l'Espace Géographique*, attestent de l'importance des téléconnexions en octobre-décembre (Figure 4, in 19/ Richard et al., 1998). L'élément qui explique la netteté des structures spatiales en octobre-décembre, et leur faiblesse lors des autres saisons, est à rechercher au sein de la composante zonale de la circulation cellulaire divergente sur l'océan Indien (10/ Camberlin et al., 1994 ; 19/ Richard et al., 1998 ; Black et al., 2003 ; Clark et al., 2003). En octobre décembre, sur l'océan Indien, la position de la Zone de Convergence InterTropicale (ZCIT) correspond en moyenne à l'équateur géographique. Les anomalies de la composante zonale du vent sur le rail équatorial comme celles de la TSO sont maximales et cohérentes entre elles. Lorsqu'en raison d'un fort gradient de pression entre l'est et l'ouest de l'océan Indien, les vents équatoriaux d'ouest sont renforcés dans les basses couches, indiquant une forte circulation de type Walker sur l'océan Indien, les TSO sont anormalement froides près des côtes africaines. Les alizés austraux de l'océan Indien ont une orientation assez zonale. Les pluies de mousson, comme les pluies associées à l'alizé de sud-est, sont moins importantes qu'en moyenne en Afrique orientale équatoriale. L'orientation très zonale de l'alizé favorise au contraire la bonne pénétration de l'air humide de l'océan Indien sur le subcontinent austral, via les vallées du Zambèze et du Limpopo où des excédents pluviométriques sont enregistrés.

Lors de la fin de l'été austral, les pluies sont faibles en Afrique orientale. Ensuite, lors des long rains, de mars à mai, les structures de variabilité sont moindres (19/ Richard et al., 1998) et les mécanismes associés à la variabilité interannuelle sont différents. La cohérence saisonnière des précipitations est faible, limitée à l'Ouganda et au Kenya intérieurs et plus associée à des anomalies méridiennes de la circulation que zonale. De surcroît, les pluies deviennent très faibles en Afrique australe, ce qui est encore plus vrai lors de l'hiver austral.

c/ Perspectives

Développer ce type de travail sur les marges nord-ouest de l'Afrique australe

Il convient maintenant d'effectuer ce type de travail en intégrant des données angolaises et zaïroises en utilisant les fichiers CRU (New *et al.*, 1999 ; 2000) afin de mieux définir les limites nord-ouest de l'aire de covariabilité que constitue l'Afrique australe. Du point de vue saisonnier, l'intérêt portera sur la fin de l'été austral (mars, avril, mai). Il s'agit de la principale saison des pluies plus au Nord (Angola par exemple). Mais l'importance de cette période de l'année est déjà sensible en Namibie et dans la province Northern Cape. Dans ces régions, bien que le régime soit unimodal, le maximum pluviométrique n'est atteint qu'en mars.

à partir de précipitations estimées par satellite.

Le problème fut longtemps le manque de données mesurées *in situ*. Néanmoins, avec le développement de l'estimation des pluies par satellites, ce type de recherche pourrait être envisagé sur les deux dernières décennies. Pour cela, il convient d'utiliser les données CMAP (Xie et Arkin, 1996) ainsi que les précipitations estimées à partir des données MSG en collaboration avec l'équipe de Michel Desbois dans le cadre du futur GDR.

Axe 3 : Cohérence intra saisonnière

a/ Objectifs

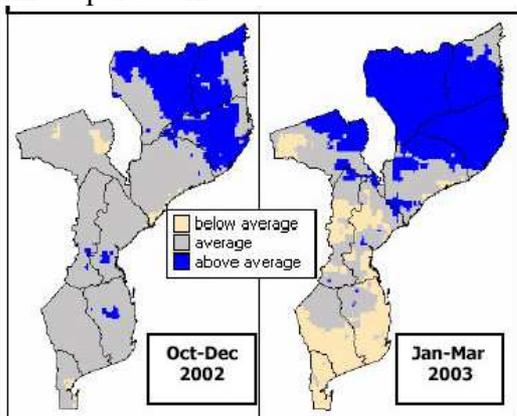
Comment déterminer les saisons ?

Les études traitant de la variabilité pluviométrique nécessitent au moins deux pré requis. Le premier tient à l'aire considérée, le second au pas de temps. Ces points sont cruciaux car ils déterminent les résultats. En domaine tropical, la sensibilité des précipitations aux conditions de surface océanique fait que l'inertie est grande. Les anomalies perdurent souvent plusieurs mois, à l'image du Mozambique en 2002-2003 (Fig. 8a). Ainsi les travaux s'appuient-ils généralement sur des pas plurimensuels, souvent trimestriels. Peut-on pour autant parler de saisons pour ces trimestres ? La question n'est pas seulement sémantique. Le terme de saison renvoie au calendrier moyen. Ainsi définit-on des saisons pluvieuses et saisons sèches en domaine tropical. Mais ces saisons sont-elles les unités temporelles devant être utilisés dans les études de variabilité ?

De la même manière, une année excédentaire n'est pas nécessairement une année au sein de laquelle la saison des pluies a été uniformément excédentaire. Il peut aussi s'agir d'une année où un mois seulement a été largement arrosé ou, à l'opposé, d'une année où la saison des pluies a été normalement intense mais particulièrement longue. En théorie, entre ces deux situations existent de multiples cas. Les conséquences ne seront pas les mêmes pour l'agriculture. L'exemple de la saison des pluies 2002-2003 montre que la persistance plurimensuelle d'anomalies pluviométriques (Fig. 8a) a de lourdes conséquences sur la production agricole (Fig. 8b).

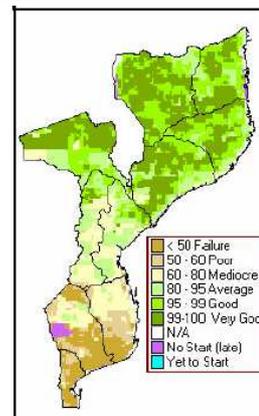
Figure 8 : Les pluies de l'été 2002-2003 au Mozambique et une de leurs conséquences.

a) anomalies pluviométriques estimées par satellite.



Source : <http://www.reliefweb.int>

b) Indice de satisfaction en eau et état du maïs.



Source : <http://www.reliefweb.int>

Un premier découpage saisonnier classique.

Dans ma thèse, le pas de temps considéré s'appuyait sur la littérature, en particulier sur des travaux de chercheurs sud-africains. Les travaux de d'Abreton (1992), d'Abreton et Lindesay (1993), Mason (1992) et Mason et Lindesay (1993) ont été utilisés pour découper la période estivale, ou saison pluvieuse, en deux trimestres : octobre-décembre et janvier-mars. La distinction entre début (octobre-décembre) et fin (janvier-mars) de saison des pluies ne repose ni sur des moyennes ni sur une quelconque bi-modalité du régime pluviométrique, mais sur la dynamique atmosphérique. En octobre-décembre, les systèmes baroclines dominent : isobares et isothermes se recourent, ce qui signe la présence de perturbations de type tempéré. Ils laissent place en janvier-mars à des systèmes barotropes où isobares et isothermes sont parallèles (d'Abreton et Lindesay, 1993). Ce découpage peut paraître pertinent dans une étude de variabilité interannuelle dans la mesure où la variabilité pluviométrique dépend directement de celle des systèmes pluviogènes.

Découpage remis en question.

Depuis la thèse, des études utilisent ce découpage. La majorité des communications et publications sont consacrées aux études de fin d'été (janvier-mars). En effet, pour l'Afrique australe, les résultats portant sur octobre-décembre, hormis le fait de la distinguer de l'Afrique orientale en montrant l'existence d'un dipôle pluviométrique en liaison avec la circulation de type Walker de l'océan Indien, témoignent de la faiblesse des liens entre anomalies pluviométriques et indicateurs de la circulation supra régionale à générale. Les chercheurs travaillant sur l'Afrique de l'Est sont rompus à la faible cohérence des pluies pour une saison particulière : les « long rains ». En Afrique australe, la cohérence des anomalies pluviométriques observées entre les mois successifs, et tout particulièrement octobre, novembre et décembre est testée.

b/ Résultats

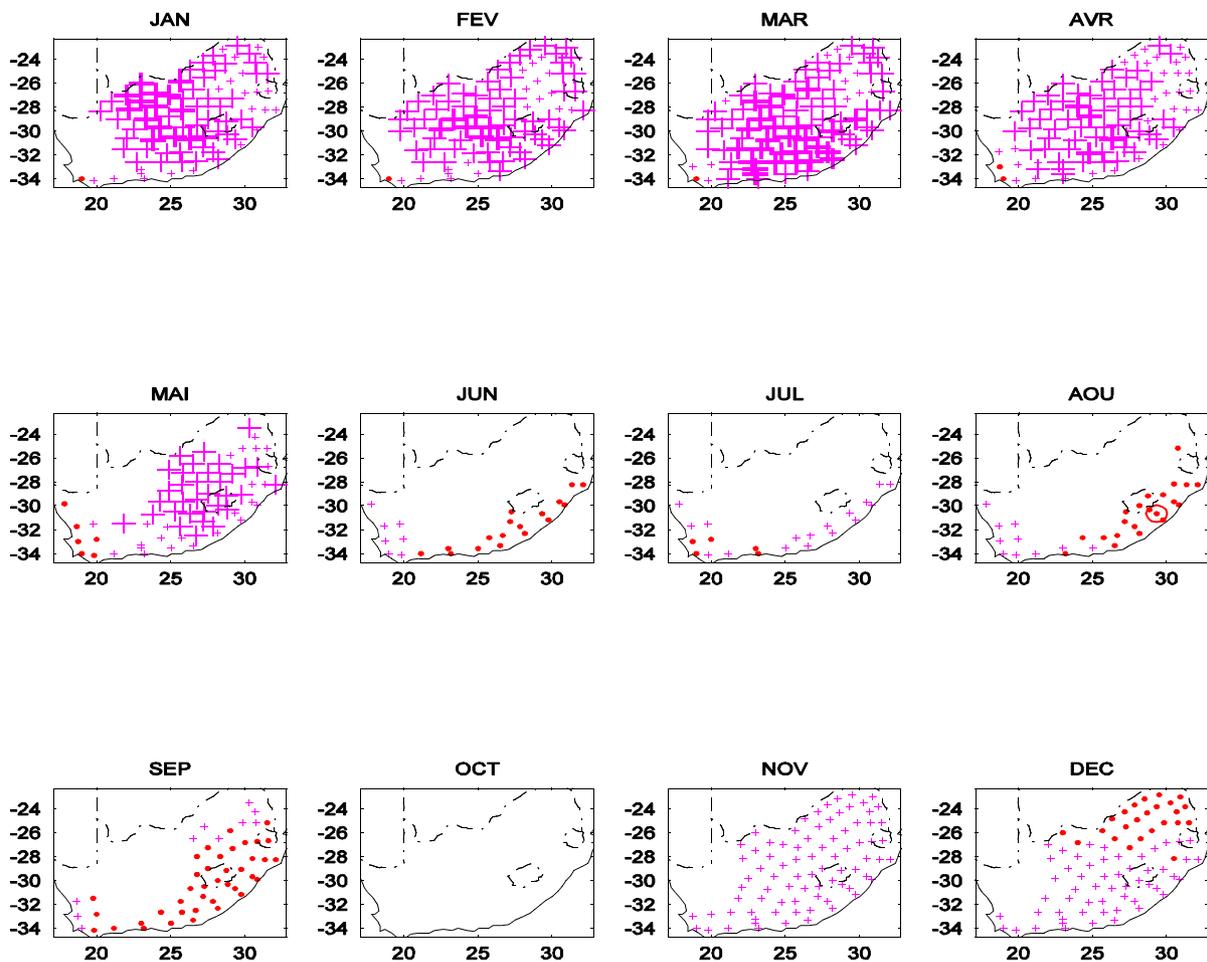
Réinvestir la question du découpage saisonnier.

En utilisant le fichier pluviométrique du SAWS, fichier obtenu gracieusement dans le cadre de programmes, nous avons étudié la cohérence intra-saisonnière de la variabilité pluviométrique en RSA sur la période 1920-2000. Sur 79 années pluviométriques (juillet 1920 – juin 1921 à juillet 1998 – juin 1999), une ACP étendue (Weare et Nasstrom, 1982) a été effectuée. Celle-ci présente l'originalité de placer l'espace et les mois en variables, tandis que les années sont positionnées en observations. Le résultat (21/ Richard *et al.*, 2001 ; 20/ Richard *et al.*, 2002) est double :

A/ Il existe une cohérence temporelle de la variabilité pluviométrique de décembre à avril (Fig. 9).

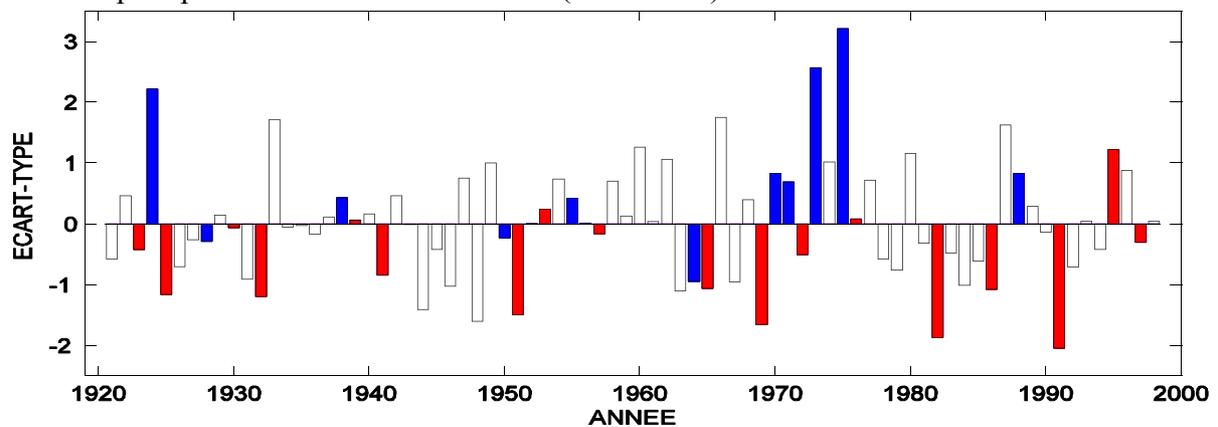


Figure 9 : Cohérence inter mensuelle des scores obtenus sur le premier axe d'une ACP étendue portant sur les précipitations mensuelles en RSA (1920-1999).



Cette période de cinq mois ne correspond pas à une saison du point de vue du régime. Aucune étude de climatologie n'a jusqu'alors porté sur cette période. Au sein de celle-ci, le trimestre janvier-mars constitue un bloc plurimensuel cohérent, mais certainement pas le plus efficace. Le lien statistique entre l'ENSO et la chronique calculée sur décembre-avril (Fig. 10) dépasse, en valeur absolue, ceux précédemment calculés sur janvier-mars.

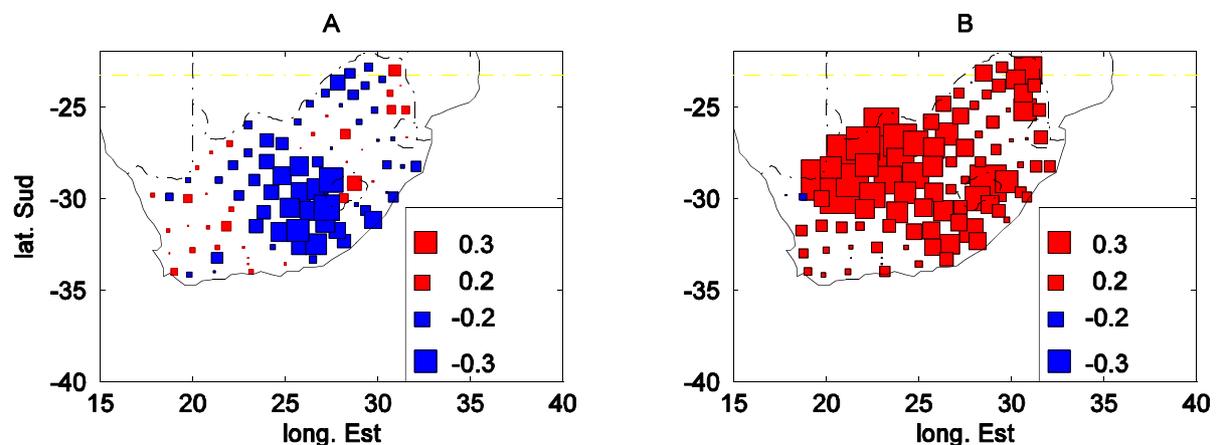
Figure 10 : Composante temporelle du premier axe d'une ACP étendue portant sur les précipitations mensuelles en RSA (1920-1999) et événements ENSO/LNSO.



bleu : années LNSO, rouge : années ENSO

B/ Les anomalies pluviométriques du mois d'octobre tendent à s'opposer à celles qui suivent en décembre-avril (Fig. 11). Octobre-décembre n'est donc pas un trimestre pertinent pour l'étude de la variabilité pluviométrique en RSA.

Figure 11 : corrélations entre les précipitations d'octobre et celles de décembre-avril (1920-1999).



Proposition d'un nouveau découpage saisonnier.

Des recherches effectuées dans le cadre de maîtrises attestent de la robustesse de ce nouveau découpage. Dans l'est de la Province du Cap (Cassagne, 2003) comme dans le nord-est de la RSA (Camus, 2003), octobre est un mois qui s'individualise en s'opposant au reste de la saison des pluies, saison au sein de laquelle la cohérence intermensuelle des anomalies pluviométriques est assez forte. Ce découpage semble également pertinent au Mozambique (Atanasio Manhique, communication personnelle).

Les principaux résultats ont été présentés dans le cadre d'une conférence pour l'École Doctorale « Orsayterre » de l'Université d'Orsay (43/ Richard, 2002) et publiés dans une revue de géographie française (20/ Richard *et al.*, 2002). Ces recherches ont été poursuivies en mettant l'accent sur les conséquences que cela pouvait avoir sur la ressource en eau en Afrique du Sud (41/ Fauchereau *et al.*, 2003). En effet, au-delà des cas particuliers que représentent la pluie et l'Afrique du Sud, ces travaux montrent que la notion de saison, basée sur les régimes moyens, n'est pas automatiquement appropriée dans les études portant sur la variabilité.

c/ Perspectives

Utiliser le découpage octobre / décembre-avril.

Dans les travaux futurs dédiés à l'Afrique australe, un bloc plurimensuel cohérent : décembre-avril sera utilisé. En outre, des études spécifiques seront dédiées au cas du mois d'octobre. Le découpage traditionnel octobre-décembre et janvier-mars, basé sur le régime moyen, sera abandonné, au profit du découpage octobre / décembre-avril fondé sur un critère statistique prenant en compte la variabilité interannuelle. Pour les travaux dédiés à des sous-espaces en Afrique australe, ou à de tout autres espaces, des ACP étendues seront systématiquement appliquées afin de déterminer les saisons cohérentes du point de vue de la variabilité.

Pour améliorer les prévisions saisonnières.

Pour l'Afrique australe, le fait que des excédents de début d'été (octobre) préfigurent une mauvaise saison des pluies (décembre-avril) est un élément qui devra être considéré pour la prévision saisonnière. Des nouveaux prédictors (les précipitations d'octobre et les anomalies de la TSO ou/et de l'atmosphère qui leur sont associées) par rapport aux études de ce type (Hastenrath *et al.*, 1995, Makarau et Jury, 1997) seront intégrés dans des modèles statistiques simples et robustes du type régressions multiples et analyses discriminantes en jack-knife (Philippon, 2002).

Chapitre 1 : conclusions principales

Les principaux résultats sont liés à la méthodologie employée. En Afrique du Sud, ils montrent que sécheresses et excédents sont plus le fait de modifications de l'amplitude du régime pluviométrique saisonnier que d'une perturbation du calendrier habituel. Les principales anomalies pluviométriques sont récurrentes tout au long du siècle sans présenter de tendance marquée.

Du fait de la relative correspondance entre anomalies pluviométriques et saison des pluies, pour l'Afrique du Sud comme pour l'ensemble Afrique australe Afrique de l'Est, la variabilité interannuelle s'inscrit dans un cadre spatial largement contraint par les régimes pluviométriques moyens. Deux aires à régimes distincts n'appartiennent pas à la même entité du point de vue de la variabilité interannuelle. Néanmoins, certaines saisons sont plus propices au développement d'anomalies généralisées. Tel est le cas des short rains en Afrique de l'Est.

Enfin, si les anomalies pluviométriques majeures interviennent lors de la saison des pluies, elles ne revêtent pas un caractère homogène. En Afrique du Sud, octobre se distingue nettement, de par le signe de l'anomalie pluviométrique, de la suite de la saison des pluies.

Publications

Axe 1

24/ ROUAULT M., **RICHARD Y.**, 2003: Intensity and spatial extension of drought at different time scales since 1921 in South Africa. *Water S.A.*, **29(4)**, 489-500.

Axe 2

10/ CAMBERLIN P., **RICHARD Y.**, BELTRANDO G., 1994 : Structures spatio-temporelles de la pluviométrie sur la façade orientale de l'Afrique, de l'Ethiopie au Mozambique. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **7**, 447-454.

19/ **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.

Axe 3

20/ **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.

41/ FAUCHEREAU N., MULENGA H., **RICHARD Y.**, CAMBERLIN P., 2003: Intra-seasonal coherency of South African rainfall. *South African Journal of Science*, sous presse.

Chapitre 2

Variabilité interannuelle

En aval des précipitations, des études d'impact sur la végétation.

En arrivant à Dijon, j'ai souhaité développer des études traitant de quelques impacts de la variabilité pluviométrique, me placer en aval des pluies. A l'image des diagnostics réalisés en amont de la pluviométrie, les analyses portent sur de vastes espaces, sans développement d'une climatologie d'échelles plus fines. Parmi les impacts de la pluviométrie, ceux qui affectent l'hydrologie, la végétation ou la production agricole constituaient les pistes les plus réalistes. Concernant les recherches liant climat et agriculture en Afrique australe, ma seule contribution est une collaboration ponctuelle. Les aspects décennaux prévalent dans ce travail par conséquent présenté dans le chapitre suivant. Pour l'impact sur l'hydrologie, l'un des objectifs était de mettre en relation la variabilité des bilans des grands lacs africains avec celle de la pluviométrie. Même si certains résultats s'inscrivent dans un cadre interannuel, les principaux mettent l'accent sur la variabilité décennale. Pour cette raison, et pour ne pas les scinder en deux, j'ai également intégré les publications correspondantes et leur analyse dans le chapitre relatif à la variabilité décennale. Dans ce chapitre, en axe 1, n'est donc présenté que l'impact sur la végétation.

En amont des précipitations, poursuite des travaux sur la TSO.

Mon doctorat traitait de la variabilité pluviométrique en Afrique australe entre 1946 et 1979. Cette période s'était imposée du fait de la disponibilité des données (peu nombreuses avant 1946, difficilement mises à jour au cours de ma thèse pour la décennie 1980). Trente-quatre ans, c'est à la rigueur suffisant lorsque l'objet est l'étude de la variabilité interannuelle. C'est insuffisant pour analyser des variations plus lentes (décennales et plus). Ces recherches doctorales se limitaient donc à la variabilité interannuelle des précipitations et à ses relations avec des anomalies mesurées en surface océanique. J'ai poursuivi ces travaux après avoir actualisé les bases de données. Ces recherches s'inscrivent dans une climatologie diagnostique dont l'objectif est de mieux connaître les modalités spatiales et temporelles de la variabilité pluviométrique interannuelle, ainsi que certaines de ses connexions et téléconnexions. Elles se situent en amont des pluies. Les travaux afférents sont présentés en axe 2.

Travailler sur toute la troposphère.

L'accent est mis sur des hypothèses permettant d'interpréter les relations observées entre précipitations et TSO. Pour cela, l'attention est portée sur les anomalies de circulation atmosphérique et de convection profonde, en particulier via les flux sortants grande longueur d'onde (axe 3).

Axe 1 : Impact sur la végétation

a) Objectifs

Une recherche devenue possible à partir de données satellites.

Du point de vue des sociétés et des milieux, l'intérêt de l'étude de la variabilité pluviométrique se mesure au travers d'impacts. Suivre les conséquences des excédents et déficits de précipitations sur la végétation, qu'il s'agisse de zones cultivées ou de milieux à dominante naturelle, nécessite d'avoir des renseignements sur de vastes espaces et sur plusieurs années. Longtemps ceci fut impossible. Le lancement, depuis les années soixante-dix, de satellites a permis le développement de ce type de recherches. Plusieurs indices sont élaborés à partir de données satellites. Parmi eux, le Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) est le plus utilisé, et ce depuis presque vingt ans (Justice *et al.*, 1985). C'est le cas pour l'Afrique (Tucker *et al.*, 1985 ; Townshend et Justice, 1986). Il est disponible depuis 1979, mais souffre de problèmes dont la contamination par la couverture nuageuse, les variations d'angles de prises de vues par rapport au nadir ou au soleil, ainsi que les variations des horaires de passage au-dessus d'un point donné (Holben, 1986). Néanmoins, le NDVI peut s'avérer être un bon indicateur d'anomalies climatiques interannuelles, comme en témoigne sur l'Afrique son lien avec l'ENSO (Anyamba et Eastman, 1996 ; Anyamba *et al.*, 2002).

Quels sont les caractères de la relation précipitations/NDVI en Afrique tropicale ?

Dans une première étape, l'objectif d'Isabelle Pocard (1996) fut d'éprouver en quoi l'activité photosynthétique, comme le NDVI la restituait, était liée à la pluviométrie en termes de répartition spatiale, de cycle saisonnier et d'anomalies interannuelles. La réponse à cette question était susceptible d'indiquer les espaces sur lesquels des recherches plus approfondies de liens entre variabilités de la pluie et du NDVI pouvaient être entreprises. Notre but était d'utiliser le NDVI comme un indice de la variabilité pluviométrique, indice qui présente l'inconvénient d'être relativement peu fiable dans le temps (faible profondeur temporelle et nombreuses ruptures de séries ou de stationnarité de celles-ci), mais l'avantage d'offrir une couverture spatiale continue, contrairement au réseau de postes pluviométriques jusqu'alors utilisés dans les études de variabilité.

Et plus particulièrement en Afrique australe ?

Dans un second temps, une recherche dédiée à l'Afrique australe fut initiée. Le Botswana ou/et le Kalahari apparaît comme étant l'une des régions parmi les plus examinées d'Afrique (Prince et Astle, 1986 ; Prince et Tucker, 1986 ; Ringrose et Matheson, 1991 ; Farrar *et al.*, 1994 ; Nicholson et Farrar, 1994 ; Veenendaal *et al.*, 1996 ; Gondwe et Jury, 1997). Notre objectif principal était de déterminer les conditions géographiques (nature du sol, type de végétation, climat) optimales pour considérer le NDVI comme un bon indicateur de la variabilité pluviométrique interannuelle.

b) Résultats

Nous avons constitué des fichiers pour comparer pluies et NDVI.

La première étape fut de constituer deux bases de données comparables pour les précipitations et le NDVI. Pour les précipitations, le fichier «CRC» comportait 466 stations pluviométriques plus ou moins bien réparties sur l'Afrique au sud du Sahara. Les données mensuelles couvraient alors la période 1951-1990. Une version en points de grille de 2°5 côté est accessible en ligne (<http://www.u-bourgogne.fr/climatologie>).

Nous avons travaillé sur une version du fichier NDVI comportant des données décennales en points de grille de 1° de côté. Ce fichier NDVI couvrait alors la période 1983-1992. En 1996, il était disponible auprès du Goddard Space Flight Centre (GSFC). À noter que cette version avait préalablement été validée (Los *et al.*, 1994). À partir des données décennales, nous avons retenu la Valeur Maximale Composite (MVC), valeur conseillée par Gutman (1989).

Nous avons identifié les régions d'Afrique où le NDVI signalait bien la variabilité interannuelle des précipitations.

Pour l'Afrique, nous avons comparé (corrélations en phase et décalées) des valeurs mensuelles de pluies et de NDVI sur l'ensemble des points de grille de 2°5 documentés. Les principaux résultats (17/ Pocard et Richard, 1996; 14/ Pocard et Richard, 1996) montrent que :

- Quatre espaces se distinguent du point de vue de la relation pluies/NDVI : une zone soudano-sahélienne, une région guinéo-congolaise, un espace somalo-kenyan et un espace zambézien ;
- Le NDVI n'est pas partout un marqueur fiable de la variabilité interannuelle de la pluviométrie. Seuls les espaces relativement peu tourmentés topographiquement des régions sahéliennes, est-africaines et Sud-africaines offrent un potentiel de ce point de vue ;
- Le temps moyen de réponse du NDVI à la pluie oscille entre 0 et 3 mois selon la région. En Afrique, il est maximal sur les forêts claires (miombo, White 1986) du bassin du Zambèze ;
- Le temps de réponse du NDVI à la pluie varie également selon la saison. L'exemple pris au Zimbabwe montre que la reprise de l'activité chlorophyllienne s'effectue immédiatement après le début de la saison des pluies, alors que le dépérissement de la végétation n'est observé que plusieurs mois après l'arrêt des pluies.

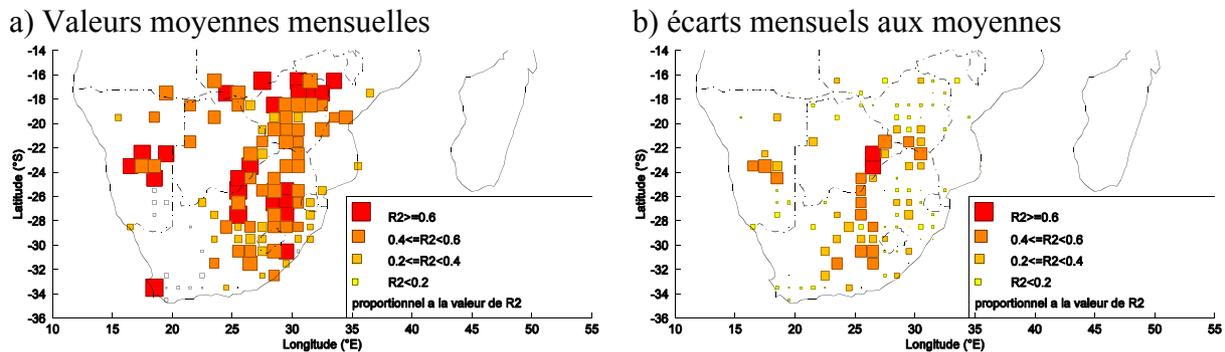
Nous avons précisé l'impact des pluies sur le NDVI en Afrique australe.

Pour l'Afrique australe, nous avons travaillé sur une maille plus fine (1° côté) et intégré d'autres paramètres : la nature du sol et le type de végétation. Le choix de cinq zones test (34/ Richard et Pocard, 1996) a permis d'observer que :

- La corrélation entre les régimes saisonniers respectifs des précipitations et du NDVI est maximale (0.8), en moyenne sur l'Afrique australe, lorsque l'on considère le bimestre pluviométrique précédant la donnée mensuelle de NDVI ;

- Le niveau de la corrélation entre les régimes est proportionnel à l'ampleur du régime pluviométrique (Fig. 12a). Les régions tropicales à saisons alternées bien marquées, Zimbabwe et nord de la RSA, connaissent les rythmes de valeurs de NDVI les plus sensibles aux régimes des précipitations ;
- Au-dessus de 600 mm de précipitations moyennes annuelles, Zimbabwe, Drakensberg, le NDVI est peu sensible à la variabilité pluviométrique interannuelle (Fig. 12b). Le NDVI est le meilleur indicateur de la variabilité pluviométrique sur et autour du Kalahari.

Figure 12 : Coefficients de détermination entre précipitations et NDVI
(Points de grille de 1° côté, 1983-1988).



Nous avons développé une méthodologie originale.

Nous avons calculé les moyennes annuelles (pluviométrique et de NDVI) de chaque point de grille. Dans une ACP, portant sur une matrice booléenne intégrant des variables qualitatives, les types de sols (simplifiés d'après FAO-UNESCO 1976) et de végétation (White, 1986), et des séries quantitatives, les moyennes annuelles de NDVI et de pluie, ainsi que les coefficients de détermination calculés entre cycles annuels moyens de pluies et de NDVI et calculés également entre anomalies interannuelles respectives. Les principaux résultats, obtenus à partir de cette méthodologie originale et validée (18/ Pocard et Richard ; 7/ Richard et Pocard, 1998), confirment ceux de l'étude précédente et attestent également que :

- La sensibilité du NDVI au rythme pluviométrique moyen est maximale lorsque les volumes annuels précipités dépassent 300 mm, là où la végétation naturelle est constituée de forêts claires ou de bush ;
- À cette échelle, la réponse du NDVI au rythme saisonnier semble peu affectée par le type de sol ;
- L'aptitude du NDVI à signer la variabilité interannuelle des précipitations est maximale lorsque les volumes moyens annuellement précipités sont compris entre 300 et 500 mm sur les prairies du veld sud-africain et les planosols.

c) Perspectives

Mieux connaître les différents termes du cycle de l'eau.

Pour poursuivre ce type d'analyses, il est souhaitable de mieux connaître d'autres éléments du cycle de l'eau, comme l'évaporation par exemple. La mise à disposition en ligne des données NCEP permettait, *a priori*, d'accéder à une meilleure prise en compte du cycle de l'eau. C'est pourquoi nos recherches sur le NDVI ont temporairement été mises de côté, et c'est l'une des raisons expliquant que nos travaux aient été réorientés sur l'exploitation des réanalyses du NCEP. Les réanalyses NCEP-DOE AMIP-II (Kanamitsu *et al.*, 2002), disponibles à un pas de temps quadri-quotidien, permettent de mieux quantifier les différents termes du cycle de l'eau. Pascal Roucou a développé une méthodologie testée sur l'Afrique de l'Ouest. Cette méthodologie est appliquée à l'Afrique australe dans la thèse à soutenir de Nicolas Fauchereau. Deux boîtes représentant l'Afrique australe tropicale et l'Afrique australe subtropicale servent de cadre au sein desquels sont comparés, au pas de temps mensuel, les précipitations NCEP-II et CMAP et les flux d'humidités aux quatre bornes (directions cardinales). Les flux sont calculés sur l'ensemble de la troposphère depuis la surface jusqu'à 300 hPa. Ils considèrent les vents et l'humidité spécifique calculée à partir de la température et de l'humidité relative fournis dans NCEP-II. Les flux totaux sont décomposés en différents termes : moyens et transitoires. Les flux moyens étant eux-mêmes la somme des composantes de divergence, d'advection et orographique.

Considérer une échelle plus fine.

Les résolutions des différents fichiers, dont le NDVI, sont aujourd'hui de l'ordre de 10 Km de côté (contre 1° dans nos études effectuées au milieu des années 90). À cette échelle, d'autres couches d'informations comme les Modèles Numériques de Terrain ou les précipitations estimées par satellites sont en cours d'intégration par Pascal Oettli, dans le cadre de sa thèse dirigée par Pierre Camberlin.

Axe 2 : Liens avec la Température de Surface Océanique.

La climatologie des années 1960 et 1970 s'appuie peu sur la TSO.

Dans les années 1960 et 1970, les recherches tentant d'expliquer la variabilité pluviométrique interannuelle portent essentiellement sur l'atmosphère. Les données de pression et de vent, mesurées en quelques rares stations météorologiques *via* des radiosondages, constituent le matériau principal. Cette climatologie, où le pas de temps est souvent quotidien, nécessite une vision synoptique des processus. En France, Pédelaborde (1957) définit la climatologie dynamique (Beltrando, 2000). Cette approche privilégie la définition de types de circulation, de types de temps et de situations synoptiques (Pagney et Péguy, 1972).

En Afrique australe, les travaux de ce type sont essentiellement effectués par Dyer (1979, 1982) et Tyson (1981, 1984). Les premiers modèles statistiques de prévision sont élaborés. Ils ne prennent pas en compte la TSO (Dyer, 1976 ; 1977b). Cette climatologie s'appuie beaucoup sur les mesures effectuées par radiosondages en RSA (Cape Town, Alexander Bay, Durban et Pretoria), au Zimbabwe (Bulawayo), en Namibie (Windhoek), sur l'île Maurice et dans deux îles de l'océan austral : Gough, au sud-ouest du continent africain, et Marion, au sud-est. Les niveaux 850 et 500 hPa (mb à l'époque) sont privilégiés. Pour l'Afrique australe, cette approche donne la part belle aux influences tempérées (radiosondages plus nombreux, niveaux géopotentiels et pas de temps mieux adaptés).

Dans les années 1980, les études portant sur la TSO se multiplient, surtout sous les tropiques.

Dans les années 1980, la mise à disposition de fichiers de mesures permettant d'avoir une couverture spatiale correcte des océans, comme les fichiers Français Océan et Climat Atlantique équatorial (FOCAL) (Hénin *et al.*, 1986), ou COADS (Woodruff *et al.*, 1987), croisée avec le développement de l'informatique et de la puissance de calcul, contribue à l'avènement « du règne de la TSO ». En domaine tropical, auquel appartient majoritairement l'Afrique australe, les précipitations, et leur variabilité interannuelle, sont, plus qu'aux latitudes plus élevées, contrôlées par la TSO (Hastenrath, 1985).

Ainsi ont été réalisées de nombreuses études de climatologie tropicale s'appuyant sur la TSO. En France, celles-ci se sont multipliées à la fin des années 1980 avec par exemple Beltrando (1990), Fontaine (1990) et Janicot (1990). Les fichiers de TSO sont fournis au pas de temps mensuel. La climatologie privilégie les pas de temps mensuel à saisonnier et utilise de plus en plus des techniques statistiques (Beltrando, 2000).

Concernant l'Afrique australe, plusieurs thèses sont soutenues sur ce thème (Walker, 1989 ; Mason, 1992 ; Rocha, 1992 ; Richard, 1993). Comme les routes des navires marchands contournent le Cap de Bonne-Espérance, les données sont relativement correctes autour de l'Afrique australe. En revanche, les navires ne s'aventurent guère au-delà de 35 à 40° Sud. L'influence de la TSO de l'océan austral ne peut pas être étudiée. Pour l'Afrique australe, cette approche met l'accent sur les latitudes tropicales (données plus fiables et pas de temps mieux adapté).

a/ Objectifs

Au début des années 1990, pour l'Afrique australe, la littérature montre que :

- L'influence des anomalies de TSO de l'océan Indien est fondamentale (Walker, 1990 ; Mason, 1992 ; Mason, 1995) ;
- La variabilité pluviométrique n'est pas indépendante des anomalies de TSO de l'océan Atlantique subtropical (Mason, 1990). Toutefois, à l'exception des étroites plaines littorales dont les précipitations sont extrêmement sensibles aux variations de la TSO au sein des courants de Benguela (Walker *et al.*, 1984 ; Walker, 1987) et d'Angola (Guilcher, 1982 ; Hirst et Hastenrath, 1983), ainsi qu'à la latitude où se rencontrent ces deux courants (Nicholson et Entekhabi, 1987), les anomalies de TSO de l'océan Atlantique tropical n'ont qu'une incidence secondaire sur la pluviométrie de sous-continent ;
- Les précipitations sont corrélées avec le phénomène ENSO (Lindesay, 1988 ; Van Heerden *et al.*, 1988) ;
- Les études de TSO aux latitudes subtropicales et tempérées de l'hémisphère sud sont relativement rares en raison de la piètre qualité des données à ces latitudes situées à l'écart des principales voies maritimes sillonnées par les navires marchands.

La recherche de liens statistiques entre anomalies de précipitations et de TSO.

Plusieurs orientations ont été données pour prolonger et approfondir les résultats du Doctorat. 1/ L'extension de la fenêtre des TSO étudiée en latitude (amélioration des données grâce à l'apport des satellites) et en longitude (prise en compte du Pacifique). 2/ La diversification des sources (United Kingdom Meteorological Office (UKMO), Global Interpolated Sea Surface Temperature (GISST) et non plus uniquement COADS). 3/ La diversification de la nature des données étudiées (sorties de modèles et non plus exclusivement données observées). Toutes ces études ont pour objectif la poursuite des recherches de connexions ou de téléconnexions entre précipitations d'Afrique australe et TSO.

L'évaluation quantitative de l'impact de la TSO sur les pluies.

L'approche statistique permet d'identifier des relations, de les localiser et d'en mesurer point à point l'intensité. Mais un lien statistique n'est pas synonyme d'une causalité. Schématiquement, aux échelles considérées, l'évolution temporelle des précipitations consiste en la combinaison linéaire d'une composante forcée, essentiellement en réponse aux conditions océaniques, et d'une composante interne à l'atmosphère. L'estimation du rapport entre ces deux composantes est impossible par l'analyse des séries observées car, 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 de réalisations, la moyenne de cet ensemble (Venzke *et al.*, 1999). L'objectif est donc d'utiliser un nombre fini de réalisations climatiques virtuelles, en s'appuyant sur des Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGA) forcés sur des périodes suffisamment longues par les TSO observées, afin de discriminer, pour les variations interannuelles des précipitations en Afrique australe, la composante forcée par la TSO de celle interne à l'atmosphère.

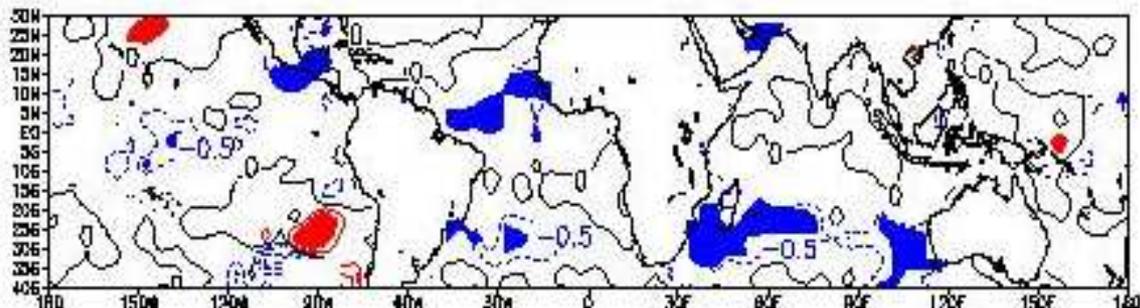
b/ Résultats

Le rôle l'océan Atlantique : de nombreuses interrogations subsistent.

Une attention toute particulière fut accordée à l'océan Atlantique dans le cadre du programme Etude du Climat de l'océan Atlantique Tropical (ECLAT) du Programme National d'Etude du Climat (PNEDC). Les variations de TSO affectant l'océan Atlantique sont liées à la pluviométrie d'Afrique de l'Ouest comme en témoignent les années 1982, 1984, 1987 et 1988 (15/ Pocard *et al.*, 1998). Au-delà des anomalies de TSO propres à l'océan Atlantique tropical (Folland *et al.*, 1984 ; Picaut *et al.*, 1984 ; Servain *et al.*, 1985 ; Nicholson et Nyenzi, 1990 ; Dommenges et Latif, 2000), la TSO de l'océan Atlantique tropical est modulée par l'ENSO (Nicholson, 1997 ; Elliot *et al.*, 2001). Nous avons montré l'interférence des forçages croisés, ENSO et anomalies de TSO de l'océan Atlantique sur la pluviométrie en Afrique de l'Ouest (32/ Pocard *et al.*, 1998) ainsi qu'au Nordeste brésilien (Roucou *et al.*, 1998 ; 35/ Roucou *et al.*, 2000).

Concernant les précipitations d'Afrique australe et la TSO de l'océan Atlantique, les analyses classiques (corrélations, analyses composites, ACP) sur des données mesurées par les navires (COADS, UKMO, GISST) n'ont pas permis d'identifier des liens cohérents et significatifs. L'analyse de données issues d'expériences de sensibilité (le Modèle de Circulation Générale de l'Atmosphère (MCGA) Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle (ARPEGE) 1.0 de Météo France forcé par des anomalies de TSO sur les bassins nord et sud de l'océan Atlantique (45/ Trzaska *et al.*, 1997 ; 37/ Trzaska *et al.*, 1997 non reproduit dans le tome 2) a également montré le faible impact des anomalies de TSO de l'océan Atlantique sur la pluviométrie en Afrique australe. Néanmoins, les sécheresses des années 1950 et 1960 sont associées à des anomalies négatives de la TSO au large du Brésil (Fig. 13, in 5/ Richard *et al.*, 2001).

Figure 13 : Corrélations entre la TSO et les précipitations de janvier-mars en Afrique australe (1950-1969).



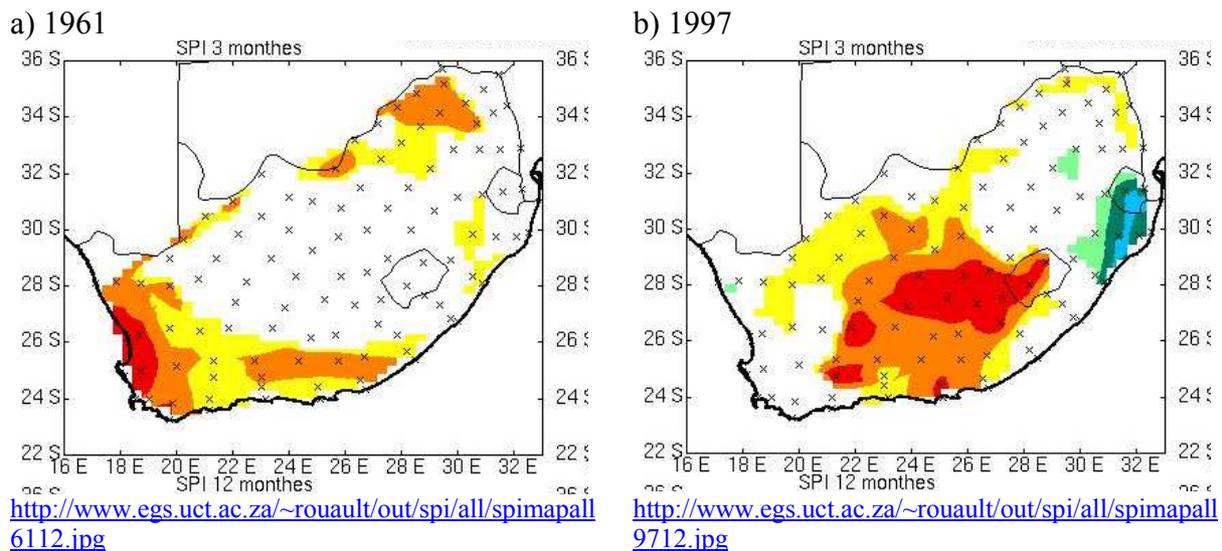
Tout récemment, des hypothèses relatives au rôle de la TSO du courant de Benguela sont proposées (Rouault *et al.*, 2003). Lors d'événements chauds (1984, 1986, 1995 et 2001) au large de l'Angola et de la Namibie, des excédents pluviométriques sont observés sur les régions côtières concernées directement par l'intensification locale de l'instabilité et de l'évaporation. Les excédents pluviométriques de fin d'été seraient plus importants et étendus vers l'intérieur du continent lorsque la circulation de large échelle est favorable. Des TSO élevées limiteraient l'exportation vers l'océan Atlantique de l'humidité en provenance de l'océan Indien transportée par les alizés d'est.

Quelques précisions sur l'impact des anomalies de TSO de l'océan Indien tropical.

J'ai effectué un séminaire au Laboratoire de Météorologie Dynamique (LMD) à l'École Polytechnique montrant l'importance des conditions de surface de l'océan Indien équatorial sur la pluviométrie de deux régions d'Afrique tropicale : l'Afrique orientale méridionale et l'Afrique australe. Ces aspects, pour la saison d'octobre-décembre, ont été publiés dans *La Météorologie* (17/ Richard, 1994). Les anomalies de TSO de l'océan Indien équatorial, partie ouest du bassin, contribuent à expliquer la structure spatiale que forment les anomalies pluviométriques observées en Afrique orientale méridionale et australe en début d'été (octobre-décembre).

L'Afrique orientale équatoriale connaît parfois de très forts excédents pluviométriques lors de la saison des short rains (octobre-décembre). Ils peuvent induire, comme ce fut le cas en 1961 et 1997, d'importantes inondations. Lors de ces deux années, un dipôle ouest/est de TSO est observé indépendamment de l'ENSO (Saji *et al.*, 1999). On constate effectivement que, plus au sud, les débuts de saison des pluies tendent à être déficitaires. Cela est vérifié en RSA, plus nettement en 1997 (Fig. 14b) qu'en 1961 (Fig. 14a), même si les déficits ne sont pas aussi marqués que le sont les excédents en Afrique orientale équatoriale.

Figure 14 : Indices Standardisés de Précipitations (SPI) en RSA pour octobre-décembre.



En Afrique australe, l'eau précipitée provient majoritairement des océans,

Les continents représentent quelque 29 % de la surface de la Terre. Ils bénéficient de 24 % des précipitations mais ne contribuent qu'à hauteur de 14 % de l'évaporation (Aguado et Burt, 1999). Cela signifie qu'en moyenne, lorsqu'il tombe 24 mm d'eau sur le continent, 10 proviennent d'un océan (42 %) et 14 mm d'un continent (58 %).

En Afrique australe, ces valeurs peuvent être calculées à partir des données NCEP-DOE AMIP-II. Le pourcentage d'eau recyclé serait de l'ordre, pour la saison janvier-mars, de 27 % en Afrique australe tropicale et 20 % en Afrique australe subtropicale (Nicolas Fauchereau, communication personnelle).

Les surfaces n'étant pas égales, on ne peut pas comparer directement les pourcentages obtenus sur l'ensemble des continents à ceux qui sont calculés en Afrique australe sur les deux boîtes (tropicales et subtropicales). Néanmoins, l'ouverture du sous-continent sur deux océans tropicaux (Indien et Atlantique) et l'océan circumpolaire, conjuguée à la faible humidité continentale (faiblesse des précipitations, absence de vaste forêt), font que la contribution du recyclage est modeste en Afrique australe, tout particulièrement dans sa partie sud.

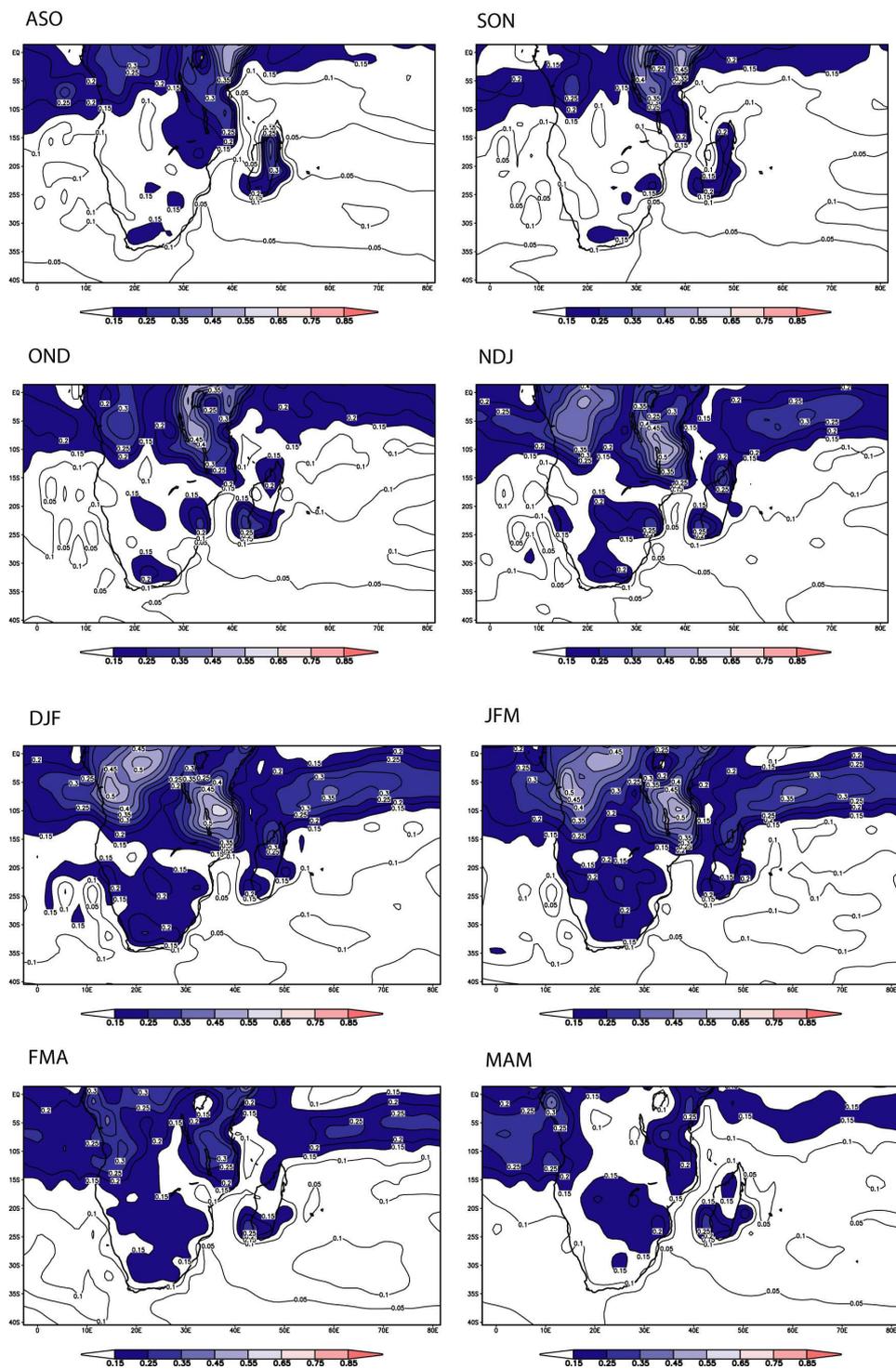
La part de variance pluviométrique forcée par les anomalies TSO est relativement modeste.

Pour quantifier la part de variance de la pluviométrie interannuelle forcée par les TSO nous avons utilisé un ensemble de huit simulations du Centre Européen de Recherche et de Formation avancée en Calcul Scientifique (CERFACS). 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. Les valeurs mensuelles de TSO et d'extension de glace de mers observées issues du fichier GISST 2.3b du UKMO sont imposées au MCGA ARPEGE-CLIMAT version 3, cycle 18, du Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM). L'estimation de la part de variance forcée dérive de l'analyse de variance (ANOVA). Pour l'Afrique australe, les résultats (39/ Fauchereau et Richard, 2003 ; 30/ Fauchereau et Richard, 2003) montrent que :

- En saison sèche, ainsi qu'aux saisons intermédiaires, la part de variance pluviométrique forcée par la TSO est très faible, de l'ordre de 15 % en moyenne au sud de 15° Sud (Fig. 15);
- Au cœur de la saison des pluies, mais plutôt en fin d'été (janvier-mars), les variations interannuelles de la TSO ont un impact maximal, de l'ordre de 25 % (Fig. 15).

Il est à noter que ces valeurs sont sensiblement inférieures à celles qui sont observées aux latitudes plus basses, que ce soit sur la cuvette zaïroise ou sur l'Afrique orientale. En effet, la part de la variance due au forçage de surface diminue quand on s'éloigne de l'équateur alors que la part interne à l'atmosphère (tourbillonnaire, transitoire) augmente.

Figure 15 : Parts de variance des précipitations saisonnières forcées par les TSO



c/ Perspectives

Pour les années à venir, la participation du CRC au programme L'Océan Tropical Indien (LOTI) du PNEDC et le soutien que nous a accordé le CNRS avec l'octroi d'un Programme International de Coopération Scientifique (PICS), permettent de poursuivre les recherches amorcées.

Considérer le rôle des latitudes subtropicales et tempérées.

Spatialement, l'accent doit également être mis sur les latitudes australes subtropicales et tempérées. Les variations des TSO du sud-ouest de l'océan Indien, tout particulièrement au niveau du gyre subtropical du système des Aiguilles, sont en partie forcées par des anomalies de la circulation atmosphérique (Reason, 1999). À l'échelle interannuelle, ces variations sont partiellement liées à l'ENSO (Reason et Lutjeharms, 1998). Le MCGA de l'Université de Melbourne, forcé par des anomalies positives de la TSO directement au sud de la RSA, à des latitudes tempérées, montre que les anomalies de pluies simulées présentent une opposition entre le littoral Sud et les régions orientales de la RSA (Reason, 1998). Les anomalies sont de signe opposé entre octobre-décembre et janvier-mars sur les régions orientales de la RSA. Le même MCGA, forcé par des anomalies de TSO situées cette fois-ci au Sud de Madagascar, à des latitudes subtropicales, simule un renforcement des précipitations cohérent tout au long de la saison des pluies sur les régions orientales de la RSA (Reason et Mulenga, 1998).

Les anomalies de TSO des latitudes tempérées et subtropicales sont souvent moins développées dans l'espace et plus sensibles au cycle saisonnier que sous les tropiques. En outre, elles semblent forcées par la circulation atmosphérique plus qu'elles ne forcent en retour celle-ci. Généralement, les TSO des latitudes subtropicales et tempérées des océans de l'hémisphère sud sont plus sensibles aux flux de chaleur de surface (et en particulier au flux de chaleur latente) qu'aux effets dynamiques. Mais, tout particulièrement dans les courants des bords ouest des océans Indien et Atlantique, ainsi que dans leurs zones de re-circulation, l'effet dynamique du vent sur la TSO semble également important (Reason, 2000). Dans ces conditions, le lien statistique entre les TSO des latitudes tempérées à subtropicales et les précipitations est faible. Définir des expériences de sensibilité de l'atmosphère aux TSO en utilisant des MCGA n'est pas nécessairement une méthode bien adaptée.

Pour ces raisons, nous avons orienté les recherches vers l'identification de modes propres de variabilité océano-atmosphérique. Nous avons tâché d'éviter soigneusement deux écueils. Le premier est l'identification de modes sans existence physique, du fait d'une sur-rotation. Le second écueil est la définition d'indices de TSO calculés sur des zones corrélées avec les pluies, et par là même la définition de fenêtres spatiales non pertinentes du point de vue des mécanismes de variabilité. Sur ces bases, un mode couplé océan-atmosphère (TSO et pression de surface) a été identifié. Il affecte simultanément (au pas interannuel) les gyres subtropicaux des océans Indien et Atlantique. Les aires concernées enregistrent des anomalies froides lors des principales sécheresses ayant affecté l'ensemble de l'Afrique australe dans les années 1950 et 1960 (Fig. 13). Ces recherches sont en cours et seront poursuivies.

Mieux appréhender le rôle de la TSO sur la pluviométrie au Mozambique, espace charnière entre Afrique orientale équatoriale et Afrique australe.

Pour mettre en relief la position charnière du Mozambique qui, du point de vue de la variabilité interannuelle est un espace de transition entre le dipôle Afrique orientale équatoriale et Afrique australe, j'ai initié un travail avec Atanasio Mahique, météorologue à Maputo, Mozambique, et Doctorant au Laboratoire d'Océanographie de l'Université du Cap, RSA. Soutenu par le Programme International de Coopération (PICS), Atanasio Manhique a passé deux mois au CRC (novembre et décembre 2003) pour analyser le lien entre la TSO du bassin Indien, l'activité de la ZCIT et les précipitations au Mozambique. Il revient à Dijon en mars-avril 2004. Ce pays a été relativement mal pris en compte dans les différents travaux, essentiellement en raison d'une déficience en données de qualité sur la période récente. Cette collaboration va également s'étoffer en partenariat avec Patrick Valimba, Doctorant tanzanien, et travaillant à la Maison des Sciences de l'Eau de Montpellier, France.

Suivre année par année le forçage exercé par les anomalies de TSO et détecter les zones source de vapeur d'eau.

Les « runs » longs du CERFACS seront soumis par Nicolas Fauchereau à des techniques multivariées, dérivées de l'ACP, et de classification. L'objectif est, année par année, de mesurer l'intensité du forçage des TSO sur les précipitations, ainsi que de caractériser sa signature spatiale. En approche complémentaire, les rétro-trajectoires des masses d'air, calculées à partir des valeurs six-horaires de flux d'humidité à partir du NCEP-DOE AMIP-II (Kanamitsu *et al.*, 2002) avec le logiciel HYSPLIT installé au CRC depuis mai 2003, seront déterminées pour établir des statistiques des zones sources en ce qui concerne l'humidité advectée sur l'Afrique australe.

Axe 3 : Convection et dynamique de l'atmosphère

a) Objectifs

Étudier la convection profonde via les données satellite.

L'eau évaporée, essentiellement sur les océans, peut être advectée sous forme de vapeur d'eau ou de nuages sur le continent. La quantification de l'eau atmosphérique au-dessus d'un lieu donné peut être obtenue à différents niveaux géopotentiels à partir de radiosondages. Ils sont ponctuels et rares en Afrique australe. Une alternative existe aujourd'hui pour obtenir une couverture spatiale régulière de l'eau atmosphérique : les données issues de satellites. L'objectif est l'étude de la convection profonde sur l'Afrique.

Étudier la dynamique atmosphérique.

Étudier la dynamique atmosphérique est plus aisé depuis 1996, avec le développement d'un nouveau type de données : les réanalyses du NCEP/NCAR (Kalnay *et al.*, 1996). À noter que des réanalyses sont également produites par l'European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF)). Nous avons opté pour les réanalyses américaines accessibles en ligne. Sous les tropiques, elles présentent des températures cohérentes, à la différence de celles qui sont issues des réanalyses ECMWF marquées par les changements de système d'observation par satellite survenus fin 1986 et début 1989 (Trenberth *et al.*, 2001). L'objectif est de mieux comprendre, via la dynamique atmosphérique, les téléconnexions entre TSO et pluviométrie.

Mieux comprendre comment s'exerce le forçage de l'ENSO.

L'observation des anomalies associées de la circulation atmosphérique permet d'étayer des hypothèses, dont celles qui sont relatives au mode de transmission du signal de l'ENSO pour lequel deux hypothèses sont généralement avancées.

Hypothèse 1 : forçage via la TSO. Lors des événements ENSO, la TSO de l'océan Indien équatorial et tropical est anormalement chaude (Cadet, 1985 ; Nicholson, 1997 ; Sewell et Landman, 2001). Nicholson et Kim (1997), pour l'Afrique, trouvent que le signal de l'ENSO sur la pluviométrie est maximal en Afrique orientale équatoriale et en Afrique du Sud-est. Ils accordent une grande importance aux anomalies de TSO des océans Indien et Atlantique, aux latitudes de l'Afrique, lorsqu'ils mettent en relation événements ENSO et précipitations. Rocha et Simmonds (1997a) indiquent que, pour l'Afrique australe, les anomalies de TSO de l'océan Indien dominant la réponse pluviométrique lors des événements ENSO.

Hypothèse 2 : forçages via l'atmosphère. Reason *et al.* (2000) montrent que l'impact de l'ENSO sur la TSO de l'océan Indien tropical peut se faire essentiellement via l'atmosphère, et en particulier du fait des variations de la couverture nuageuse. Cook (2000 et 2001) montre qu'un dipôle de précipitations sur l'Afrique australe est simulé par un modèle forcé par des anomalies de TSO limitées au Pacifique. Klein (1999) observe que, sur l'océan Atlantique Sud, lors des événements ENSO, et ce malgré l'absence d'anomalies importantes de la TSO constatée par Nicholson (1997), la circulation cellulaire divergente s'intensifie.

L'objectif est de préciser ce point en utilisant les données NCEP.

b) Résultats

Les pluies d'Afrique australe sont très liées à la convection profonde.

Nous avons exploité des bases de données réalisées à partir de produits issus des satellites : les nuages à forte réflectance (High Reflective Clouds, HRC) (Garcia, 1985) et les radiations sortantes dans les grandes longueurs d'ondes (Outgoing Longwave Radiation, OLR) (Gruber et Krueger, 1984). Ces fichiers offrent la possibilité, non pas d'étudier l'ensemble de la couverture nuageuse, mais d'avoir une estimation de la convection profonde responsable de la très grande majorité des pluies en domaine tropical. Une première étude fut menée sur l'ensemble de l'Afrique tropicale (Poccard, 1995).

Le lien entre convection et pluviométrie est fort, mais n'est pas linéaire. Il existe en particulier des seuils qui varient selon la région et au-delà desquels la pluviométrie augmente en l'absence d'une convection plus intense. La valeur de ce seuil est d'environ 150 mm/mois en Afrique de l'Est, 200 à 250 mm/mois dans le Golfe de Guinée et 300 mm/mois dans la bande soudano-sahélienne (13/ Moron *et al.*, 1995 ; 23/ Richard *et al.*, 1995). En Afrique des grands lacs, le cycle diurne joue un rôle fondamental qui limite la pertinence de l'utilisation des données HRC, où seul le canal visible est pris en compte. En revanche, l'Afrique de l'Ouest et l'Afrique australe sont les deux régions d'Afrique où l'utilisation des fichiers HRC, et plus encore OLR, permet le mieux d'appréhender la variabilité interannuelle des précipitations.

La qualité des réanalyses du NCEP varie selon les variables climatiques.

L'énorme avantage des réanalyses est d'obtenir une couverture spatiale uniforme et sans lacune, ce au pas de temps journalier et sur une période qui excède aujourd'hui cinquante ans. À cet avantage s'ajoute le fait que des paramètres non mesurés, comme le potentiel de vitesse, peuvent être calculés. Enfin, tous les paramètres sont disponibles sur plusieurs niveaux, du sol à la haute troposphère. Ces avantages doivent être pondérés pour plusieurs raisons : 1/ Certains dépendent beaucoup du modèle car souffrent du manque d'observation ; 2/ Des ruptures de stationnarité peuvent être liées à l'assimilation de nouvelles données (type satellites à partir des années 1970) ; 3/ La résolution spatiale du modèle, encore trop grossière, conditionne l'échelle d'utilisation.

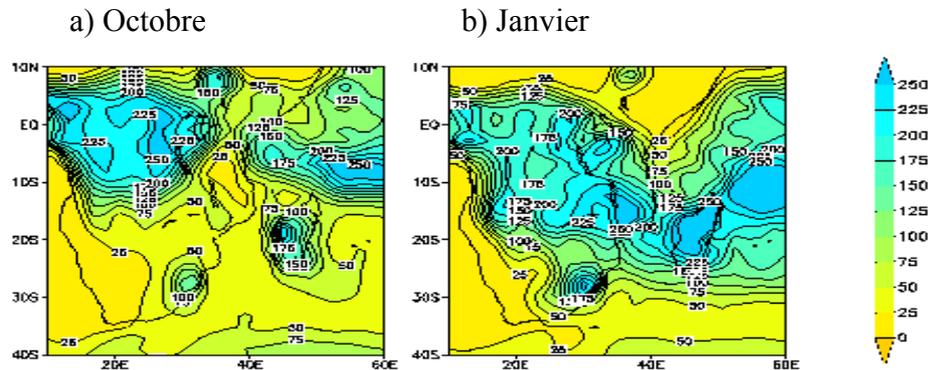
Isabelle Poccard a analysé les données de réanalyses du NCEP. Une première étape a permis de déterminer les conditions dans lesquelles on pouvait les utiliser pour les études de climatologie portant sur l'Afrique tropicale. Les résultats montrent qu'une rupture de stationnarité, vers 1967-1968, affecte la majorité des paramètres (niveaux géopotentiels, vent, humidité, flux sortant grande longueur d'onde), et par conséquent les précipitations qui, dans le modèle, découlent de la dynamique de l'atmosphère (Poccard, 2000 ; Poccard *et al.*, 2000).

La qualité des réanalyses du NCEP est moyenne pour les précipitations en Afrique australe.

De surcroît, si les volumes pluviométriques et les régimes (Fig. 16) sont relativement bien reproduits dans les données NCEP-NCAR, ce n'est pas le cas de la variabilité interannuelle. L'exemple étudié à partir d'une fenêtre correspondant grossièrement au Zimbabwe montre que l'Afrique australe n'échappe pas à ce problème : la variance commune entre précipitations observées issues du fichier CRC et précipitations réanalysées est faible (32/ Poccard *et al.*,

1998, déjà cité). Dans ces conditions, en variabilité, nous ne travaillons pas à partir des pluies du NCEP, et veillons, dans tous les travaux utilisant les réanalyses, à ce que la rupture de 1967-1968 ne vienne pas perturber les résultats. Cela signifie, par exemple, qu'une analyse multivariée ou une corrélation sur la période 1946-1999 sont à proscrire, et que les échantillons composites doivent être sélectionnés en considérant cette rupture.

Figure 16 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (NCEP 1948-1997).



Nous avons identifié des courroies de transmission entre l'ENSO et la pluviométrie en Afrique australe.

Nicholson et Kim (1997) trouvent que le signal de l'ENSO sur la pluviométrie est maximal en Afrique orientale équatoriale et en Afrique du sud-est. Des études, nombreuses depuis que Lindesay (1988) a ouvert cette voie, mettent l'accent sur les fréquentes sécheresses notées en Afrique australe lors des événements chauds du Pacifique. Nous avons précisé cette relation selon la saison. Le maximum de sensibilité de l'Afrique du sud-est (Nicholson et Kim, 1997) se vérifie en début d'été, mais pas en fin d'été où le signal est maximal au sud-ouest, au cœur de la RSA. Nous avons également montré la symétrie de la relation entre précipitations et SOI : les déficits pluviométriques associés aux événements chauds ont pour pendant des excédents lors des événements froids (18/ Richard, 1996). En moyenne, les sécheresses observées lors des événements ENSO ont une intensité et une extension spatiale comparables aux excédents notés lors des événements La Niña Southern Oscillation (LNSO). Nicholson et Selato (2000) ont confirmé ce résultat et montré l'impact des événements LNSO sur l'ensemble du continent africain.

À partir d'analyses composites constituées sur l'indice de TSO Niño3, Pocard (2000) montre le lien statistique entre TSO du Pacifique équatorial oriental et pluviométrie en Afrique tropicale. Pendant presque une année, le signal se propage au sein du continent africain. Il apparaît en été boréal en Afrique de l'Ouest, se poursuit en Afrique de l'Est en octobre-décembre, et se termine en Afrique australe en janvier-mars de l'année civile qui suit. Lors des événements ENSO, l'Afrique de l'Ouest connaît des déficits pluviométriques, l'Afrique de l'Est des excédents et l'Afrique australe à nouveau des déficits. Les résultats obtenus par différents auteurs sur ces trois régions respectives sont confirmés. Leur cohérence est montrée : l'influence de l'ENSO sur les pluies est maximale au cœur des saisons des pluies de chacune des trois régions et se propage du Nord au Sud, en passant par l'est du continent africain, pendant une période d'environ neuf mois.

L'atmosphère, en particulier la circulation divergente sur l'océan Atlantique tropical sud, joue un rôle primordial.

Nos premiers diagnostics, portant sur les facteurs de la variabilité interannuelle, semblent indiquer que les anomalies affectant l'atmosphère, lors des événements ENSO, jouent un rôle au moins aussi important que les anomalies de TSO observées sur les océans Indien et Atlantique (16/ Poccard *et al.*, 2001 ; 9/ Fauchereau *et al.*, 2001). La décomposition en circulations de Hadley et de type Walker montre que ces deux cellules connaissent identiquement des anomalies opposées entre basse et haute atmosphère (bien que plus nettes en altitude), mais aussi entre branches ascendantes et subsidentes.

Les événements ENSO entraînent des anomalies de subsidence sur le continent Africain, ainsi que sur l'océan Atlantique Sud aux latitudes subtropicales. Une coupe diagonale (nord-ouest/sud-est) favorise la mise en évidence de ce résultat. Ce type de coupe, ni zonale ni méridienne, n'est pas habituel en climatologie. Mais il correspond à une réalité physique : la circulation divergente. Cette circulation peut-être décomposée en deux termes orthogonaux, qui participent aux circulations d'Hadley et de Walker.

Un lien entre précipitations et circulation atmosphérique des latitudes subtropicales et tempérées.

L'attention portée sur les latitudes subtropicales et tempérées, découle des résultats obtenus à partir des études traitant de l'ENSO, où le relais atmosphérique entre l'ENSO et la pluviométrie en Afrique australe met en jeu le renforcement de la subsidence aux latitudes subtropicales de l'océan Atlantique Sud. Cette subsidence accrue s'accompagne d'une divergence de vitesse du Jet subtropical d'ouest de l'hémisphère sud, particulièrement nette aux latitudes subtropicales et qui pourrait limiter le développement de la convection profonde sur le sud de plateau sud-africain (communications 16/ Poccard *et al.*, 2001 ; 9/ Fauchereau *et al.*, 2001).

Dans la littérature, ce lien tend à être associé à la TSO.

Les TSO des latitudes subtropicales et tempérées sont le siège d'anomalies *a priori* indépendantes de l'ENSO. Walker (1990), Mason (1995), Reason et Lutjeharms (1998), Reason (1999) et Reason et Mulenga (1999) ont montré l'importance des anomalies de TSO se développant aux latitudes subtropicales de l'océan Indien. En particulier, des anomalies chaudes au sein du système de courant des Aiguilles favorisent la pluviométrie sur le sud-est du sous-continent. Il s'agit là d'un forçage direct et régional de la TSO sur l'atmosphère : les eaux anormalement chaudes sont à l'origine d'une diminution de la pression atmosphérique, d'une augmentation de l'évaporation, de l'humidité spécifique sur le proche océan et de l'advection d'air chaud et chargé en vapeur d'eau sur la façade sud-est du sous-continent.

Des dipôles subtropicaux au sein de l'océan Indien sont observés ou simulés.

Concernant les océans de l'hémisphère sud, des publications récentes s'attachent à l'identification de dipôles. Venegas et Mysak (1997) en présentent une illustration pour l'Atlantique Sud, Behera et Yamataga (2001) une autre pour l'océan Indien. Dans les deux cas, un dipôle de TSO se développe entre le sud-ouest et le cœur de ces deux bassins océaniques. Reason (2001 et 2002) s'est appuyé sur les résultats de Behera et Yamagata (2001) pour définir des expériences de sensibilité : il a forcé le MCGA de l'Université de Melbourne par des anomalies de TSO inspirées du dipôle subtropical de l'océan Indien. Néanmoins, la configuration spatiale des anomalies imposées ne respecte pas parfaitement le

dipôle. A l'ouest, les anomalies sont centrées au sud de Madagascar et sont ainsi plus proches du subcontinent que la composante sud-ouest du dipôle subtropical de TSO. Comme dans des travaux antérieurs (Reason, 1998 ; Reason et Mulenga, 1999), le MGCA simule des excédents pluviométriques sur le sud-est de l'Afrique australe (est de la RSA et Mozambique) lorsque les TSO sont anormalement chaudes dans le sud-ouest de l'océan Indien, et froides dans le sud-est. Des anomalies négatives sont simulées dans la situation inverse.

Régionalement : forçage direct de la TSO sur l'atmosphère.

Les précipitations d'Afrique australe sont forcées directement et régionalement (système des Aiguilles) par la TSO, via l'atmosphère. Pour l'instant, l'éventuelle réponse atmosphérique à ce dipôle subtropical n'est pas validée. En effet, dans l'observation, aucun mode de variabilité affectant les TSO en opposant le système des Aiguilles et l'est de l'océan Indien au large de l'Australie n'a été détecté.

À plus large échelle, la circulation atmosphérique modulerait la TSO.

En focalisant les recherches sur les aires océaniques correspondant aux gyres subtropicaux des océans Atlantique et Indien, on montre l'existence d'un lien étroit entre les dipôles indépendamment repérés sur les deux bassins océaniques (10/ Fauchereau *et al.*, 2002 ; 3/ Fauchereau *et al.*, 2003). On démontre également l'existence d'un forçage préalable de l'atmosphère sur l'océan. Le sens de la relation est caractéristique de ce qui est observé en dehors des latitudes tropicales, à l'image du forçage imprimé par l'oscillation de l'océan Atlantique Nord (NAO) sur la TSO. Certaines années, des anomalies de pression se développent en début d'été (novembre et décembre) sur la ceinture 35° Sud - 50° Sud, ce simultanément dans les océans Atlantique, Indien et Pacifique. Dans le cas positif, les trois anticyclones subtropicaux semi permanents de l'hémisphère austral (Sainte-Hélène, Mascareignes et Ile de Pâques) connaissent un renforcement sur leur flanc sud-ouest. À l'est, le long des côtes sud-africaines, australiennes et chiliennes, les alizés sont renforcés. L'évaporation est accrue et les TSO sont anormalement fraîches. À l'ouest, pour les deux océans bordiers de l'Afrique australe, au sein des courants des bords ouest (Brésil et Aiguilles), les advections renforcées d'air chaud en provenance du nord restreignent l'évaporation et favorisent le réchauffement anormal des eaux de surface. Ces anomalies de TSO sont maximales un à deux mois plus tard que les maxima affectant la pression et le vent. Les corrélations décalées entre l'atmosphère et la TSO renforcent l'argument d'un forçage de l'atmosphère sur l'océan. Dans ce cas, les précipitations d'Afrique australe sont excédentaires, en toute indépendance de l'ENSO.

En s'appuyant sur les travaux de Venegas et Mysak (1997), Robertson *et al.* (non publié) imposent des anomalies de TSO dans l'océan Atlantique sud à un MCGA. Les anomalies de pression générées sont inverses de celles qui sont observées. Ce résultat renforce l'idée selon laquelle il s'agit bien d'un forçage exercé par l'atmosphère sur la TSO. Le fait que les dipôles subtropicaux des océans Indien et Atlantique soient statistiquement corrélés (3/ Fauchereau *et al.*, 2003) pourrait contribuer à expliquer les résultats obtenus par Compagnucci *et al.* (2002). Ces auteurs montrent qu'une partie de la variabilité pluviométrique décennale des précipitations estivales dans le centre ouest de l'Argentine est commune avec celle d'Afrique australe.

Aux basses latitudes, atmosphère et océan interagissent souvent en phase. Les anomalies de TSO peuvent être directement liées à celles de la circulation atmosphérique, fonctionner en

système couplé, perdurer plusieurs mois du fait de l'inertie de l'océan, et entretenir ainsi des anomalies de circulation et de précipitations. Ce cas est fréquent aux basses latitudes. Il est vérifié en début d'été sur l'océan Indien et l'est du continent africain (Afrique équatoriale et australe). Aux latitudes sub-tropicales, où les anomalies observées affectent également de manière sensible la pluviométrie sud-africaine, les forçages sont prioritairement atmosphériques. À ce titre, le climat de l'Afrique australe apparaît comme étant moins contrôlé par la TSO que les climats de mousson.

c/ Perspectives

La dynamique de l'atmosphère sur l'océan Atlantique Sud lors des ENSO.

Une première perspective est de s'appuyer sur nos premiers résultats relatifs à la circulation dans la haute troposphère au-dessus de l'océan Atlantique tropical, lors de certains événements ENSO, pour mieux analyser (à partir des NCEP-II), le rôle du pont atmosphérique dans la télé connexion entre ENSO et pluviométrie en Afrique australe. Dans cette optique, nous travaillerons au pas quotidien et calculerons différents flux d'humidité entre l'Amérique centrale équatoriale et l'Afrique australe.

La dynamique de l'atmosphère sur les océans Atlantique et Indien subtropicaux.

Etant donné la similitude de processus et de résultats observée entre Amérique du Sud et Afrique du Sud (Cook, 2000 ; 2001 ; Compagnucci *et al.*, 2002 ; 3/ Fauchereau *et al.*, 2003), une collaboration avec des collègues des universités brésiliennes de l'Etat de Rio Grande Do Sul : Porto Alegre et Pelotas, est projetée. L'objectif est d'analyser les éléments communs de la dynamique atmosphérique.

Néanmoins, la majeure partie de l'eau précipitée en Afrique australe provient de l'océan Indien et l'attention sera portée sur cet espace. À partir des données NCEP-II, une meilleure identification des zones source sera recherchée en calculant les flux d'humidité et les rétro trajectoires.

Chapitre 2 : conclusions principales

En Afrique australe, les anomalies pluviométriques ont un impact sur la végétation d'autant plus important que l'on se situe en milieu steppique. C'est donc sur et autour du Kalahari, ainsi que sur le veld sud-africain, que des données satellite de type NDVI sont les mieux à même de rendre compte de manière continue dans l'espace des excédents et déficits en pluies.

En Afrique, les anomalies pluviométriques sont fortement corrélées à la TSO. Les océans les plus proches jouent un rôle important, océan Atlantique tropical pour l'Afrique de l'Ouest et océan Indien pour l'Afrique australe et orientale. Mais ce n'est pas systématique comme le montre l'influence mineure de la TSO de l'océan Atlantique tropical sud sur la pluviométrie d'Afrique australe. La connexion avec les anomalies de TSO est d'autant plus forte que l'on se situe dans les basses latitudes et que les mécanismes pluviogènes sont de type tropical.

Le lien statistique entre anomalies de TSO et de précipitations ne s'explique que par des modifications du contenu en eau et de la circulation atmosphérique. En Afrique tropicale, la convection profonde suivie par satellite permet ainsi de signer en partie les anomalies pluviométriques. En Afrique australe, elle témoigne de modifications dans le cadre de la circulation divergente est-ouest, sur l'océan Indien comme sur le Pacifique. A des latitudes plus élevées, subtropicales à tempérées, des anomalies de la circulation atmosphérique contrôlent celles des TSO. Celles qui sont observées simultanément dans le sud-ouest des bassins indien et atlantique modulent également la pluviométrie.

Publications

Axe 1

14/ POCCARD I., **RICHARD Y.**, 1996 : Sensibilité du NDVI aux variations pluviométriques en Afrique tropicale. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **9**, 41-48.

34/ **RICHARD Y.**, POCCARD I., 1996 : Sensibilité du NDVI à la variabilité interannuelle des pluies en Afrique australe. Actes de la 2^{ème} conférence internationale de la Société Météorologique Africaine sur la météorologie et le développement durable en Afrique. Casablanca, Maroc, 25-28 Novembre, 212-220.

7/ **RICHARD Y.**, POCCARD I., 1998: A statistical study of NDVI sensitivity to seasonal and interannual rainfall variations in Southern Africa. *Int. J. Remote Sensing*, **19**, 2907-2920.

Axe 2

32/ POCCARD I., CAMBERLIN P., **RICHARD Y.**, ROUCOU P., 1998 : Connexions des TSO du Pacifique et de l'Atlantique avec la dynamique atmosphérique et la pluviométrie en Afrique boréale. Water Resources Variability in Africa during the XXth Century (Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998). IAHS Publ. No. 252, 35-44.

35/ ROUCOU P., BIGOT S., CAMBERLIN P., FONTAINE B., MORON V., **RICHARD Y.**, RONCHAIL J., SANTIAGO A., TRZASKA S., 2000 : Observation et simulation de la variabilité interannuelle des précipitations en Afrique et en Amérique tropicales. In *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers tropicaux*, Paris, UNESCO, 267-279.

37/ TRZASKA S., FONTAINE B., **RICHARD Y.**, ROUCOU P., 1997 : L'impact des modes propres de la variabilité des TSO sur les précipitations tropicales. Actes des Ateliers de modélisation de l'atmosphère, Météo-France, Toulouse 02-03 décembre 1997, 171-174.

5/ **RICHARD Y.**, FAUCHEREAU N., POCCARD I. ROUAULT M., TRZASKA S., 2001: XXth Century Droughts in Southern Africa Spatial and temporal variability, teleconnections with oceanic and atmospheric conditions. *Inter. J. of Climatology*, **21**, 873-885.

17/ **RICHARD Y.**, 1994 : Variabilité pluviométrique en Afrique du sud-est : Relations avec des mesures à la surface de l'océan Indien. *La Météorologie*, **8**, 11-22.

30/ FAUCHEREAU N., **RICHARD Y.**, 2003 : L'utilisation d'ensembles de simulations climatiques sur Modèles de Circulation Générale de l'Atmosphère : concepts, méthodes et application à la climatologie de l'espace sud-africain. Actes des 6^{ème} rencontres de Théo Quant, Besançon, 6 pp. <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2003/03Fauchereau.pdf>

Axe 3

23/ **RICHARD Y.**, MORON V., BIGOT S., CAMBERLIN P. ROUCOU P., 1995 : Convection et précipitations mensuelles en Afrique tropicale. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **8**, 171-179.

18/ **RICHARD Y.** 1996 : La question de la linéarité des relations en climatologie diagnostique : exemple de la sensibilité des pluies stationnelles d'Afrique australe à l'oscillation australe. *Méditerranée*, **4**, 87-90.

3/ FAUCHEREAU N., TRZASKA S., **RICHARD Y.**, ROUCOU P., CAMBERLIN P., 2003 : SST co-variability in the Southern Atlantic and Indian Oceans and its connections with the atmospheric circulation in the Southern Hemisphere. *International J. of Climatology*, **23**, 663-677.

Chapitre 3

Variabilité décennale

Etudier le lien entre les bilans hydrologiques du Tanganyika et les précipitations.

Dans le cadre d'études centrées sur des impacts de la variabilité pluviométrique, la composante « végétation » est développée dans le chapitre précédent, dédié à la variabilité interannuelle. Cela ne signifie pas que la variabilité décennale n'est pas présente mais, qu'à défaut de profondeur historique suffisante des données issues des satellites, nous ne sommes pas encore en mesure de l'étudier. En revanche, les travaux consacrés aux bilans hydrologiques du Tanganyika et aux relations avec le climat sont analysés dans ce chapitre. Ceci est quelque peu arbitraire mais est motivé par le fait que les principaux résultats, même s'ils attestent d'un lien entre variabilités interannuelles des pluies et des bilans hydrologiques, mettent en relief un trait décennal. Ces travaux constituent l'axe 1.

Décrire la variabilité décennale.

Nous avons travaillé la question de la stabilité dans le temps des structures spatiales de variabilité interannuelle des précipitations à l'échelle de l'Afrique tropicale. Ces recherches ont permis d'identifier des variations décennales, différentes selon les régions, qui ont ultérieurement fait l'objet d'études diagnostiques. Pour l'Afrique australe, si l'on considère les volumes annuels, les variations décennales s'expriment essentiellement au travers de cycles basse fréquence (18 ans en particulier). Nous avons examiné cette composante cyclique et avons également étudié la variabilité décennale de la variance interannuelle de la pluviométrie. L'axe 2 regroupe ces recherches.

Comprendre la variabilité décennale.

Des expériences de sensibilité de l'atmosphère à l'océan ont été imposées au MCGA ARPEGE à partir d'anomalies de TSO conformes à des modes observés et récurrents de variabilité (Trzaska, 2002). Celles du mois de mars sont exploitées pour mieux comprendre les anomalies observées sur l'Afrique australe en fin d'été. Certaines d'entre-elles sont à l'origine d'hypothèses proposées pour expliquer les variations décennales de l'association entre pluies et ENSO. Ces travaux sont analysés dans l'axe 3.

Axe 1 : Relation précipitation / hydrologie

Les grands lacs d'Afrique de l'Est sont de précieux enregistreurs.

En Afrique, des séries relatives à des débits de cours d'eau sont parfois disponibles sur de longues périodes. Mais les aménagements effectués sur la plupart des rivières et fleuves, en particulier les barrages, rendent difficile l'analyse de ces séries dans une perspective décennale. Les lacs, de par leur inertie, sont potentiellement de meilleurs indicateurs. C'est le cas du lac Tchad dont la superficie s'est fortement réduite depuis la péjoration climatique observée en Afrique de l'Ouest à la fin des années soixante. En Afrique australe, les grands lacs sont absents. Les grands lacs sur lesquels reposent les travaux analysés dans cet axe, dont le lac Tanganyika, appartiennent à l'Afrique orientale.

a/ Objectifs

Préciser sur la période actuelle le type de relation entre précipitations et variations du niveau du lac Tanganyika.

L'objectif est de mettre en relation la variabilité hydrologique du plus grand lac africain, le Tanganyika, avec celle de la pluviométrie ou/et du climat. En paléoclimatologie, les niveaux des lacs, analysés via différents matériaux comme les sédiments, sont régulièrement utilisés pour proposer des hypothèses relatives aux climats du passé et de leurs variations. Néanmoins, les variations des niveaux des lacs ne sont pas nécessairement liées de manière linéaire à celles du climat et en particulier à celles des précipitations. Sur la période où l'on dispose à la fois de données de variation du niveau du Tanganyika et d'enregistrements pluviométriques, l'objectif est de préciser la relation précipitations / variation du niveau. La composante hydrologique vise à caractériser, à l'aide d'enregistrements limnométriques et des pertes à l'exutoire (pour les systèmes non endoréiques), la variabilité interannuelle du bilan des lacs. La composante climatique revient à déterminer le volume, le régime et la variabilité des précipitations sur le bassin versant du lac considéré.

L'hypothèse est que, aux échelles considérées, les bilans du lac Tanganyika sont prioritairement modulés par les précipitations, même si d'autres éléments ne peuvent être exclus. Ces derniers peuvent être d'ordre climatique (évaporation), tectonique (modification des exutoires), ou anthropique (pratiques agricoles, déforestation, aménagement des exutoires...). Plus particulièrement, les inondations observées sur de vastes espaces en Afrique de l'Est lors des années 1961 et 1997 retiennent notre attention. Nous analysons la manière dont les différents paramètres lacustres ont été affectés par ces événements exceptionnels.

b/ Résultats

L'équation (1) donne l'expression du bilan hydrique d'un système lacustre :

$$(1) \Delta H = P + E + Q_i + Q_o$$

Où ΔH est la variation du niveau lacustre, P les précipitations à la surface du lac ; E l'évaporation à la surface du lac, Q_i les apports en provenance du bassin versant rapportés à la surface du lac et Q_o les pertes à l'exutoire.

Les niveaux lacustres (H) enregistrent la variabilité des apports (Q_i et P) et des pertes par évaporation E . Dans le cas du Tanganyika, H dépend également des pertes à l'exutoire (Q_o), fonction du niveau (H) et de la morphologie de l'exutoire. Cette morphologie a évolué dans le temps. Pour relier l'évolution du bilan lacustre et les fluctuations hydro-climatiques, nous utilisons, conformément à l'équation (2), une variable (ΔH^*) neutralisant l'effet de l'exutoire :

$$(2) \Delta H^* = \Delta H - Q_o = P + E + Q_i$$

Pour le Tanganyika, une chronique mensuelle de ΔH^* est constituée pour 1932-1994. Sur cette période, ΔH^* est comparé aux séries pluviométriques issues du fichier CRC appartenant au bassin versant du lac ainsi qu'à ses proches pourtours. Nous avons également calculé des moyennes spatiales sur huit points de grille de $2^\circ 30'$ de côté, ainsi que sur l'ensemble de l'aire étudiée, ce afin de définir des indices régionaux.

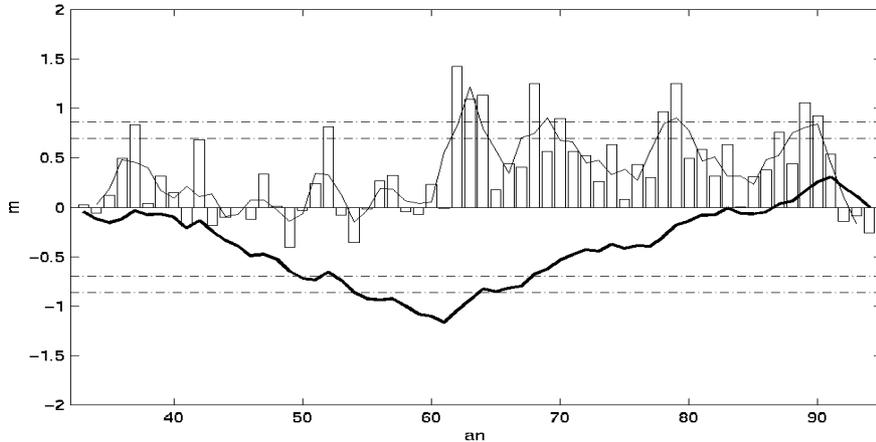
1961 : une rupture majeure.

L'étude de l'évolution des bilans hydrologiques du lac Tanganyika montre des valeurs anormalement positives depuis 1962, y compris en années sèches (37/ Camberlin *et al.*, 1998) et une augmentation brutale des apports du lac à partir du début des années 1960 (2/ Bergonzini *et al.*, 1999 ; 1/ Bergonzini *et al.*, 2002). Une rupture majeure, significative au seuil 99% au regard du test de Pettitt intervient en 1961 (Fig. 17). Ces résultats sont en accord avec ceux obtenus sur les lacs Kivu et Malawi (Bergonzini, 1998). Les modifications des conditions de surface peuvent constituer un facteur non négligeable de cette évolution. En effet, des études attestent d'une modification de la couverture végétale et de pratiques agricoles au Rwanda (Bart, 1994), au Burundi (Bidou, 1994) et dans la région des grands lacs en général (Thibon, 1992). Mais il est difficile de spatialiser ces modifications du milieu et de quantifier leur impact sur les coefficients d'écoulement.

« Short rains » plus précoces et renforcées.

Nos études mettent en évidence une modification de la pluviométrie dans les régions à rythme clairement bimodal. Celle-ci est peu sensible au pas de temps annuel (Fig. 18a). Elle est significative si l'on se focalise sur la saison des « short rains » (Fig. 18b). Les pluies d'octobre à décembre sont sensiblement plus abondantes sur le bassin versant du Tanganyika depuis le début des années 1960. Parallèlement, le pic pluviométrique s'est le plus souvent décalé, passant de décembre à novembre, traduisant ainsi une plus grande précocité des pluies. Au total, déforestation des sommets, drainage des bas fonds, plus grande précocité et renforcement des précipitations sur des sols secs en début de saison pluvieuse, pourraient expliquer que l'efficacité des pluies en termes d'écoulement se soit accrue depuis 1961.

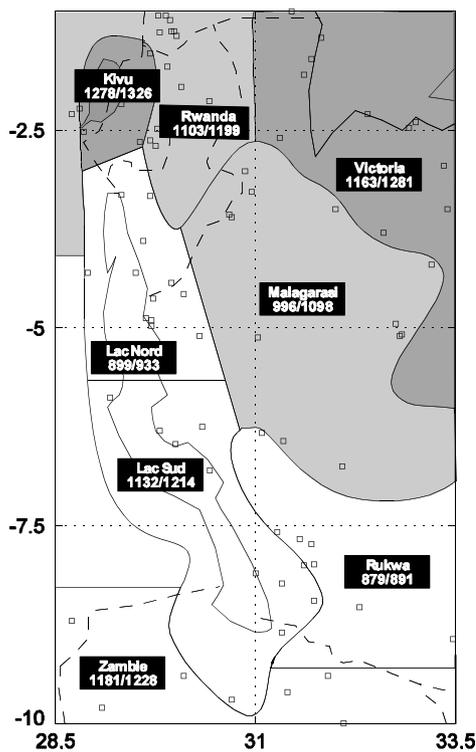
Figure 17 : Evolution de ΔH^* sur le Tanganyika (1932-1994).



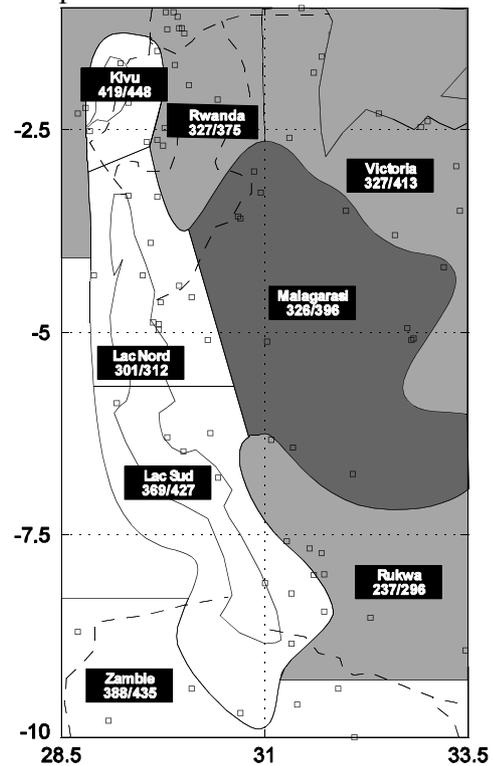
Barres : ΔH^* annuel (septembre-août), courbe : moyenne mobile calculée sur 5 ans, lignes en pointillés : seuils de signification du Test de Pettitt à 95% et 99%, courbe grasse : valeurs du test de Pettitt.

Figure 18 : Précipitations comparées des périodes 1932-1961 et 1962-1990 pour huit régions climatiques au sein et autour du bassin du lac Tanganyika

a) Total annuel



b) Précipitations d'octobre-décembre



Carrés : stations pluviométriques utilisées. x/y : précipitations moyennes (mm) 1932-1961/1962-1990. Avec en blanc - différence non significative, en gris clair - différence significative au seuil 90%, en gris moyen - différence significative au seuil 95%, et en gris foncé - différence significative au seuil 99%.

c/ Perspectives

Etudier le lien bilan du lac Tanganyika / circulation océano-atmosphérique.

Les variations de niveau du Tanganyika sont liées aux pluies, elles-mêmes étant liées à la circulation océano-atmosphérique. Pour remonter la chaîne des causalités, et mieux identifier les éléments impliqués, nous étudions les relations entre les bilans du lac Tanganyika et quelques indicateurs de cette circulation océano-atmosphérique. L'objectif est de mieux comprendre le rôle des TSO, que ce soit de l'océan Indien tropical avec la définition d'indices originaux de la circulation zonale, ou de l'océan Pacifique *via* l'ENSO, à l'image des travaux de Mistry et Conway (2002), mais en travaillant sur ΔH^* et non ΔH (1/ Bergonzini *et al.*, 2003). La mise à jour des séries de variation du niveau du lac sera menée en utilisant les données TOPEX/ POSEIDON, disponibles depuis 1996. Les données satellites seront confrontées aux séries observées sur les quelques années où les recoupements sont possibles (1996-2000).

Etendre l'étude à d'autres lacs.

La cohérence spatiale des anomalies pluviométriques est forte en Afrique de l'Est (19/ Richard *et al.* 1998, déjà cité). Cela se répercute sur les corrélations entre les bilans de quatre grands lacs (Kivu, Tanganyika, Rukwa et Nyassa). Néanmoins, des différences existent (Bergonzini, 1998). Les similitudes entre les lacs renforcent la robustesse des résultats, tant en termes de cohérence spatiale des anomalies pluviométriques qu'en termes de lien entre précipitations et niveau des lacs. Les différences entre les lacs doivent être interprétées : elles peuvent être liées à l'hydrologie (ruissellement) ou à la climatologie (type de précipitation, évaporation...). Pour éprouver la cohérence spatiale sur cet espace, nous travaillons dans un premier temps sur le lac Victoria. Dans un second temps, nous poursuivrons l'étude portant sur d'autres lacs (3/ Bergonzini et Richard, 2001), pour lesquels des données existent (Kivu, Rukwa et Nyassa).

Prendre en compte les pluies sur les lacs.

Nous avons étudié le lien entre les précipitations relevées dans les postes pluviométrique situés dans le bassin versant du Tanganyika et les bilans hydrologiques du lac. Cette approche est partielle : on estime que la composante précipitations à la surface du lac (P) représente 55% des apports, contre seulement 45% en ce qui concerne (Q_i), à savoir les apports en provenance du bassin versant rapportés à la surface du lac. Pour le Victoria, les bilans dépendent très majoritairement des précipitations à la surface du lac (P). Cette valeur est estimée à 84% (Sutcliffe et Parks, 1999 ; Bergonzini, 2002). L'objectif est donc de considérer les pluies sur les lacs. Les données issues du satellite MSG seront utilisées.

Etendre les impacts sur l'hydrologie à l'Afrique australe.

Van Langenhove *et al.* (1998) ont montré que le débit des principaux fleuves namibiens et du Zambèze au niveau des chutes Victoria a connu des évolutions sensibles tout au long du xx^e siècle. En particulier, le Zambèze, dont le bassin versant couvre une partie importante de l'Afrique australe est marqué par l'existence de 4 périodes distinctes. Développer ce type de travail en collaboration avec des hydrologues serait une perspective intéressante.

Axe 2 : Caractéristiques de la variabilité pluviométrique décennale

a/ Objectifs

Rechercher des cycles en utilisant des transformées en ondelettes.

Dans la littérature, la variabilité décennale des précipitations en Afrique australe est essentiellement appréhendée en termes de cycles. Des cycles basse fréquence (de longueur d'onde supérieure à 8 ans) ont été identifiés depuis 1971 par Tyson : 9.5-10 ans (littoraux sud et ouest), 13-15 ans (petites régions au sein des ex-états de l'Orange et du Transvaal), 18-20ans (nord-est du pays) et 26-30 ans (petites régions éparses). Depuis, les travaux montrent que le cycle le plus net dans les régions tropicales d'Afrique australe est celui de 18 ans (Kruger, 1999). Tout au long du xx^e siècle, l'alternance entre décennies anormalement sèches et humides est observée. En analysant des écrits non publiés de missionnaires, Nash et Endfield (2002) retrouvent des successions d'années sèches et humides d'environ 10 ans sur la période 1815-1900 dans le sud du Kalahari. Une publication de Mason (1990) pose l'hypothèse selon laquelle le cycle de 18 ans pourrait être associé aux TSO des latitudes moyennes de l'océan Atlantique Sud. Ces analyses sont poursuivies en intégrant les années les plus récentes et en s'appuyant sur des transformées en ondelettes afin de voir si l'énergie des différentes cyclicités basse fréquence, et en particulier de celle du cycle de 18 ans, est constante tout au long du siècle.

Analyser l'amplitude de la variabilité interannuelle.

La variabilité décennale peut affecter l'ampleur de la variabilité pluviométrique interannuelle et les structures spatiales associées. Les structures spatiales de co-variabilité n'ont pas nécessairement été stables au cours des dernières décennies. Cette hypothèse est testée sur les cinq dernières décennies du xx^e siècle. L'évolution décennale de la pluviométrie est appréhendée au travers d'ACP sur des sous périodes et de la variance interannuelle calculée sur des fenêtres glissantes. Les modifications décennales sont recherchées sur les séries pluviométriques, puis mises en relation (analyses composites) avec d'autres variables climatiques afin de proposer des hypothèses quant aux éléments susceptibles d'expliquer ces modifications.

b/ Résultats

Contrairement à l'Afrique de l'Ouest,

Depuis la seconde guerre mondiale, l'Afrique de l'Ouest a connu des évolutions significatives de sa pluviométrie (Janicot et Fontaine, 1993, par ex.). Pour le Sénégal, nous avons montré qu'accompagnant la diminution du volume, on observait une réduction du nombre de jours de pluie et un retard sensible de la date de démarrage des précipitations (8/ Diop *et al.*, 1996 ; 11/ Diop *et al.*, 1996). En revanche, la date de fin de l'hivernage semble peu affectée. Ces observations conduisent à la proposition d'un calendrier de probabilité des dates de début et de fin de la saison des pluies, prenant en compte ces modifications. Cette étude a été utilisée par Mbaye Diop, au sein de l'Institut Sénégalais de Recherche Agronomique (ISRA) comme un outil d'aide à la décision quant aux dates de semis et au choix de la géographie des cultures pluviales.

L'Afrique australe ne connaît pas de tendances sur les volumes précipités.

En Afrique australe, si l'on s'en tient aux volumes précipités, des évolutions comparables ne sont pas observées (Hulme, 1992). Mason (1996) indique que le Lowveld connaissait une diminution des précipitations. Ceci n'a pas été confirmé dans les années récentes (Rouault et Richard, 2003). Le Lowveld a connu des pluies globalement excédentaires depuis 1995 : nettement excédentaires en 1995-96 (www.egs.uct.ac.za/~rouault/out/spi/all/spimapall962.jpg), proches de la normales en 1996-97 (spimapall972.jpg), déficitaires en 1997-1998 (spimapall982.jpg), légèrement excédentaires en 1998-99 (spimapall992.jpg) et très excédentaires en 1999-2000 (spimapall1003.jpg).

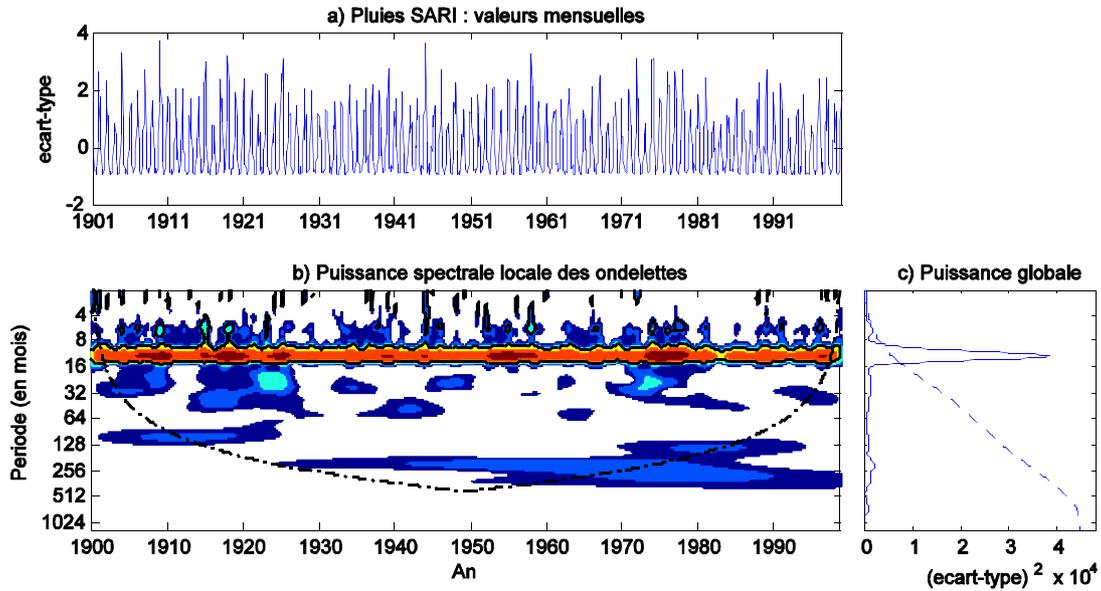
L'emploi de transformées en ondelettes

Les transformées en ondelettes offrent l'avantage de pouvoir repérer des cycles dont la magnitude évolue au cours de la période étudiée (Beurke Hubbard, 2000). Dans une problématique portant sur la variabilité décennale, les transformées en ondelettes sont plus adaptées que les analyses spectrales car permettent de détecter l'évolution décennale de différents cycles. Il existe 4 bases courantes de transformées en ondelettes. L'ondelette Morlet $\omega_0 = 6$ est ici sélectionnée. Elles doivent être accompagnées d'un test de signification (Torrence et Compo, 1998). Les graphiques sont dotés d'un cône d'influence qui évite d'interpréter des résultats pouvant, en début et en fin de période surtout, être erronés. Enfin, le seuil de signification à 95% calculé à partir de séries de Monte Carlo est indiqué.

confirme l'importance des cycles décrits dans la littérature.

Sur l'indice Southern African Rainfall Index (SARI), représentant une vaste structure de covariabilité pluviométrique en Afrique australe (voir plus loin 8/ Richard *et al.*, 2000) et étendu à la période 1900-1998 (fichier CRU), plusieurs cycles sont détectés. Si l'on effectue l'analyse sur les précipitations mensuelles exprimées en valeurs brutes (Fig. 19a), le cycle annuel prédomine (Fig. 19b). D'autres périodicités sont détectées vers 2-3 ans (24-36 mois), au début du siècle ainsi que dans les années 1970 ; et 8-10 ans (96-120 mois), au début du siècle et 18-20 ans (216-240 mois), sur la seconde moitié du xx^e siècle. Sur cette série brute, seul le cycle annuel est significatif tout au long du siècle (Fig. 19c).

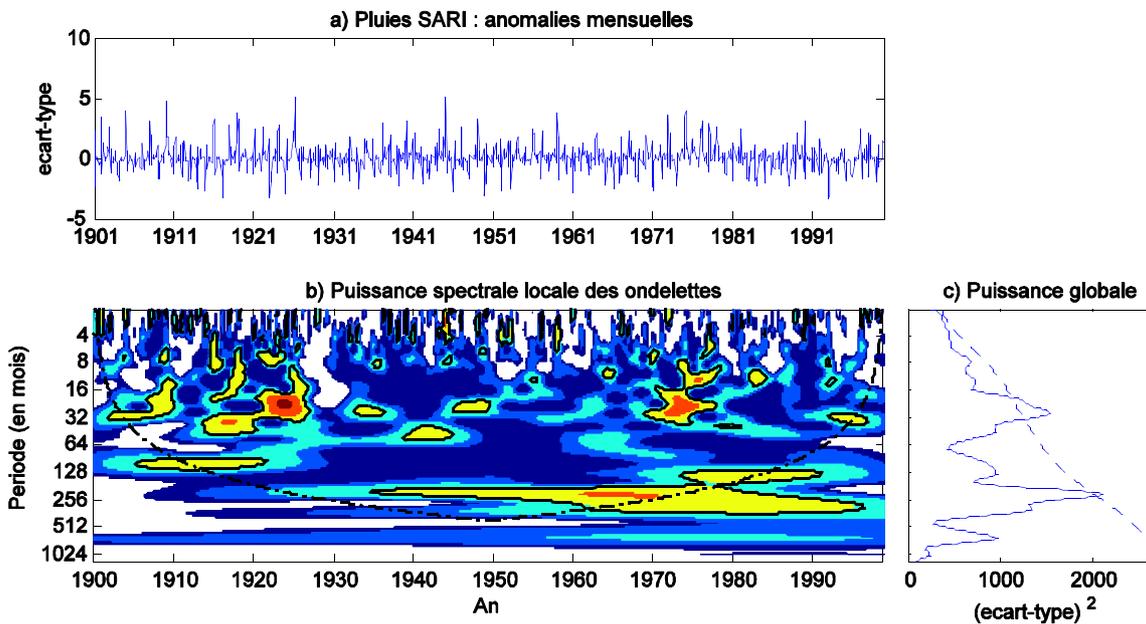
Figure 19 : Ondelettes sur la série pluviométrique SARI.



Ces cycles sont significatifs si l'on centre les valeurs par mois.

Pour s'affranchir du cycle annuel, sans pour autant conférer à chaque mois le même poids statistique, ce qui reviendrait à exagérer l'importance des mois secs, la série a été centrée mois par mois. Les valeurs, en mm, expriment des écarts aux moyennes mensuelles calculées sur la période 1900-1998 (Fig. 20a). Les périodicités de 2-3 ans, 8-10 ans et 18-20 ans sont localement significatives (Fig. 20b).

Figure 20 : Ondelettes sur la série pluviométrique SARI exprimée en anomalies par mois.



Les cycles haute fréquence sont marqués dans les années 1920 et 1970.

Dans les hautes fréquences (moins de huit ans), les bandes où l'énergie est maximale sur le siècle sont (Fig. 20c) :

- 24-30 mois (Fig. 21a), soit autour des 27 mois correspondant à la QBO, la variance est maximale lors des années 1920 et 1970 et diminue globalement au cours du xx^e siècle ;
- 24-96 mois (Fig. 21b), soit 2-8 ans, périodicités associées à l'ENSO, la variance est maximale dans les années 1910, 1920 et 1970. Elle est minimale dans les années 1930 et 1950. Ceci correspond aux modulations décennales de la variance de l'ENSO, appréhendées au travers de la SOI comme de Niño3 (Torrence et Compo, 1998). Wang et Wang (1996) montrent également que l'ENSO a des périodicités dont la magnitude varie à l'échelle décennale, sachant qu'au cours du xx^e siècle la variance totale est maximale après 1970 ;

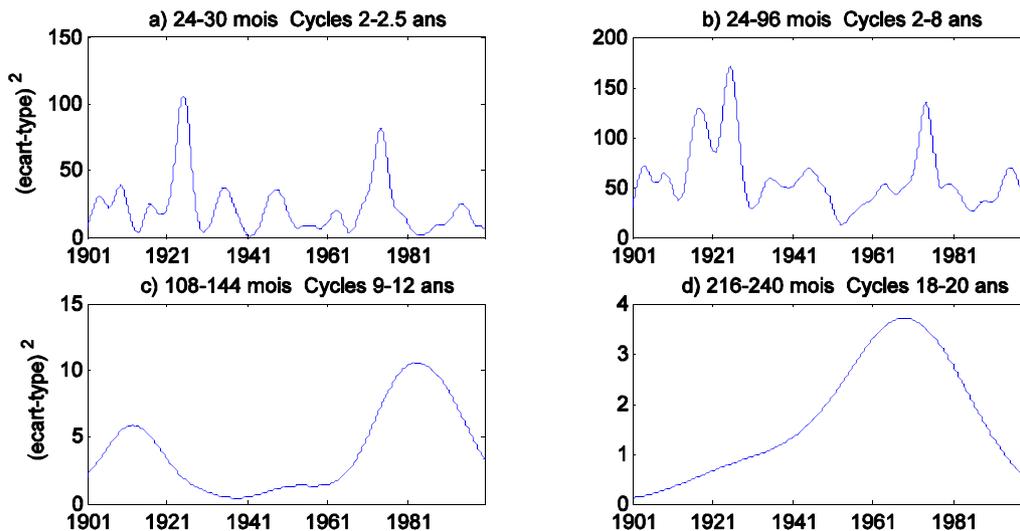
Les cycles basse fréquence sont plus nets sur la seconde moitié du xx^e siècle.

Dans les basses fréquences (plus de huit ans), les bandes où l'énergie est maximale sont (Fig. 20c) :

- 108-144 mois, intégrant le cycle d'environ 10 ans, la variance est maximale depuis 1970 (Fig. 21c) ;
- 216-240 mois, soit 18-20 ans, la variance est plus élevée sur la deuxième moitié du siècle (Fig. 21d).

Si l'on intègre les deux cycles basse fréquence, à savoir supérieurs à huit ans, l'énergie croît à partir de la seconde guerre mondiale et est maximale depuis les années 1970. En Afrique australe tropicale, la composante cyclique basse fréquence s'est accrue au siècle dernier.

Figure 21 : Puissance spectrale locale des ondelettes dans 4 bandes de longueur d'onde



Les structures spatiales de variabilité se renforcent depuis la fin des années 1960.

Sur l'ensemble de l'Afrique au sud du Sahara, en considérant les totaux pluviométriques annuels, nous avons effectué des analyses (ACP) visant à identifier les structures de variabilité interannuelle (28/ Bigot *et al.*, 1995, 2/ Bigot *et al.*, 1997 et 29/ Bigot *et al.*, 2000). Sur l'intégralité de la période étudiée (1951-1988), l'Afrique australe apparaît comme étant une entité cohérente. En termes de variance expliquée, critère sensible à l'échantillonnage, elle intervient en troisième rang (CP3) après l'Afrique soudano-sahélienne (CP1) et l'Afrique de l'Est (CP2). Si l'on coupe la période en deux sous périodes de longueurs sensiblement égales : oct-1950/sep-1968 et oct-1968/sep-1988, et que l'on effectue deux ACP distinctes, l'Afrique australe est toujours une entité cohérente (à la différence de l'Afrique soudano-sahélienne dont la cohérence n'est pas marquée entre 1950 et 1968). Mais l'élément le plus intéressant est qu'elle arrive en premier rang (CP1) sur la période 1968-1988. En conclusion, comparativement aux autres régions d'Afrique, l'Afrique australe a vu sa cohérence spatiale se renforcer depuis la fin des années 1960. On ne peut totalement exclure que ceci soit en partie lié à l'évolution de la qualité du réseau ou des données. Mais, sur la période considérée, 1951-1988, ce réseau n'a *a priori* pas connu d'évolution d'ensemble sensible.

Les structures spatiales de variabilité sont liées à l'ENSO.

Ces recherches conduisent à une seconde conclusion en ce qui concerne la cohérence spatiale de la variabilité pluviométrique en Afrique australe. Deux autres échantillons ont été constitués sur la période 1950-1988 : d'une part les 19 années marquées par un événement ENSO (10) ou LNSO (9), d'autre part les 20 années « neutres » au regard de l'ENSO. Ici encore, la taille sensiblement égale des deux échantillons permet de comparer les valeurs propres issues des deux ACP distinctes. L'Afrique australe est identifiée comme étant le mode principal (CP1) lors des années ENSO/LNSO. En revanche, elle n'apparaît qu'en troisième rang (CP3) pour les autres années, et son développement spatial est considérablement moindre. L'ENSO, plus que dans les autres régions d'Afrique, est donc l'élément qui semble expliquer le fort développement spatial des anomalies pluviométriques en Afrique australe. Comme l'ENSO est marqué par des variations décennales (An et Wang, 2000), il devrait logiquement en être de même pour la cohérence spatiale des anomalies pluviométriques en Afrique australe.

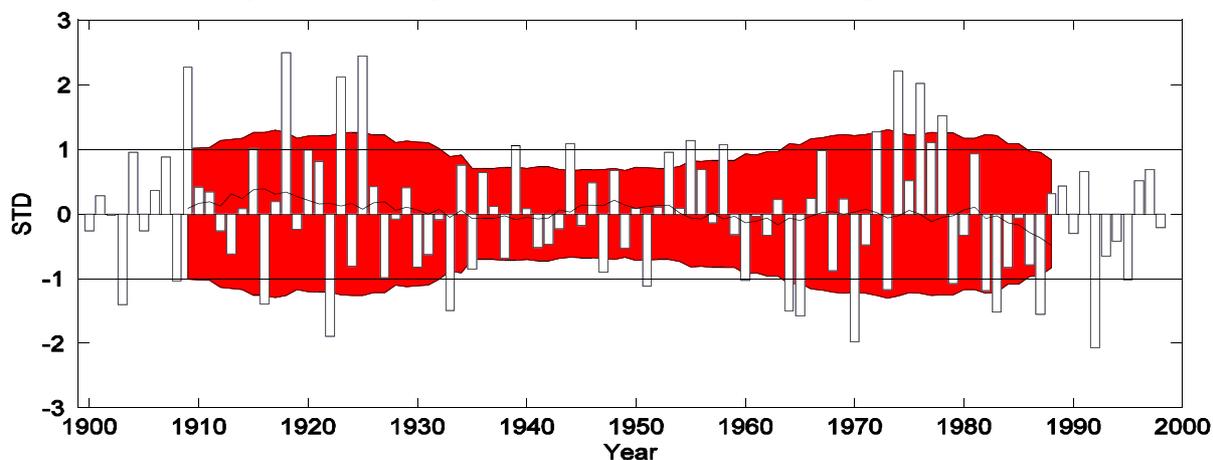
La variabilité interannuelle s'accroît en RSA depuis 1970.

Fauchereau (1999) montre que les précipitations de RSA connaissent une évolution décennale de leur variabilité interannuelle. Un test de Fisher atteste de la signification de l'évolution de la variance entre deux périodes (de part et d'autre de 1970) en ce qui concerne les cumuls précipités de 2 trimestres. Le résultat est d'autant plus intéressant que les évolutions sont inverses : en début d'été austral (octobre-décembre) la variabilité interannuelle s'est atténuée depuis 1970, tandis qu'en fin d'été austral (janvier-mars), saison où les volumes précipités sont les plus importants, elle s'est accrue. L'évolution différentielle entre les deux saisons permet d'éliminer l'hypothèse selon laquelle le renforcement de la cohérence serait un artefact lié à la qualité des données.

Les sécheresses de fin d'été sont plus sévères et plus étendues depuis 1970.

Des résultats similaires ont été obtenus à l'échelle de l'Afrique australe en ce qui concerne la fin de l'été (Fig. 22, 5/ Richard *et al.*, 2001).

Figure 22 : Précipitations de Janvier-Mars en Afrique australe



Barres : précipitations standardisées. Courbe : moyenne mobile sur 20 ans. Rouge : variance mobile sur 20 ans

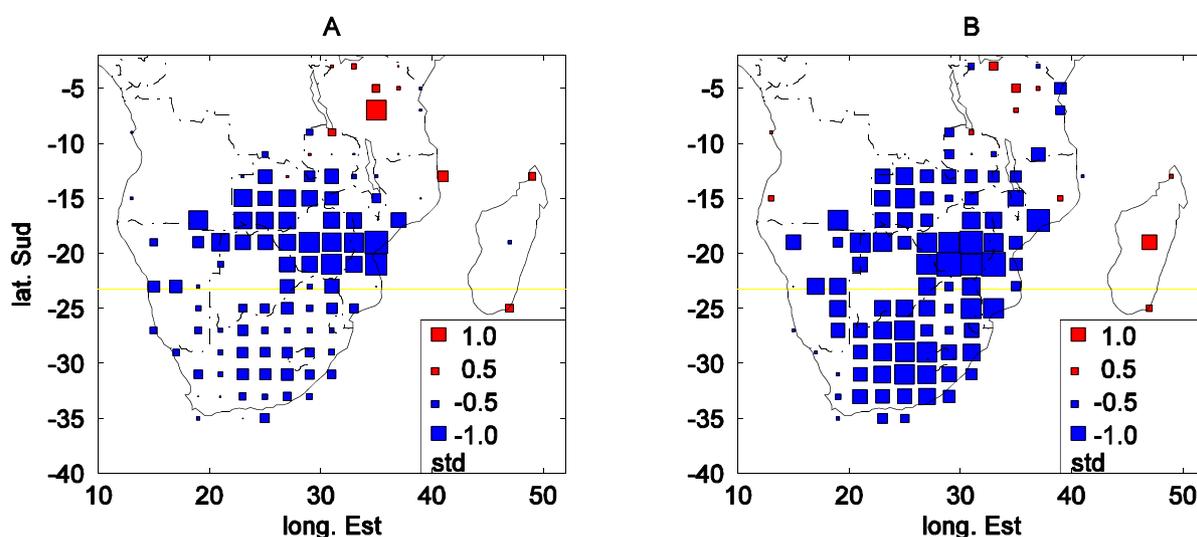
L'enveloppe de variance, calculée sur des fenêtres mobiles de 20 ans, montre que la variabilité interannuelle est maximale dans les années 1910-1920 et 1970-1980. Elle est minimale dans les années 1940-1950. On ne peut pas exclure que des perturbations des réseaux météorologiques aient eu lieu lors des deux guerres mondiales, mais force est de constater que ces deux périodes connaissent des variances très différentes. L'hypothèse retenue est donc celle d'un véritable signal climatique.

Une analyse composite, où ont été sélectionnées sur deux périodes distinctes (1950-1969 et 1970-1988) les cinq janvier-mars les plus secs de l'indice SARI (respectivement 1951, 1960, 1964, 1965, 1968 et 1970, 1973, 1982, 1983, 1987), montre que les écarts à la moyenne sont plus marqués depuis 1970, en particulier au sud du tropique (Fig 23). Les sécheresses sont plus sévères depuis 1970 (Fig. 23b) que dans les années 1950 et 1960 (Fig 23a).

Figure 23 : Anomalies pluviométriques lors des cinq janvier-mars les plus secs.

a) 1950-1969

b) 1970-1988



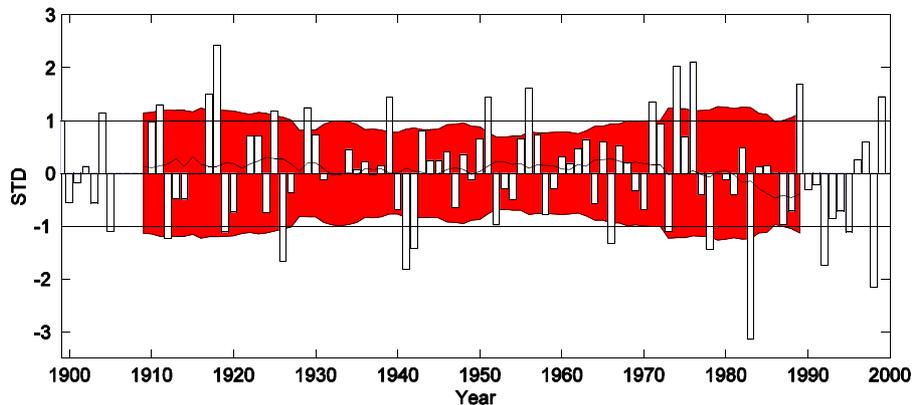
Valeurs exprimées en écart-type. Bleu : déficit pluviométrique. Rouge : excédent.

La variabilité décennale des précipitations serait associée à celle de l'ENSO.

Les deux échantillons de fin d'étés secs (1950-1969 versus 1970-1988) ne sont pas associés aux mêmes anomalies de circulation (5/ Richard *et al.*, 2001 ; 43/ Trzaska et Richard, 2003). Entre 1950 et 1969, les janvier-mars secs interviennent conjointement à des anomalies froides de la TSO dans le sud-ouest des océans Indien et Atlantique. Après 1970, ils sont associés à des anomalies chaudes sur les secteurs équatoriaux des océans Indien et Pacifique. Nous montrons également que les anomalies de la circulation atmosphérique associées aux sécheresses sont différentes. Avant 1970, elles étaient cantonnées aux latitudes subtropicales à tempérées et à des régions bien délimitées. Depuis 1970, les anomalies significatives sont beaucoup plus étendues et concernent les basses latitudes.

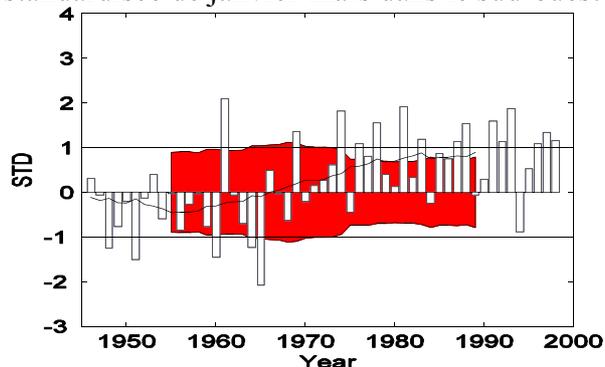
La technique de l'enveloppe de variance appliquée à la SOI (Fig. 24, 5/ Richard *et al.*, 2001) montre des similitudes avec celle dédiée à SARI (Fig. 22). Wang et Ropelewski (1995) notent un réchauffement du Pacifique tropical et une amplitude plus élevée des ENSO récents. Cette variation d'amplitude serait liée à celle du contexte global des TSO. Nous posons l'hypothèse que les ENSO des années 1950 et 1960 n'avaient pas l'influence observée depuis 1970 sur la pluviométrie d'Afrique australe. Un élément à considérer est que ceux-ci interviennent dans un contexte global différent, en particulier de réchauffement de l'océan Indien (Fig. 25).

Figure 24 : Différence des pressions standardisées de Tahiti et de Darwin (1900-1999)



Barres : précipitations standardisées. Courbe : moyenne mobile sur 20 ans. Rouge : variance mobile sur 20 ans.

Figure 25 : TSO standardisée de janvier-mars dans le sud-ouest de l'océan Indien.



Barres : précipitations standardisées. Courbe : moyenne mobile sur 20 ans. Rouge : variance mobile sur 20 ans.

c/ Perspectives

Fluctuation décennale ou changement durable ?

Dans les années à venir, l'objectif est de voir si la rupture de 1970 est une manifestation de fluctuations décennales ou d'un changement durable. Nous avons effectué la synthèse des travaux mettant en évidence des signaux décennaux dans les précipitations d'Afrique au sud du Sahara (9/ Camberlin *et al.*, 2002). Le résumé précise que les 30 dernières années ont vu se succéder différentes « crises climatiques ». Pour l'Afrique australe, les enveloppes de variance, qu'il s'agisse des précipitations (Fig. 22) ou de la SOI (Fig. 24) montrent que des situations analogues à celles observées depuis 1970 se sont déjà produites au xx^e siècle, dans les années 1910 et 1920. Cet élément pourrait donc s'inscrire dans le cadre de fluctuations décennales. En contrepartie, l'évolution de la TSO, que ce soit dans l'océan Indien (Fig. 25) ou dans le Pacifique, comme en témoigne l'indice Niño3 (non montré), vont dans le sens d'un changement durable, celui du réchauffement global. Nous vérifierons sur les années ultérieures (après 1998) si les tendances mises en évidence depuis 1970 se confirment. Si cette tendance était confirmée, nos travaux auraient ouvert une piste dans l'étude du changement climatique observé en Afrique australe.

Mieux comprendre la rupture de 1970.

Il est nécessaire de mieux caractériser les évolutions étant intervenues dans le système climatique autour de 1970. En particulier, il convient de voir comment la rupture observée dans les précipitations d'Afrique australe s'articule avec les variations décennales observées sur l'hémisphère sud (Garreaud et Battisti, 1999 ; Reason, 2000), l'océan Indien (Allan *et al.*, 1995). Nous nous focaliserons sur les modifications légèrement décalées (1976) ayant affecté l'océan Pacifique nord (Trenberth et Hurrell, 1994), l'océan Pacifique tropical (augmentation de la période d'oscillation de l'ENSO (An et Wang, 2000)) et l'océan Indien (Clark *et al.*, 2000).

Axe 3 : Expliquer le changement d'impact des ENSO

a/ Objectifs

L'ENSO change → son impact sur les pluies d'Afrique australe est modifié.

Une rupture a été observée vers 1970 en Afrique australe, tant en termes d'importance de la variabilité pluviométrique interannuelle qu'en termes de téléconnexions (5/ Richard *et al.*, 2001, déjà cité). Ce résultat est cohérent avec ceux qui sont obtenus dans des travaux portant sur l'Afrique de l'Ouest (Janicot *et al.*, 1996) ou le Nordeste brésilien (Roucou *et al.*, 1996). Dans ces trois régions l'influence de l'ENSO sur la pluviométrie s'est renforcée depuis l'après seconde guerre mondiale.

Les ENSO/LNSO ne présentent pas des caractéristiques identiques de 1950 à aujourd'hui et interviennent dans un contexte climatique global en évolution. Ces éléments sont susceptibles de modifier l'impact du phénomène ENSO sur la pluviométrie d'Afrique australe et de faire évoluer certains traits de la variabilité pluviométrique interannuelle (extension spatiale des anomalies, magnitude des sécheresses/excédents et des différentes cyclicités analysées dans l'axe 2).

Effectuer des expériences de sensibilité pour tester l'hypothèse.

On peut conduire des expériences où les MCGA sont forcés aux limites, à savoir par forçage radiatif du rayonnement solaire (variant saisonnièrement mais pouvant également varier, selon les échelles de temps considérées, en fonction de cycles emboîtés) et par flux de surface liés aux conditions de surface. Les océans représentent 72% des surfaces. Les variations des éléments jouant sur les échanges océan-atmosphère sont relativement peu nombreux comparativement à ceux intervenant à la surface des continents. Il s'agit essentiellement de la TSO (très secondairement de la salinité, de la turbidité...). L'idée est donc d'imposer à un MCGA des anomalies de TSO correspondant à une hypothèse, pour nous la modification des ENSO et/ou de leur contexte.

b/ Résultats

Imposer au MCGA ARPEGE/climat des anomalies de TSO pour le mois de mars.

Le choix du MCGA a porté sur ARPEGE/Climat, modèle développé au Centre National de Recherches Météorologiques (CNRM) de Météo France (Déqué *et al.*, 1994). La version utilisée est ARPEGE-Climat - version 1, en troncature T42 (résolution spatiale de $2.8^{\circ} \times 2.8^{\circ}$), possédant 30 niveaux verticaux et s'appuyant sur le schéma de végétation ISBA. Les simulations portent sur des périodes courtes et concernent un mois de la saison des pluies : mars pour l'Afrique australe et le Nordeste, août pour l'Afrique de l'Ouest. Le choix du mois de mars était déterminé par une contrainte : être utilisable pour le Nordeste. Mais, conformément à ce qui a été montré dans le premier chapitre, il s'agit d'un mois « parmi » d'autres au sein de la saison des pluies (20/ Richard *et al.*, 2002, déjà cité). Les anomalies observées en mars sont, le plus fréquemment, conformes à celles des mois précédents (depuis décembre) ou du mois suivant (avril).

Définir des champs d'anomalies conformes à l'observation.

La définition des configurations d'anomalies de TSO est relativement originale. Fréquemment, une fenêtre spatiale est sélectionnée (un bassin océanique ou un secteur plus réduit). Ce type d'expérience est très théorique, dans le sens où il permet de tester le rôle joué par un secteur donné, mais ne correspond à aucune réalité terrain : il n'existe pas d'année où la TSO soit moyenne partout hormis sur un secteur. Notre approche est plus empirique. Les configurations sont issues d'ACP effectuées sur la TSO planétaire. Quatre modes principaux sont identifiés (Trzaska *et al.*, 1996). Le mode principal (CP1) représente l'ENSO moyen de l'après guerre, sans tendance ni changement quelconque. Les valeurs propres des trois modes suivants sont quasi identiques, de moitié inférieures à celle du mode tropical. Deux modes représentent les anomalies de la TSO essentiellement observées dans l'océan Atlantique tropical Nord d'une part, Sud d'autre part. Le troisième témoigne d'une l'évolution différentielle de la TSO entre latitudes tempérées et subtropicales des deux hémisphères. En particulier, les poids locaux sont élevés dans le Sud de l'océan Indien (Trzaska *et al.*, 1996).

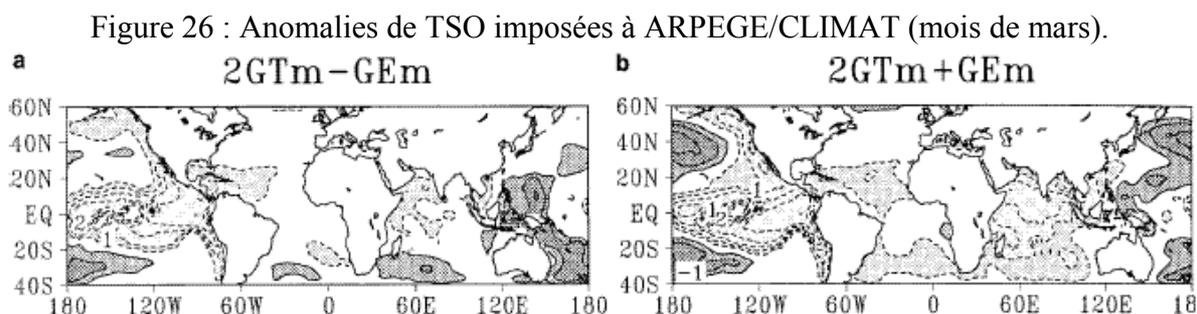
Les quatre modes sont combinés deux à deux (avec un coefficient de pondération de 2 pour le mode tropical conformément à sa valeur propre) pour déterminer des champs d'anomalies idéalisés, tout en étant complexes car relativement conformes à ce qui a été observé sur certaines années, et de surcroît identifiables. Sur cette base, pour chaque saison (mars ou août), du fait de la combinaison deux à deux des modes, huit expériences sont définies. Pour chacune d'entre elle, trois simulations sont effectuées afin de considérer des conditions initiales différentes (Trzaska, 2002).

Dans le modèle, les anomalies atlantiques de TSO ne modulent guère la pluviométrie d'Afrique australe.

Parmi ces expériences, celles intégrant un mode Atlantique, se sont pas avérées ne pas avoir d'impact, dans le modèle ARPEGE/CLIMAT, sur la pluviométrie d'Afrique australe. Ceci constitue un résultat, non publié car difficilement publiable, mais néanmoins informatif : l'expérimentation conforte l'analyse diagnostique : les pluies d'Afrique australe sont peu sensibles aux variations de TSO de l'océan Atlantique tropical.

Deux configurations d'anomalies de TSO pour tester l'hypothèse de la modification du contexte des ENSO.

Deux expériences (34/ Trzaska *et al.*, 1998 ; 25/ Trzaska *et al.*, 1998 ; 38/ Trzaska et Richard, 2000) correspondent à l'hypothèse posée, du moins à la moitié de celle-ci car les LNSO ne sont pas considérés. Le mode tropical conduit à imposer des TSO anormalement chaudes dans le Pacifique Central et Oriental (conformément à un événement ENSO). Lui soustraire le mode extratropical revient à imposer des TSO anormalement élevées aux latitudes tempérées de l'hémisphère Nord, et anormalement froides aux latitudes subtropicales et tempérées de l'hémisphère sud, en particulier dans l'océan Indien (Fig. 26a). La combinaison ainsi obtenue ressemble beaucoup aux champs composites de TSO observées sur les ENSO antérieurs à 1970. Ajouter au mode tropical le mode extratropical (Fig. 26b) revient à définir des anomalies de TSO proches de celles observées lors des ENSO étant intervenus depuis 1970, en particulier dans un contexte où l'océan Indien s'est réchauffé (Fig. 25).



Isolignes tous les 0.5°K. Gris clair et pointillés : anomalie positive supérieure à 0.5°K. Gris foncé et trait continu : anomalie négative supérieure à 0.5°K

Les corrélations entre la SOI et les TSO témoignent de l'extension spatiale des anomalies liées à l'ENSO sur la période 1970-1992 par rapport à la période antérieure (1946-1969). Avant 1970, les anomalies de TSO associées à celles de la SOI n'étaient très étendues que dans le Pacifique (Fig. 9a in 8/ Richard *et al.*, 2000). Dans l'océan Indien, elles épargnaient le cœur du bassin et se concentraient le long des côtes africaines, en mer d'Arabie, dans le golfe du Bengale et le long de Sumatra. Depuis 1970, l'ensemble du bassin est concerné. Des corrélations significatives sont observées au sud de l'équateur, au cœur de l'océan Indien (Fig. 9b).

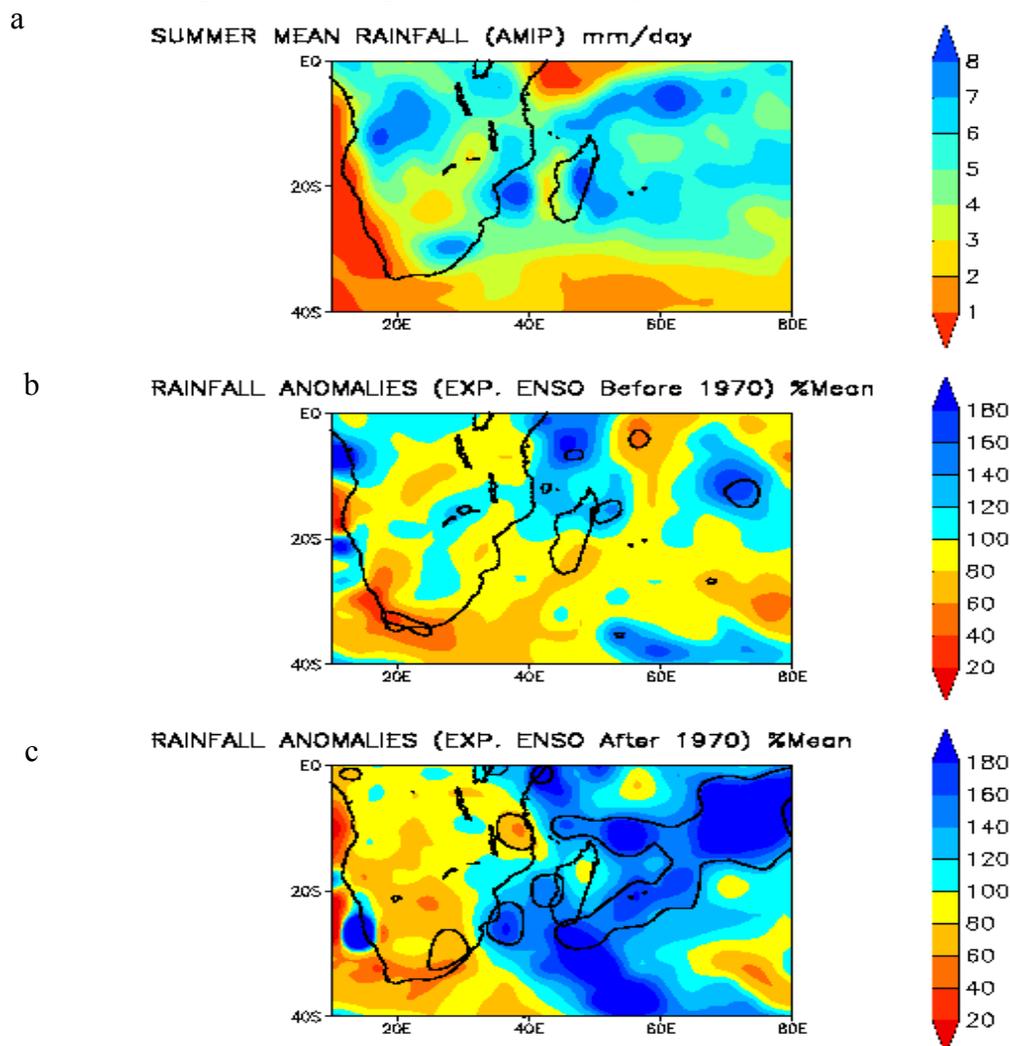
Des anomalies de pluies simulées conformes aux observations.

Pour chacun des deux jeux, les trois simulations sont moyennées. Les écarts à la moyenne AMIP (Gates, 1992), qui permet de vérifier que la géographie des précipitations est relativement bien simulée par ARPEGE, montrent que les valeurs sont surestimées en Afrique australe (Fig. 27a). En Afrique de l'Ouest comme en Afrique australe, et conformément à l'observation, seules les configurations de type ENSO post-1970 induisent des anomalies significatives de précipitations (30/ Trzaska *et al.*, 2002 ; 38/ Trzaska et Richard, 2000, déjà cité). En Afrique australe, avant 1970 les écarts sont de signe variable sur le sous-continent et ne sont pas significatifs (Fig. 27b). Après 1970, des déficits sont simulés sur le continent, tandis que des excédents interviennent sur le proche océan Indien (Fig. 27c).

Les ENSO post-1970 engendrent un dipôle de pression et d'OLR entre Afrique australe et proche océan Indien.

L'étude de la pression de surface simulée par ARPEGE/climat permet de distinguer deux configurations différentes (25/ Trzaska *et al.*, 1998, déjà cité). Avant 1970, les ENSO induisent un renforcement généralisé de la pression aux latitudes tropicales sur et autour de l'Afrique australe. Ces anomalies ne sont pas significatives au regard du test de Student. Après 1970 un dipôle d'anomalies de pressions de surface oppose le continent du proche océan Indien. Les résultats obtenus à 850 hPa confirment le creusement isobarique au niveau de Madagascar et le renforcement de la dorsale de hautes pressions sur le sous-continent (31/ Trzaska *et al.*, 2002 ; 8/ Richard *et al.*, 2000, déjà cité). Ce dipôle a préalablement été observé par Jury (1992). Il induit une modification du gradient de pression entre l'océan Indien, principale source d'humidité pour l'Afrique australe, et le continent. Lors des ENSO récents, cette structure limite la pénétration des flux chargés d'humidité depuis l'océan Indien vers l'Afrique australe.

Figure 27 : Précipitations calculées par ARPEGE/climat en mars.



a : moyenne AMIP (1979-1988) en mm/jour. b anomalies générées par l'expérience ENSO avant 1970, c après 1970. b et c : rouge : anomalies négatives, bleu : anomalies positives, en mm/mois. Trait continu : anomalies significatives au seuil 95% (Student).

Nous avons vu, dans le second chapitre, qu'en Afrique australe les OLR étaient très corrélées avec les pluies. L'expérience de sensibilité correspondant à des ENSO intervenant avant 1970

ne s'accompagne pas d'anomalies significatives de la convection profonde (OLR) dans le modèle. En revanche, lors des ENSO post-1970 la convection diminue significativement sur l'ensemble du sous-continent et augmente sur le proche océan Indien vers 10°Sud. Ici encore cette structure dipolaire a été observée par Jury (1992) lors des étés secs en Afrique australe.

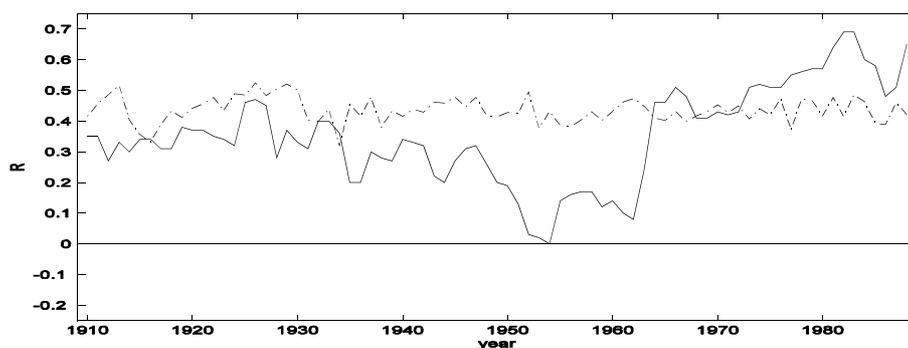
Les ENSO récents s'accompagnent de profondes modifications de circulation.

Si l'on étudie d'autres paramètres (un des avantages de l'utilisation de sorties de modèles), on constate que tous, entre autres le vent zonal à 30° Est sur toute la troposphère, le potentiel de vitesse à 850 hPa sur l'ensemble du globe (8/ Richard *et al.*, 2000), ou la circulation divergente à 200 hPa (29/ Trzaska *et al.*, 2002 ; 36/ Trzaska *et al.*, 2002), témoignent d'anomalies plus profondes de la circulation atmosphérique sur l'ensemble de la zone tropicale lors des ENSO intervenant dans un contexte plus chaud dans l'hémisphère Sud.

Variabilité décennale ou changement climatique ?

Une corrélation entre l'indice pluviométrique South African Rainfall Index, calculé sur la saison décembre-avril conformément à 20/ Richard *et al.* (2002), déjà cité, et la SOI montre que l'intensité du lien observé depuis 1970 est sans précédent au xx^e siècle (Fig. 28). Certes, comme signalé plus haut, la période 1910-1930 présente des similitudes avec la période post-1970, mais seule la période récente est marquée par une corrélation significative au seuil 95% selon la méthode de Monte Carlo (4/ Fauchereau *et al.*, 2003). Les années où la corrélation est minimale sont les années cinquante, pendant lesquelles le bon fonctionnement des réseaux de mesures ne fut pas particulièrement perturbé.

Figure 28 : Evolution des corrélations entre SARI et SOI.
Décembre-avril 1900-1998 - fenêtres glissantes de 20 ans.



Les années correspondent à la moitié des périodes de 20 ans. Pointillés : niveau de signification 95% selon des simulations de Monte Carlo pour chacune des périodes de 20 ans.

Le contexte plus chaud dans lequel interviennent les ENSO ne s'inscrit pas dans une logique décennale. C'est une manifestation du réchauffement global lié à l'augmentation anthropogénique des GES (IPCC, 2001). Nous posons l'hypothèse selon laquelle l'évolution observée et simulée des caractères des anomalies pluviométriques en Afrique australe, ainsi que les téléconnexions avec les anomalies de circulation, en particulier l'ENSO, pourrait être liée au changement climatique (4/ Fauchereau *et al.*, 2003).

c/ Perspectives

Les travaux conduits à partir d'expériences de sensibilité d'un MCGA à des anomalies réalistes de TSO doivent être poursuivis.

D'autres expériences de sensibilité à des anomalies, plus circonscrites, de TSO.

Nous comptons définir de nouveaux jeux d'expériences où des anomalies des TSO sont imposées à un modèle atmosphérique. Les anomalies de TSO peuvent être réalistes (comme le sont les combinaisons de modes propres), ou peuvent relever d'une démarche plus analytique en testant l'influence propre d'un bassin océanique voire même d'un secteur plus réduit, comme cela a été réalisé pour la RSA par Reason (1998). Dans cette seconde optique, l'objectif est de tester le rôle des dipôles subtropicaux des océans Atlantique Sud et Indien (4/ Fauchereau *et al.*, 2003). Ces dipôles sont forcés par l'atmosphère. Mais en retour, ils ont nécessairement une influence sur l'évaporation et le transport d'humidité des océans vers l'Afrique australe. L'aspect rétroaction sur l'atmosphère se doit donc d'être. Pour cela, une collaboration avec le CNRM (par exemple) doit être envisagée afin de définir des simulations en mode couplé de l'ordre de six mois.

Définir des expériences de sensibilité à des conditions de surface continentale.

La sensibilité du climat (celui des modèles atmosphériques) aux conditions de surface continentales mériterait d'être testée. Deux éléments sont à travailler : la végétation, au travers du NDVI, et la réserve en eau du sol (issue du NCEP). L'Afrique australe n'est pas une région de mousson et les gradients d'énergie entre l'océan et le continent ne sont pas nécessairement fondamentaux. Aucune forêt sempervirente d'envergure n'est présente. Néanmoins, le potentiel d'eau recyclable, que ce soit au niveau du bassin endoréique de l'Okavango ou bien des forêts de type miombo et prairies du veld, n'est certainement pas négligeable. Ceci nécessite de mettre en place une collaboration avec des modélisateurs (IPSL ou Météo France) travaillant sur les schémas de surface.

Chapitre 3 : conclusions principales

La relation entre les variations du niveau du lac Tanganyika et la pluviométrie sur le bassin versant met en évidence un changement d'échelle décennale. Depuis l'année 1961, exceptionnelle de par l'importance des précipitations intervenues lors des short rains, on note une plus grande efficacité des pluies. Celle-ci est due à une installation plus précoce de la saison des pluies ainsi qu'à une anthropisation des milieux modifiant les conditions d'écoulement de surface.

Au Sénégal, depuis 1968 environ, la saison des pluies est moins précoce, ce qui perturbe l'activité agricole. Nous proposons une modification précise des calendriers agricoles. Plus largement, en Afrique, les structures spatiales de variabilité pluviométriques se sont modifiées dans les années soixante. En Afrique australe elles deviennent plus fortes, indiquant par exemple que les sécheresses sont plus prononcées et étendues depuis 1970. Ces éléments sont à mettre en relation avec le phénomène ENSO, plus fréquent et de plus forte amplitude.

Des expériences de sensibilité d'un MCG atmosphérique aux anomalies de TSO montrent également que la plus forte sensibilité des précipitations d'Afrique australe à l'ENSO est liée au contexte global. En particulier, le réchauffement de l'océan Indien subtropical est un élément qui fait que les ENSO récents induisent des sécheresses plus sévères.

Publications

Axe 1

1/ BERGONZINI L., **RICHARD Y.**, CAMBERLIN P., 2002 : Variation interannuelle du bilan hydrique du lac Tanganyika (1932-1995) : changement dans la relation précipitation-excédent lacustre. *Hydrological Sciences – Journal - des Sciences Hydrologiques*, **47**(5), 781-796.

27/ BERGONZINI L., CAMBERLIN P., **RICHARD Y.**, 2001 : Variations interannuelles du bilan hydrologique du lac Tanganyika : les précipitations dans l'Afrique des Hautes-Terres sont-elles seules en cause? *Espaces Tropicaux*, 16, Les montagnes tropicales, identités, mutations, développement, Bordeaux, 145-159.

Axe 2

11/ DIOP M., HOUNDENOU C., **RICHARD Y.**, 1996 : Variabilité des dates de début et de fin de l'hivernage au Sahel : le cas du Sénégal. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, 9, 430-436.

28/ BIGOT S., P. CAMBERLIN, V. MORON, **Y. RICHARD** et P. ROUCOU, 1995 : Modes of rainfall variability in Tropical Africa and their stability through time. 21e Conference of the American Meteorological Society "Hurricanes and Tropical Meteorology", 24-28 April 1995, Miami, Florida, 448-449.

2/ BIGOT S., CAMBERLIN P., MORON V., **RICHARD Y.**, 1997 : Structures spatiales de la variabilité des précipitations en Afrique : une transition climatique à la fin des années 1960? *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences*, Paris, t. **324**, série II a, 181-188.

29/ BIGOT S., P. CAMBERLIN, V. MORON, **Y. RICHARD** et P. ROUCOU, 2000 : Stabilité de la variabilité pluviométrique en Afrique tropicale entre 1951 et 1988. In *Dynamique à long terme des écosystèmes forestiers intertropicaux*, Paris, UNESCO, 51-57.

5/ **RICHARD Y.**, FAUCHEREAU N., POCCARD I. ROUAULT M., TRZASKA S., 2001: XXth Century Droughts in Southern Africa Spatial and temporal variability, teleconnections with oceanic and atmospheric conditions. *Inter. J. of Climatology*, **21**, 873-885.

43/ TRZASKA S., **RICHARD Y.**, 2003 : Relations entre El Niño et précipitations en Afrique australe. Lettre Médias-France.

9/ 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.

Axe 3

25/ TRZASKA S., **RICHARD Y.**, ROUCOU P., 1998 : Les modèles de circulation générale de l'atmosphère - outils d'expérimentation en climatologie. Application à la variabilité liée à l'ENSO. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **11**, 291-299.

38/ 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.

8/ **RICHARD Y.**, TRZASKA S., ROUCOU P., ROUAULT M., 2000: Modification of the Southern African rainfall variability /El Niño Southern Oscillation relationship. *Climate Dynamics*, **16**, 886-895.

36/ TRZASKA S., FAUCHEREAU N., POCCARD I., CAMBERLIN P., **RICHARD Y.**, PHILIPPON N., 2002 : Stability of the relationship between regional rainfall in Africa and ENSO. AMS, San Diego, 48-49.

4/ FAUCHEREAU N., TRZASKA S., ROUAULT M., **RICHARD Y.**, 2003: Rainfall variability and changes in Southern Africa along the XXth Century in the Global Warming context. *Natural Hazards*, **29**, 139-154.

Chapitre 4

RSA : changements pluviométriques

L'augmentation anthropique des GES est le changement majeur à l'échelle centennale.

Actuellement, le forçage global exercé sur le système Terre Océan Atmosphère, susceptible d'avoir une incidence à l'échelle de quelques décennies, est la modification anthropique de la composition chimique de l'atmosphère. Cette modification, significative depuis 1850 environ, puis accélérée depuis 1945, se compose :

- D'une augmentation des GES (dioxyde de carbone, méthane, oxydes nitreux) ;
- De l'apparition de nouveaux GES (CFC et HCFC par exemple) ;
- D'une évolution de l'ozone variant selon l'altitude (augmentation dans la troposphère, diminution dans la stratosphère) ;
- D'une évolution des aérosols, en particulier des aérosols sulfatés, variant géographiquement (valeurs maximales atteintes en 1975 dans la triade, mais toujours croissantes dans certains pays en voie de développement).

Elle a pour conséquence une modification non négligeable, estimée à $+2,4 \text{ W/m}^2$ par rapport à 1850, du bilan radiatif planétaire (IPCC, 2001). Lui est associée une augmentation globale des températures de surface (continentales ou océaniques) de l'ordre de $0,6$ à $0,7^\circ\text{C}$.

Quels sont les impacts identifiés sur le climat d'Afrique australe ?

L'Afrique australe et les océans bordiers enregistrent des réchauffements de cet ordre. La pluviométrie est sensible aux variations des TSO et de la circulation atmosphérique planétaires, ce aux échelles interannuelles (chapitre 2) à décennales (chapitre 3). Elle ne peut pas, *a priori*, ne pas l'être au réchauffement global. Néanmoins, l'IPCC (2001), qui intègre les différentes recherches ayant été conduites, conclut pour l'Afrique australe que les modifications simulées pour le xxi^{e} siècle ne semblent ni très importantes ni très cohérentes.

Un programme pour développer ces recherches.

Au CRC, cette thématique a été initiée lors de l'hiver 1999-2000, après que cinq membres de l'équipe aient participé à l'école « Incertitudes et décisions : le cas du changement climatique », 17-22 octobre 1999, organisée par les départements SHS et SDU du CNRS. Modélisateurs du climat et économistes ont conclu que les géographes climatologues avaient une place importante à occuper entre leurs deux communautés. Développer une thématique nouvelle, surtout celle-ci, compte tenu des moyens nécessaires tant en personnel qualifié qu'en capacité de stockage et de calcul, ne pouvait relever d'une démarche individuelle. Ces éléments ont motivé le montage d'un projet ACI afin de regrouper des énergies et des compétences, de former une petite équipe, mais aussi de tenter d'obtenir les moyens supplémentaires indispensables. L'axe 1 traite des changements observés en Afrique du Sud au cours du xx^{e} siècle, l'axe 2 des changements simulés par les modèles pour le xxi^{e} siècle.

Axe 1 Quels changements au xx^e siècle ?

a/ Objectifs

La rupture de 1970, prémisses d'un changement ?

Les résultats analysés dans le troisième chapitre s'inscrivent dans le cadre de la variabilité décennale associée au réchauffement différentiel des océans des deux hémisphères. Dans l'hémisphère Sud, dominé par les surfaces océaniques, les émissions anthropiques d'aérosols soufrés sont globalement faibles, même si localement, comme en Afrique du sud, elles ne sont pas négligeables. Du fait du faible temps de résidence des d'aérosols soufrés dans la troposphère, ces aérosols émis essentiellement dans la triade n'ont pu avoir un rôle radiatif sensible que pour l'hémisphère Nord. Cet élément est privilégié pour expliquer le déphasage, entre 1940 et 1975, des évolutions de températures des deux hémisphères (réchauffement au Sud mais pas au Nord) (Boucher, 1997). Après la diminution des émissions enregistrée dans les pays de la triade, vers 1975, les températures ont à nouveau augmenté de manière plus homogène entre les deux hémisphères. Les résultats obtenus, c'est-à-dire plus forte extension et plus grande rigueur des sécheresses, ainsi que plus grande sensibilité à l'ENSO, seraient-ils des prémisses de changements à venir ? Par ailleurs, observe-t-on d'autres changements dans la pluviométrie au cours du xx^e siècle ?

Mettre en place une base de données importante et fiable.

Dans la littérature (Hulme, 1992, par exemple), aucun changement notoire n'est identifié. À ma connaissance, trois travaux seulement font état de changements, de surcroît très limités :

- Mason (1996) observe une baisse des volumes précipités au Lowveld sud-africain sur la période 1976-1993. Cette baisse ne fut que temporaire (cf chapitre 3) et s'inscrit par conséquent dans le cadre de la variabilité décennale ;
- Smakhtina (1998) note quelques modifications dans les caractères des pluies de la Province Est du Cap, où elles deviendraient moins fréquentes et plus intenses ;
- Mason *et al.* (1999), en comparant les précipitations quotidiennes des normales 1931-1960 et 1961-1990, signalent qu'environ 70% du territoire sud-africain connaît une augmentation de l'intensité des événements pluviométriques extrêmes. Mais leurs cartes montrent que bon nombre de stations connaissent une évolution opposée et qu'il n'y a pas de véritable cohérence spatiale. Les auteurs reconnaissent également que, en l'absence de métadonnées et de travail de reconstitution, des inhomogénéités subsistent dans le fichier analysé.

Pour rechercher tout éventuel changement ayant pu affecter la pluviométrie en Afrique australe, une recherche approfondie est donc nécessaire. Il est indispensable de mettre en œuvre des techniques d'homogénéisation des données, de travailler la pluviométrie sous un autre angle que celui des seuls volumes, de descendre à un pas de temps quotidien, d'avoir un réseau de postes pluviométriques suffisamment dense afin de privilégier la cohérence spatiale et ainsi de s'affranchir d'éventuels problèmes d'inhomogénéité subsistants et, enfin, d'avoir une profondeur temporelle permettant de distinguer le décennal du changement. Bref, élaborer une base de données contrôlée et complète.

b/ Résultat

Obtention d'un fichier original pour l'Afrique du Sud.

Dans le cadre du projet « Southern African Rainfall », les services météorologiques sud-africains (SAWS) nous ont transmis un fichier de pas de temps quotidien. Il comporte 527 postes pluviométriques, postes relativement bien répartis sur l'ensemble du territoire. La plus longue série est celle de Cape Town (ouverte en 1850).

Une analyse sur l'ensemble du pays.

Dans une première étude, nous avons sélectionné une période et un réseau tentant de concilier au mieux deux objectifs : profondeur temporelle et densité spatiale. 105 stations ont été retenues sur la période 1920-1999. Les premiers résultats concernent les volumes. Leur confrontation avec ceux obtenus lors d'études antérieures ou réalisées avec d'autres fichiers (en particulier de pas de temps mensuel) est effectuée. La cohérence des résultats avec les travaux antérieurs a été vérifiée : absence de changement dans les volumes en Afrique du Sud. Nous avons ensuite constitué de nouvelles variables nécessitant de disposer de données quotidiennes : nombre de jours de pluie, volume moyen précipité par jour de pluie et valeur du percentile 90. Sur ces trois variables, de multiples tendances ou ruptures ont été mises en évidence (21/ Richard *et al.*, 2002). Mais la faible cohérence spatiale des résultats obtenus, à l'image de ceux de Mason *et al.*, (1999), incitent à une grande prudence dans les conclusions et à la mise en œuvre de correctifs sur la matrice de données.

La qualité des données ou/et du fichier.

Toute série climatique peut être affectée par des modifications non liées au climat : changements de personnel, d'appareil de mesure, de localisation et d'environnement. Les séries analysées souffrent d'une cinquième et non négligeable source d'erreur : pour chacun des 527 postes, seuls les jours où des précipitations sont observées figurent dans le fichier du SAWS. Dans un pays où le nombre annuel de jours de pluies excède rarement cent, ce codage permet de réduire d'environ 75 % le volume. Mais comment interpréter l'absence de données : pas de pluies ou pas de mesure ? Ne disposant pas de métadonnées, les lacunes ont été considérées comme des jours secs, ce qui a conduit, potentiellement à :

- Minimiser le volume précipité : ce biais théorique n'apparaît pas dans les résultats (21/ Richard *et al.*, 2002) ;
- Minimiser le nombre de jours de pluie : un observateur ne relevant pas les données le dimanche ne modifie en rien le volume mais réduit le nombre de jours de pluie ;
- Maximiser le volume par jour de pluie ;
- Maximiser le percentile 90.

L'homogénéisation des séries.

Il s'avère donc indispensable de réaliser des tests d'homogénéité et d'appliquer des corrections, lorsque cela est possible, sinon de supprimer des séries. Parmi de nombreuses techniques détaillées dans la littérature (Wright, 1989 ; Young, 1993 ; Hanssen-Bauer et Forland, 1994 ; Lamarque et Jourdain, 1994 ; Alexandersson et Moberg, 1997 ; Slonosky *et al.*, 1999), il est apparu que celle développée par Olivier Mestre présente de nombreux avantages : pas de série de référence, absence d'hypothèse sur les dates des ruptures et nécessité d'avoir un réseau relativement dense. Elle comporte aussi des inconvénients :

concernant la pluviométrie, variable éminemment discrète, seuls les totaux annuels sont suffisamment cohérents dans l'espace pour être analysés. La technique repose essentiellement sur la règle bayésienne invariante optimale qui traite de la détection d'un nombre inconnu de ruptures et de points aberrants dans un modèle gaussien. La forme asymptotique de la règle bayésienne utilisée est une procédure de log-vraisemblance pénalisée, qui ne dépend ni des distributions *a priori* ni de la fonction de perte sous des hypothèses peu contraignantes et réalistes d'un point de vue climatologique (Mestre, 2000). Olivier Mestre a analysé les 105 séries sur lesquelles reposaient les premiers résultats (21/ Richard *et al.*, 2002). Bien que les distances soient trop grandes entre les stations pour que l'analyse soit appliquée dans les meilleures conditions, de nombreuses inhomogénéités ont été décelées.

Nous avons donc décidé de réduire le domaine d'étude. Sur la base de résultats publiés (Mason, 1996 ; Smakhtina, 1998 ; Mason *et al.*, 1999 et 21/ Richard *et al.*, 2002), deux régions sensibles ont été sélectionnées. A noter que ces régions ont changé de nom depuis la fin de l'apartheid (Gervais-Lambony, 1999) : la Province Est du Cap (Eastern Cape) et la Province du Nord (Northern Province), partie de l'ex-Transvaal comprenant le Lowveld (Fig. 29). Sur la Province Est du Cap 30 séries ont été sélectionnées (Cassagne, 2003). La même démarche a été effectuée pour la Province du Nord (Fig. 30) où 17 stations ont été analysées (Camus, 2003).

La méthode d'Olivier Mestre a permis de détecter des données aberrantes sur 93 totaux annuels des 30 séries pour la Province Est du Cap, soit moins de 4% (Cassagne, 2003) et 3% des 17 séries pour la Province du Nord (Camus, 2003). Les valeurs mensuelles des années dont les totaux étaient aberrants ont été supprimées. L'utilisation de régressions multiples élaborées pour chacun des 12 mois a permis de reconstituer environ 4 % des valeurs. Cette technique préserve la moyenne et la variance de chaque série, mais augmente la cohérence spatiale du réseau. Les valeurs restantes ont été remplacées par la moyenne mensuelle (1920-1999) de la série. Cette dernière technique n'altère ni la moyenne de la série, ni la cohérence du réseau, mais réduit la variance. Au total, les reconstitutions concernent moins de 5 % des valeurs des deux régions et ne posent pas de véritable problème lorsque l'objectif est d'étudier des changements sur un siècle partagés entre plusieurs stations proches géographiquement.

Une méthodologie développée pour la recherche de changements.

Pour les deux régions, la même méthodologie a été développée. À partir des données quotidiennes, quatre variables ont été constituées au pas de temps mensuel : volume total précipité, nombre de jours de pluie, volume moyen par jour de pluie et percentile 90. À noter que ce dernier ne peut être calculé sérieusement sur des séries mensuelles qui ne comportent que 28 à 31 jours et dont en moyenne 25 % d'entre eux seulement sont des jours de pluie. Nous avons donc défini les 12 percentiles 90 mensuels sur les seuls jours avec pluie, ceci sur des périodes mobiles de vingt ans. Cette technique masque quasi intégralement la variabilité interannuelle, partiellement la variabilité décennale, mais ne masque pas les tendances ou ruptures séculaires. Les valeurs des percentiles 90 ont également été calculées au pas de temps annuel sur la base des X jours de pluie sur les 365 à 366.

Les cinq matrices ainsi constituées ont été soumises à des ACP dont les composantes temporelles ont été soumises à deux tests non paramétriques (Pettitt, Spearman) de tendance. Ces tests ne permettent pas seulement la détection d'une tendance linéaire sur l'intégralité de la période. L'utilisation préalable d'une analyse multivariée permet de réduire le risque d'interpréter des évolutions particulières, souvent liées à celles des conditions de mesures, en termes de signaux climatiques. En revanche, une tendance ou une rupture significative

détectée sur une CP 2 ou 3 ne se traduira pas nécessairement par un phénomène significatif au niveau du poste pluviométrique. Aussi, lorsqu'un changement significatif est détecté sur une CP, les tests de Pettitt et de Spearman sont appliqués sur les séries initiales. Enfin, les analyses n'ont pas porté sur l'ensemble des mois pris un à un, mais sur des blocs saisonniers cohérents du point de vue de la variabilité interannuelle des volumes mensuels précipités. Ces blocs ont été définis à partir d'ACP étendues (Cf chapitre 1). Les deux études confirment, pour l'est de la Province du Cap (Cassagne, 2003), comme pour la Province du Nord (Camus, 2003), que le début de la saison des pluies, centré sur octobre, tend statistiquement à connaître des anomalies de signe opposé à celles du reste de la saison (depuis novembre à décembre jusqu'à avril ou mai selon la région).

Figure 29 : Carte générale de RSA avec nouvelle nomenclature.



Source : <http://www.un.org>

Figure 30 : RSA : Province du Nord.



<http://www.doorway.co.za/accom-np.asp>

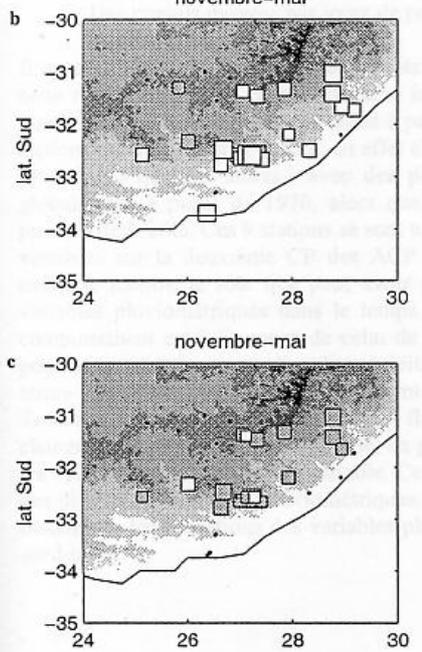
Les changements observés.

Dans la Province du Nord, aucun changement ou rupture significatif n'affecte tout ou partie importante des 17 stations étudiées (Camus, 2003). Il s'agit d'un résultat. Celui-ci ne confirme pas ceux de Mason (1996). Mais les espaces considérés ne se recoupent pas parfaitement. Ce résultat confirme, ce que nous indiquions dans l'axe 2 du troisième chapitre, à savoir que le fléchissement pluviométrique observé dans le Lowveld dans les années quatre-vingt et début quatre-vingt-dix n'était que transitoire.

L'est de la Province du Cap est le siège de plusieurs changements significatifs intervenus pour l'ensemble d'entre eux autour de l'année 1970 (Cassagne, 2003). Ils ne concernent pas les volumes mais la variabilité interannuelle ainsi que les répartitions saisonnière et quotidienne des précipitations. Ces changements concernent principalement la saison des pluies (novembre à mai), de manière moins nette son début (octobre) :

- La variabilité interannuelle des cumuls précipités a augmenté sur novembre-mai et le total annuel (mais diminué en octobre);
- Le nombre de jours de pluie a diminué ;
- Le volume moyen précipité par jour de pluie a augmenté ;
- La valeur du percentile 90 a augmenté, traduisant une contribution croissante des fortes pluies au volume total.

Figure 31 :
Tests de Spearman sur 30 séries
pluviométriques
(novembre-mai 1920-1999)
de la Province Est du Cap.



b : nombre de jours de pluie,
c : volume moyen par jour de pluie.
Carré gris : augmentation significative à 95 %,
carré blanc : diminution significative à 95%,
point noir : tendance non significative.

Les trois derniers points sont plus nets en novembre-mai qu'en octobre. Tous ces changements sont mis en évidence, et significatifs au regard du test de Pettitt, sur les CP2 des différentes analyses. Les CP1, non marquées par des ruptures, décrivent des variations partagées par les 30 stations de la région. Les CP2 permettent d'individualiser 21 des 30 stations. Il s'avère que ces 21 stations diffèrent des 9 autres par leur localisation. Elles sont situées le long de la côte ainsi que sur les versants sud et est des chaînes côtières, contrairement aux 9 autres qui, au-delà des lignes de crête, d'altitude au moins égale à 1500m, font partie du bassin versant supérieur de l'Orange. Comme les CP2 ne représentent qu'une partie modeste de la variance totale, entre 7 et 13 % selon la variable et la saison considérées, des tests de Spearman sont appliqués sur les séries stationnelles (Fig. 31). L'opposition 21/9 n'est pas parfaite, selon la variable et la saison quelques exceptions, voire contre-exemples, sont à noter. Mais les changements décrits par les CP2 sont confirmés et significatifs pour une majorité des 21 stations.

c/ Perspectives

La recherche d'autres changements pluviométriques est suspendue.

La suite logique serait d'appliquer les méthodes d'homogénéisation développées par Olivier Mestre (2000), et non pas simplement de détection comme nous l'avons fait jusqu'à maintenant. Néanmoins, se basant sur les quelques publications existantes (Mason, 1996 : Smakhtina, 1998 ; Mason *et al.*, 1999 et 21/ Richard *et al.*, 2002) et les deux mémoires de maîtrise (Camus, 2003 ; Cassagne, 2003), en en comparant les résultats obtenus avec des techniques similaires sur d'autres espaces méditerranéens à subtropicaux (Suppiah et Hennessy, 1998 ; Brunetti *et al.*, 2001 ; Douguédroit et Norrant, 2002 ; Norrant et Douguédroit, 2003), il apparaît que l'Afrique du Sud n'a connu que des changements mineurs au cours du xx^e siècle. En conséquence, dans les années à venir, il est peu probable que nous poursuivions ces pistes de recherches.

Comprendre les raisons de l'intensification des précipitations sur les bassins versants côtiers de la Province Est du Cap.

Les recherches conduites montrent que des changements significatifs, mais circonscrits aux bassins versants côtiers de la Province Est, sont intervenus vers 1970. Ce diagnostic étant fait, il convient maintenant d'en rechercher les facteurs. Ceux-ci peuvent être liés à une modification environnementale, de type changement majeur dans l'occupation du sol. Compte tenu de la date de la rupture, 1970, les données satellites ne peuvent pas être utilisées. Seules des études bibliographiques ou/et un travail d'enquête sur le terrain pourraient permettre d'explorer cette hypothèse. Les changements pluviométriques observés peuvent également être liés à une modification de la circulation synoptique. Le problème est que seule cette région semble affectée, alors que les séries nous renseignant sur la circulation synoptique sont situées à l'extérieur de cette région (radiosondages), ou trop courtes et de faible résolution spatiale (NCEP DOE AMIP II). Actuellement, la seule piste à emprunter est l'étude d'autres variables (température, vent, pression, ...) mesurées dans les quelques stations synoptiques de la région, pour y rechercher si des changements synchrones et compatibles avec ceux qui sont détectés sur les pluies s'y sont produits.

Axe 2 : Quels changements simule-t-on ?

Par définition, le climat de demain n'est pas observé. L'étudier implique de travailler sur des simulations. De même que l'observation nécessite toujours une étude critique préalable (représentativité spatiale des points de mesure, discontinuités liées aux conditions de mesures, ...), les conditions d'utilisation des simulations doivent être définies en fonction de leur fiabilité et des objectifs initiaux.

Pour simuler le climat du xxi^e siècle, il faut savoir prévoir le temps

La fiabilité des simulations est étroitement liée aux performances du MCGA utilisé pour les prévisions météorologiques qui dépendent :

- De la physique du modèle (paramétrisation des nuages et de certains processus) ;
- De la puissance de calcul des ordinateurs, auxquelles sont assujetties les résolutions horizontales et verticales des MCGA ;
- De la description des conditions initiales, de mieux en mieux assimilées en raison des progrès réalisés dans la transmission des données et la diversification des types de mesures (satellites par exemple), plus que dans la densité des points de mesures. Mais, par définition, elles resteront imparfaitement appréhendées.

et coupler les modèles atmosphériques avec d'autres modèles.

La fiabilité des simulations climatiques pour le xxi^e siècle dépend :

- De la puissance de calcul et des paramétrisations au même titre que pour les prévisions météorologiques ;
- Très peu des conditions initiales. Une manière de s'en affranchir est de travailler avec des jeux de simulations où les conditions initiales imposées varient ;
- Beaucoup des modèles d'émissions de GES et d'aérosols qui dépendent principalement de l'économie et de la politique ;
- Des modifications probables mais non connues avec exactitude des conditions aux limites principalement le rayonnement solaire, la TSO et les conditions de surface continentale ;
- Des couplages réalisés entre les MCGA et les modèles : océanique, de végétation, ... ;
- Des performances de ces modèles, autres qu'atmosphériques.

Conditions d'utilisation des simulations.

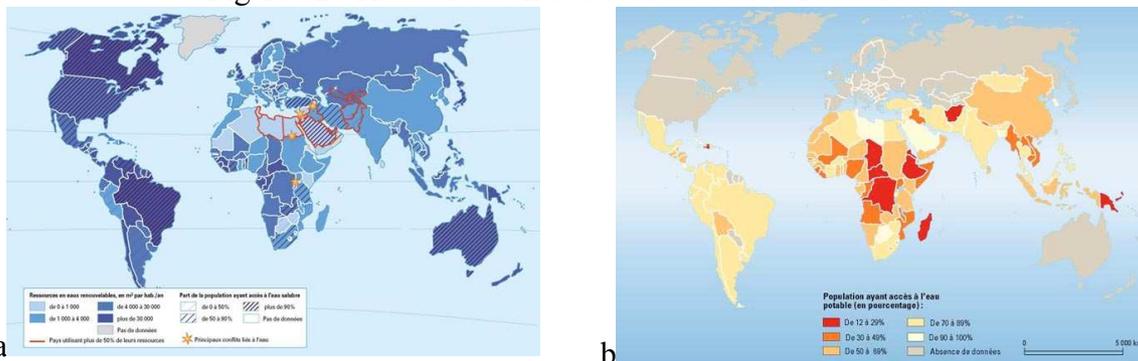
La pertinence de l'utilisation des sorties de MCG dépend de l'échelle spatiale. Plus elle est fine, moins les simulations sont fiables, d'où par exemple la nécessité pour les prévisionnistes d'adapter régionalement les sorties de modèles, et ce de manière empirique en fonction de leur connaissance terrain. Interpréter l'évolution d'une variable climatique pour le siècle à venir est d'autant plus délicat que l'on travaille sur un espace restreint où les modifications locales de l'environnement risquent de jouer un rôle prédominant. La pertinence de l'utilisation de simulations dépend également de la variable et de la période considérées. La pluviométrie, variable discrète, n'est pas la plus aisée à modéliser et les simulations ne sont d'aucun intérêt si l'on veut connaître les conditions météorologiques d'une période courte (de l'ordre de l'année ou moins). Elles n'ont de sens qu'au vu des *probabilités statistiques d'occurrence* ... (Gibbs, 1987) observées sur des périodes pluri décennales.

a/ Objectifs

Le contexte : la ressource en eau en RSA.

Bientôt peuplée de quarante millions d'habitants, la RSA doit maîtriser sa consommation d'eau. Les besoins par individu sont plus nombreux que dans la majorité des pays d'Afrique car l'agriculture irriguée y est développée, tandis que l'industrie et l'extraction minière sont également consommatrices. Enfin, le niveau de vie et l'urbanisation, sans équivalent sur ce continent, sont des variables corrélées à la consommation d'eau par habitant. À l'échelle de la planète, la RSA bénéficie de ressources en eau relativement modérées (Fig. 32a) mais rend accessible cette ressource à une forte proportion de sa population (Fig. 32b).

Figure 32 : Ressources en eau et accès à cette ressource.



Source : Cécile Marin, janvier 1998

Source : Cécile Marin et Sylvie Brunel, janvier 1998

L'évolution d'un élément clef de cette ressource en RSA : les précipitations.

Un premier objectif est d'ordre prospectif. Plus qu'ailleurs, en l'absence de fleuve exogène ou de ressources en eau fossiles d'importance, l'eau disponible dépend énormément de la pluie. Compte tenu du niveau de développement de ce pays, de son expérience en matière de gestion de l'eau (barrages, transferts entre bassins versants), l'eau excédentaire peut en partie être stockée. L'évolution du volume annuel précipité est donc fondamentale. Néanmoins, l'eau disponible dépend également de la répartition saisonnière et quotidienne des précipitations. Des variations de ces paramètres, via les répercussions sur la végétation et l'évaporation, induisent en effet des modifications des coefficients d'écoulement. En conséquence les études portent sur des simulations de précipitations quotidiennes. Comme la variabilité décennale des précipitations est marquée en Afrique du Sud, les analyses privilégient les évolutions séculaires (jusqu'à 2099) sur les comparatifs entre un état d'arrivée et un état de départ.

Désagréger régionalement l'information.

De manière générale, un changement climatique ne peut pas être abordé de manière statique. Changement climatique signifie aussi changements dans la géographie des climats. L'accent n'est pas toujours mis sur cet aspect dans les études basées sur les simulations pour le siècle à venir. Une des raisons est que la spatialisation des sorties de modèles est d'autant plus délicate que l'échelle est fine. La résolution spatiale des MCG, pour des questions de temps et de coût de calcul, est généralement grossière. Les MNT considérés sont simplistes. Néanmoins, dans un pays comme la RSA où plateaux et montagnes sont omniprésents, et où leur impact sur le climat est déterminant, l'approche régionale est nécessaire. Dans cette optique, une technique statistique de désagrégation régionale des précipitations issues de MCG (Von Storch *et al.*, 1993) est mise en œuvre.

Des pistes pour comprendre d'éventuels changements pluviométriques.

Des changements pluviométriques simulés nécessitent une interprétation. Identifier des éléments climatiques susceptibles d'expliquer ces changements permet de mieux comprendre les évolutions climatiques simulées mais également d'éprouver le niveau de confiance que l'on peut leur attribuer. Parmi les nombreuses variables climatiques produites par les MCG, nous privilégierons celles qui s'avèrent être les plus conformes à l'observation sur les périodes de recouvrement des deux types de données (fin du xx^e siècle).

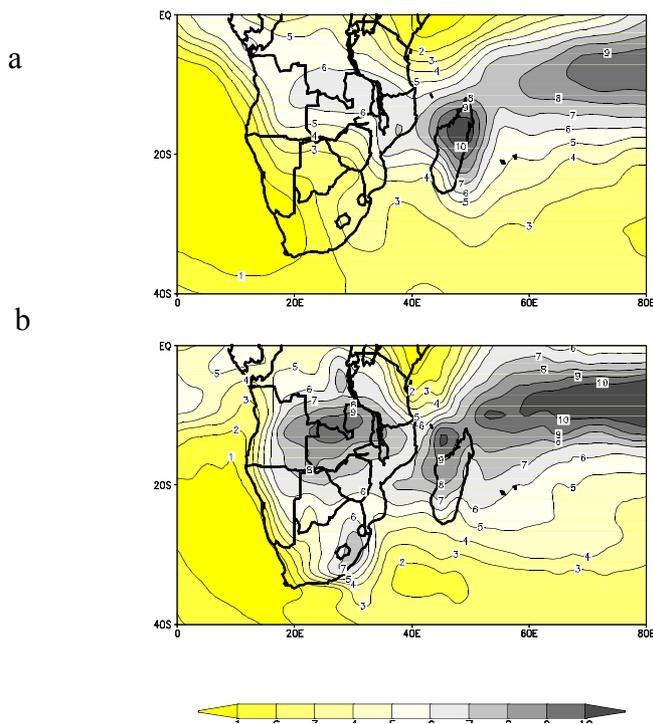
b/ Résultats

Une simulation de contrôle, et une seule du fait du faible rôle des conditions initiales sur 150 ans, a été réalisée avec des concentrations en GES constantes : celles de 1950. L'évolution des températures moyennes globales y est de $+0.47\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour 100 ans, biais raisonnable pour un MCG couplé au flux non ajusté. Une simulation de 150 ans est effectuée avec les concentrations observées de 1950 à 1999, suivies par les concentrations du scénario B2 jusqu'en 2100. L'écart entre les deux simulations est, dans le modèle, imputable à la modification de la composition chimique de l'atmosphère.

L'aptitude inégale du MCG à reproduire le climat observé.

Pour tester l'aptitude du MGC à reproduire le climat observé, nous analysons la simulation de contrôle des moyennes estivales (janvier-mars). La circulation générale et les principales téléconnexions (Camberlin *et al.*, 2003), ainsi que la circulation atmosphérique au-dessus de l'Afrique du Sud et des espaces continentaux et océaniques voisins, sont relativement bien reproduites. La comparaison entre les précipitations CMAP (Xie et Arkin, 1996) et ARPEGE/OPA permet de voir que la signature spatiale du champ pluviométrique est correcte, mais que les volumes précipités sont largement surestimés par le MCG (Fig. 33).

Figure 33 : Précipitations de janvier-mars.



en mm/jour

a) Données satellitaires CMAP (1979-2000)

b) Simulation de contrôle ARPEGE/OPA (1970-1999)

En cela ARPEGE/OPA ne se distingue pas des autres MCG : à l'échelle de l'Afrique australe, une comparaison de sorties de MCG atmosphériques (AMIP) montre qu'ils reproduisent bien la circulation et le rythme annuel des précipitations, mais tendent tous à surestimer les précipitations estivales (Joubert, 1997). Tel est par exemple le cas du modèle du Hadley Centre (Hudson et Jones, 2002). La faible résolution et la schématisation des processus de convection semblent à l'origine de ce biais quasi systématique des MCG sur l'Afrique australe (Joubert et Tyson, 1996). Les précipitations actuelles (simulation de contrôle) étant mal reproduites, nous n'accordons que très peu de confiance à celles obtenues avec la simulation B2 qui fait apparaître une réduction de 5 à 10%.

Le développement d'un modèle statistique de désagrégation régionale.

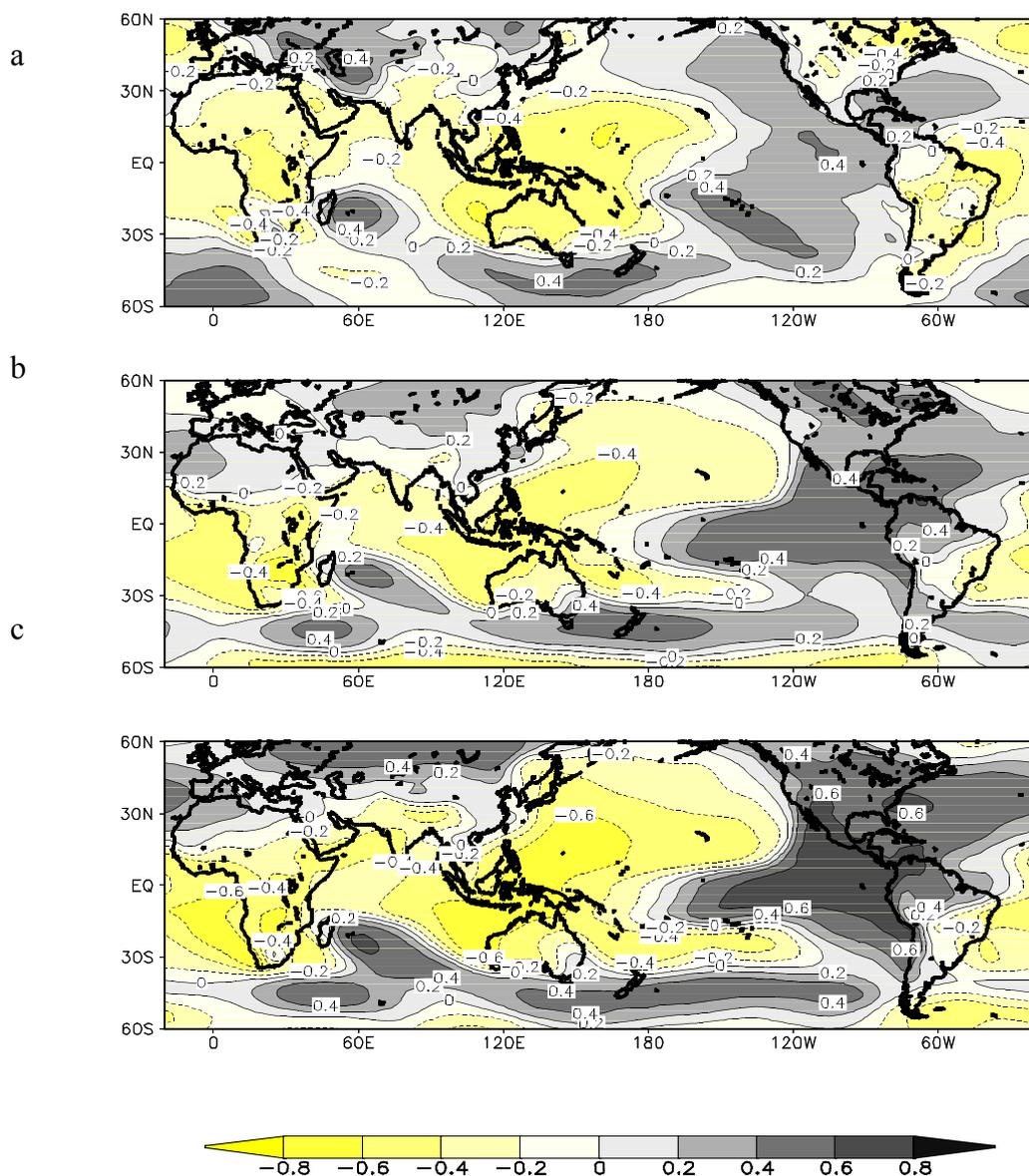
Les méthodes statistiques de désagrégation régionale supposent :

- L'existence de relations significatives entre des variables climatiques de grande échelle et des variables spécifiques à des sites (Carter, 2001). Cette relation n'est pas bien reproduite par les MCG qui ne permettent pas d'accéder à l'échelle fine (Von Storch *et al.*, 1993) ;
- Des caractéristiques atmosphériques de large échelle bien simulées par le MCG (Busioc *et al.*, 1999).

La TSO, le flux sortant grande longueur d'ondes (OLR) et les hauteurs de différents niveaux géopotentiels (surtout dans les basses couches) sont des variables corrélées avec les pluies. Elles caractérisent les conditions atmosphériques de large échelle et sont bien documentées. Comme dans les MCG couplés sans ajustement de flux l'évolution à long terme de la TSO comporte des biais [Royer *et al.*, 2002 pour ARPEGE/OPA] et que l'OLR est très sensible à la paramétrisation des nuages, nous choisissons les hauteurs géopotentiels pour appréhender la circulation de large échelle. Nous confrontons les Pressions au niveau de la Mer (PM) simulées par ARPEGE/OPA à celles issues des réanalyses du NCEP (Kalnay *et al.*, 1996), sachant que certains MCG peuvent surestimer leur variabilité au sud de l'Afrique du Sud (Hudson et Hewitson, 1997). Les réanalyses du NCEP comportent des biais systématiques sur l'Afrique (Poccard, 2000), aussi les employons-nous uniquement dans les conditions optimales : depuis 1968 et sur un champ fiable : la pression.

En Afrique du Sud, les relations entre précipitations et PM sont identifiées de longue date (Tyson, 1986). Dans un premier temps, nous vérifions que NCEP reproduit correctement les relations connues (Fig. 34a). L'indice pluviométrique « Afrique australe » (8/ Richard *et al.*, 2000, déjà cité) est corrélé négativement avec la PM sur le sous-continent (1968-1997). Le champ présente d'autres traits connus : une signature opposée à celle des ENSO (Nicholson, 1997) et un dipôle entre le sous-continent et l'océan Indien à l'est de Madagascar (Jury, 1992). Dans un second temps, nous vérifions que le MCG reproduit bien ces éléments (Fig. 34b). La configuration spatiale et l'intensité des corrélations entre l'indice pluviométrique et les PM ARPEGE/OPA sont similaires à celles obtenues avec NCEP aux latitudes tropicales et subtropicales. Hudson et Jones (2002) trouvent des résultats similaires en confrontant les expériences de contrôle du modèle du Hadley Centre et les réanalyses européennes (ECMWF). Ce n'est pas le cas aux latitudes moyennes. ARPEGE/OPA, à l'image d'autres MCG (Hudson et Hewitson, 1997), reproduit incorrectement la variabilité interannuelle des PM au sud de l'Afrique du Sud. Enfin, les corrélations calculées sur la période 2070-2099 ne présentent pas de changement notable (Fig. 34c). Pour le MCG, les structures spatiales de variabilité interannuelle des PM forcées par le scénario B2 vont globalement rester similaires à aujourd'hui. Elles resteraient également corrélées avec les précipitations d'Afrique australe, mais avec un renforcement du lien avec l'ENSO (Fig. 34c).

Figure 34. Corrélations entre un indice de précipitations “Afrique australe” et la pression au niveau de la mer



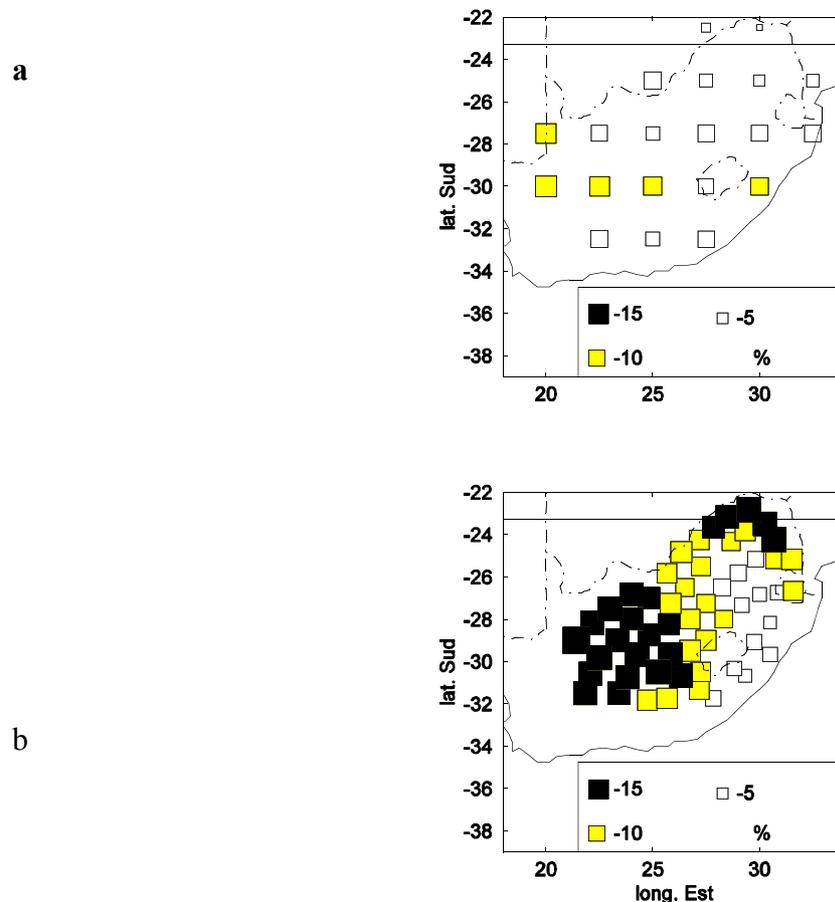
- a) NCEP (1970-1999)
- b) ARPEGE/OPA (1970-1999)
- c) ARPEGE OPA (2070-2099)

Évolution simulée des pluies par le modèle statistique de désagrégation régionale.

On calcule les différences entre les précipitations de 2070-2099 et celles de 1970-1999 (46/ Zhao *et al.*, 2003). Le MCG ARPEGE/OPA forcé par le scénario B2, avant désagrégation, simule une petite diminution des précipitations estivales (8.2% de la moyenne de janvier-mars calculée sur les points de grille situés en Afrique du Sud). L'ensemble du pays est concerné (Fig 35a).

Le modèle statistique de désagrégation régionale (45/ Richard *et al.*, 2003) conforte l'hypothèse d'une diminution du volume des pluies, en l'amplifiant (16% de la moyenne de janvier-mars calculées sur les 55 aires SAWS). Il en précise les contours : c'est le sud-ouest du plateau intérieur, région la plus sèche du plateau, qui serait le plus affecté. Les diminutions dépassant localement 15% (Fig 35b). A noter également que le centre du plateau, où les diminutions simulées sont supérieures à 10%, constitue une région sensible du point de vue hydrologique car correspond aux bassins supérieurs des principaux cours d'eau sud-africains (Orange, Vaal et Limpopo).

Figure 35. Précipitations sud-africaines pour 2070-2099 (MCG ARPEGE/OPA, scénario B2) en % par rapport aux précipitations de 1970-1999.



Blanc : diminution inférieure à 10%, jaune : diminution comprise entre 10 et 15%, noir : diminution supérieure à 15%

a) Estimation directe du MCG

b) Estimation par désagrégation régionale

Robustesse des résultats.

Nous avons répété la procédure de désagrégation régionale pour d'autres périodes de 30 ans. Par exemple, si l'on considère 2020-2049, nous trouvons un champ de précipitations évoluant de manière similaire (non montré) : une tendance généralisée à la diminution sur le domaine étudié, et ce tout particulièrement sur l'intérieur de la RSA. Pour 2020-2049, la diminution moyenne des précipitations est de 2.6% sur les estimations directes du MCG et de 7.4% pour

le modèle statistique de désagrégation régionale. Sur la Province du Nord, les sorties du MCG indiquent une très légère augmentation des pluies, tandis que le modèle de désagrégation régionale simule une diminution d'au moins 5%. Ceci est consistant avec les résultats sur la période 2070-2099 et signifie que les incertitudes sont plus fortes sur le nord-est de la RSA.

Enfin, les simulations présentées (Fig. 35) indiquent des évolutions dont les ordres de grandeur sont identiques à celles de l'IPCC (2001) ou de Hulme *et al.* (1996).

Hypothèse pour expliquer les différences entre les deux simulations.

Le MCG simule une diminution des pluies qui ne peut s'interpréter que comme la résultante d'un grand nombre de modifications. Deux d'entre-elles jouent un rôle fort : 1/ la température qui contrôle en partie l'évaporation, la convection et la condensation, 2/ la pression, qui contrôle les directions et vitesses des vents.

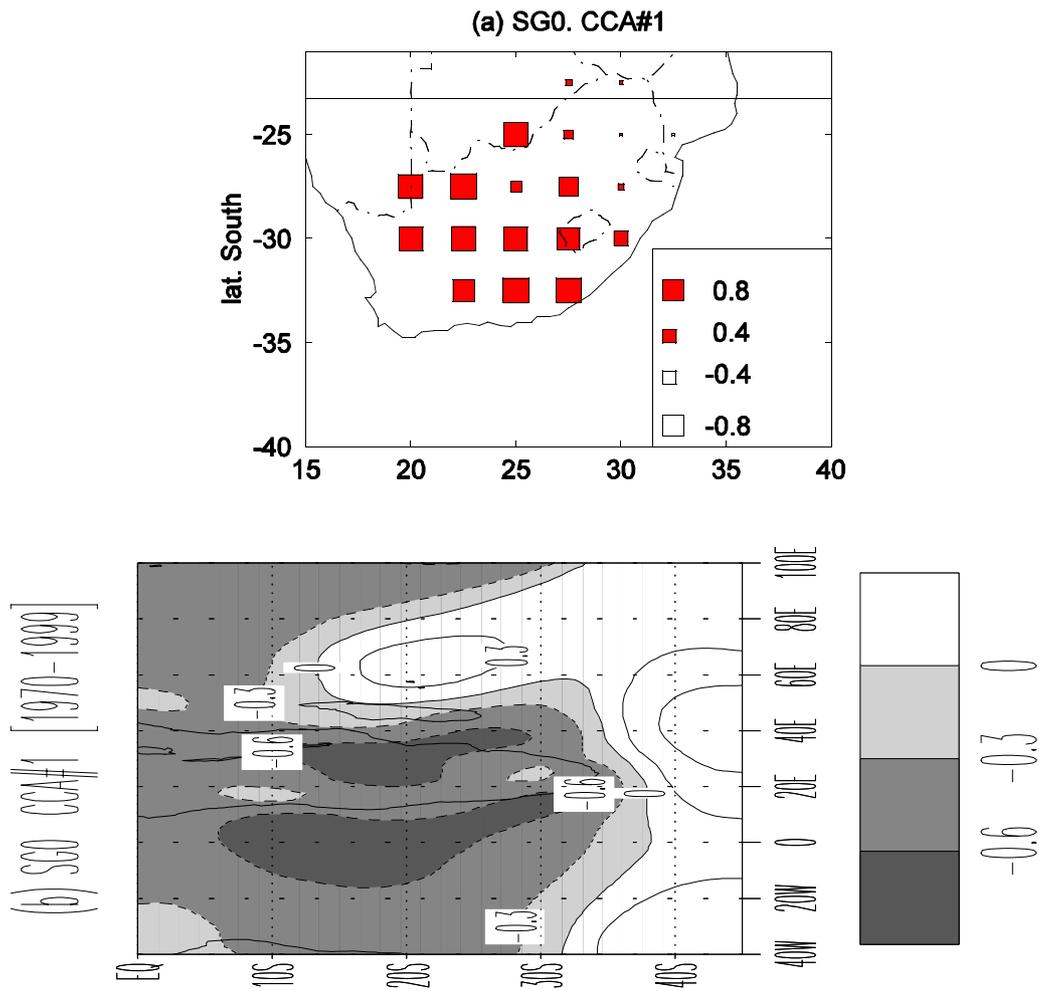
Les volumes précipités dépendent du contenu de l'atmosphère en vapeur d'eau. L'évaporation sur la région est largement surestimée (problème rencontré dans de nombreux MCG; e.g. Hudson et Jones, 2002), l'humidité spécifique est trop importante et les volumes précipités sont surestimés (Fig. 32). Comme les températures et l'évaporation (au moins sur l'océan) présentent une nette tendance à l'augmentation au cours du *xxi*^e siècle dans la simulation B2, il en résulte une augmentation de l'humidité spécifique. La diminution des précipitations n'est donc aucunement liée à une diminution de l'eau précipitable, mais à une dynamique devenant moins favorable à la pluviogénèse.

L'humidité spécifique dépend beaucoup des schémas de sol et de convection du modèle. Pour la construction du modèle statistique de désagrégation régionale seule la pression est considérée. Seule la dynamique atmosphérique, indirectement via la pression de surface, peut donc être incriminée pour expliquer la diminution des pluies. Le modèle de désagrégation régionale considère uniquement les effets dynamiques. Il ne prend pas en compte l'augmentation de l'eau précipitable. Ainsi la diminution des volumes précipités est-elle logiquement plus prononcée.

Hypothèse pour expliquer la diminution des précipitations.

Quelles modifications du champ de pression de surface sont susceptibles d'expliquer la diminution des volumes précipités en janvier-mars? La simulation présente pour le *xxi*^e siècle une augmentation marquée des PM sur le sous-continent. Cette augmentation s'accompagne d'une légère diminution au sud de 40°S et à l'est de Madagascar. Cette configuration spatiale est décrite en négatif par le premier mode de l'analyse canonique (Fig. 36b), mode couplé qui est associé à des anomalies pluviométriques principalement sur le centre et l'ouest du plateau sud-africain (Fig. 36a). Elle induit une forte anomalie de divergence sur le Kalahari (46/ Zhao *et al.*, 2003). Ceci entraîne une diminution de l'advection d'humidité depuis le sud-ouest de l'océan Indien vers le cœur de l'Afrique australe. Cette configuration d'anomalies n'est également pas sans rappeler celle observée et simulée lors des ENSO récents (8/ Richard *et al.*, 2000, déjà cité).

Figure 36. Première paire de l'analyse canonique des corrélations entre pression au niveau de la mer et précipitations dans la simulation B2 ARPEGE/OPA (1970-1999).



- a) Mode 1 sur les précipitations
- b) Mode 1 sur les pressions de surface

c/ Perspectives

À partir de ces premiers résultats, nous sommes maintenant en mesure de distinguer quelques pistes de recherches incontournables pour améliorer dans les années à venir, pour l'Afrique australe et la RSA mais pas de manière exclusive, la compréhension et la prévision du changement climatique pour le ^{xxi} siècle.

Analyser l'évolution des événements pluvieux extrêmes et de leur temps de retour.

Dans la continuité des recherches amorcées, Yan Zhao et moi travaillons plus spécifiquement la question des fortes précipitations quotidiennes. Leur évolution est examinée en termes de volumes mais également en termes de temps de retour. Un article est en cours de rédaction.

Étudier les flux d'humidité et leur évolution simulée pour le ^{xxi} siècle.

Nos travaux actuels concluent à une diminution des volumes précipités, diminution renforcée si l'on privilégie le rôle de la dynamique sur le contenu en eau, comme cela est observé dans le modèle statistique de désagrégation régionale. Pour mieux comprendre à quoi est due, dans le MCG ARPEGE/OPA, la réduction des précipitations, et malgré les réserves faites sur l'humidité spécifique, nous travaillons sur les flux d'humidité à 850 et 500 hPa. 850 hPa est indispensable pour caractériser le flux basses couches sous les tropiques. En Afrique australe, compte tenu de l'importance du relief, il est inutile de considérer les niveaux inférieurs. 500 hPa est bien adapté pour les latitudes tempérées. En Afrique du Sud les flux d'ouest sont d'efficaces agents de transport d'humidité en moyenne atmosphère. Nous calculons les différentes composantes (flux moyens et transitoires) aux quatre bornes d'une fenêtre correspondant à l'Afrique australe subtropicale. Pour la période actuelle (1979-2000), une comparaison entre les flux calculés sur NCEP/DOE AMIP II et ARPEGE/OPA est effectuée. L'évolution de ces flux au cours du ^{xxi} siècle est ensuite analysée. Un article est également en cours de rédaction.

Considérer d'autres simulations pour tester la robustesse des résultats.

La principale faiblesse du travail accompli réside dans la dépendance des résultats à une simulation, un scénario et un modèle. Pour tester la robustesse de nos résultats, il s'avère être indispensable de travailler avec d'autres simulations reposant sur :

- Des conditions initiales différentes, à partir desquelles nous calculerions moyennes et écarts-types. Des moyennes calculées sur plusieurs simulations effectuées à partir de MCG conduisent à des analyses plus robustes et peuvent être accompagnées d'écarts-types dont l'importance est inversement proportionnelle à la robustesse des résultats (Palmer et Anderson, 1994) ;
- Plusieurs scénarii. La seule utilisation de B2 est insuffisante. B1, A1 et A2 sont d'autres scénarii fréquemment utilisés dans la littérature. Le CERFACS développe un serveur de données où seront accessibles des données quotidiennes, voire tri horaires pour la dynamique ;
- Différents MCG. Les simulations du LMD mises à notre disposition étaient trop anciennes. Nous n'avons pu analyser de manière plus approfondie que la simulation ARPEGE B2. Mais Yan Zhao, en dépouillant des simulations du MCG allemand (ECHAM), a remarqué que les tendances relatives à la pluviométrie, pour l'Afrique australe, étaient de signe inverse par rapport à celles simulées par ARPEGE/OPA, preuve de la nécessité de ce point.

Chapitre 4 : conclusions principales

En Afrique du Sud, aucun changement pluviométrique majeur n'est observé depuis 1920. En particulier, les cumuls pluviométriques ne sont marqués ni par des tendances ni par des ruptures. Néanmoins, certaines régions ont connu des changements significatifs. Le cas le plus net est représenté par la Province Est du Cap où, depuis 1970, les événements pluvieux sont moins nombreux et plus intenses. La répartition des stations concernées, toutes situées sur les versants sud et est du Drakensberg, montre le rôle de la géographie.

Une simulation s'appuyant sur le scénario B2 de l'IPCC et effectuée avec le modèle couplé ARPEGE/OPA montre que les précipitations sud-africaine seraient amenées à diminuer au XXI^e siècle. Le développement d'un modèle statistique de désagrégation régionale s'appuyant sur la dynamique, élément le mieux simulé par le MCG, permet de renforcer l'hypothèse d'une diminution des pluies lors de la saison estivale. Cette diminution, d'autant plus forte que l'on se situe à l'intérieur de la RSA, est à mettre en relation avec une modification du champ de pression de surface qui présente des similarités avec les situations actuelles enregistrées lors de événements ENSO, à l'origine des principales sécheresses.

Publications

Axe 1

21/ **RICHARD Y.**, CAMBERLIN P., FAUCHEREAU N., POCCARD I., 2002 : Evolution des précipitations au xx^e siècle en Afrique du Sud. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **14**, 134-142.

Axe 2

42/ **RICHARD Y.**, MARCEL C., CAMBERLIN P. ZHAO Y., 2003: Précipitations en Afrique du Sud. Observations (1969-1998) et simulations (1969-2099). Actes du 16^{ème} Coll. *Ass. Int. Climatologie*, 10-14 septembre, Varsovie, Pologne. Sous presse.

46/ ZHAO Y, CAMBERLIN P, **RICHARD Y**, 2003: Validation of coupled GCM and projection of summer rainfall change over South Africa by the use of statistical downscaling method. *Climate Research*. Sous presse.

45/ **RICHARD Y.**, ZHAO Y., CAMBERLIN P., 2003: Précipitations en Afrique du Sud : changements climatiques simulés par le modèle de circulation générale ARPEGE/OPA et par désagrégation régionale. *Sécheresse*. Soumis.

Chapitre 5

Dobroudja et Bourgogne

Pourquoi des travaux non dédiés à l'Afrique ?

Le fait de travailler à Dijon favorise les collaborations avec des partenaires de la région souvent impliqués dans des recherches portant sur tout ou partie de la Bourgogne. Des demandes réitérées émanant de partenaires locaux (Météo France, réseaux de surveillance de la qualité de l'air, universitaires) ont motivé le développement de recherches fondamentales ou appliquées dédiées à la Bourgogne.

Fils conducteurs méthodologiques.

Ces études sont le fruit d'une appréhension du système climatique et d'une conception du travail de chercheur s'appuyant sur :

- Une perception non statique du climat et de l'environnement physique qui conduit à privilégier les études dynamiques, c'est-à-dire travailler sur la variabilité ou les changements plus que sur les permanences ;
- Une méthodologie mettant au centre de toute étude la question des données ;
- La prise en compte de l'Homme et des sociétés non pas seulement comme devant composer avec les atouts et contraintes que le climat et l'environnement leur imposent, mais comme parties prenantes du système, acteurs pouvant modifier ces éléments trop souvent qualifiés de « naturels » ;
- La priorité donnée aux collaborations et la réactivité par rapport à des demandes avec pour souci l'ouverture du monde de la recherche et de ses membres sur la société dans laquelle ils s'inscrivent.

Axe 1 : Précipitations en Dobroudja roumaine

Le contexte.

Cette étude est un exemple d'analyse multi-échelles contraintes par la géographie. L'approche méthodologique est généralisable ailleurs. Elle est issue d'un séjour de Ion-Florin Mihailescu, en 1994, au Centre d'Etudes Climatiques d'Aix-en-Provence, invité par Annick Douguédroit. Volontés de transposer des techniques et d'initier de nouvelles collaborations sous-tendent ce travail.

a) Objectifs

Expliquer les variations spatiales de la pluviométrie mensuelle et annuelle.

La Dobroudja roumaine est une région de taille modeste située entre Danube et Mer Noire, entre 44 et 45° Nord et 28 et 29° Est. Son relief est modéré. Il est constitué de plaines côtières et fluviales séparées par un plateau, Oltina, dont l'altitude oscille entre 100 et 200 mètres. Son climat continental est marqué par une relative aridité à laquelle est associée une végétation climacique : la steppe. Néanmoins la variabilité spatiale des précipitations est considérable, qu'il s'agisse du total annuel précipité allant en moyenne de 350 à 550 mm, ou du régime saisonnier. Notre hypothèse est que ces différences spatiales non négligeables sont en partie dues à la géographie de la région. L'objectif est de quantifier l'influence de deux de ses composantes : l'altitude et la distance à la mer. A noter que ceci pourrait tout à fait être effectué sur une région d'Afrique du Sud.

b) Résultats

Vingt-neuf séries pluviométriques, dont huit issues de stations météorologiques, ont été étudiées au pas de temps mensuel sur la période 1964-1992 (6/ Richard *et al.*, 2000).

Un régime continental original et une variante « méditerranéenne ».

L'analyse confirme que le régime continental caractérisé par des maxima de fin de printemps (mai et juin) et des minima d'hiver (janvier à mars) prédomine (Fig. 37a). La particularité de ce régime continental, déjà observée dans d'autres régions bordant la Mer Noire, sud de la Bulgarie, Ukraine et sud de la Russie (Douguédroit et Zimina, 1987 ; Planchon, 1997), est constituée par la faiblesse des pluies estivales. L'analyse montre également la spécificité du littoral, surtout pour sa partie sud, où les précipitations automnales sont fortes (Fig. 37b). Ce caractère est généralement rencontré dans les climats de type méditerranéen, voire océanique.

Une géographie des pluies variable selon la saison.

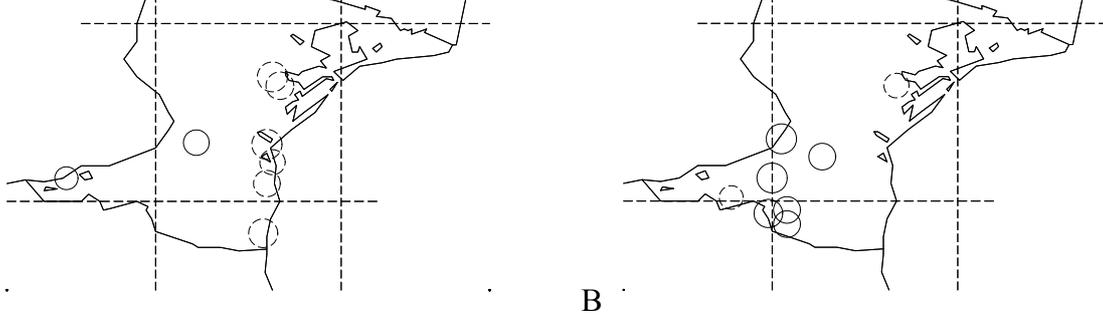
Une moyenne pluviométrique régionale a été calculée pour chacune des 12 moyennes mensuelles des 29 séries. Les écarts à cette moyenne, exprimés en pourcentages, permettent après cartographie, de spatialiser pour chacun des mois les secteurs où les particularismes locaux sont forts. Au mois de mai, le littoral se distingue par sa faible pluviosité, inférieure à 80 % de la moyenne des 29 stations (Fig. 38a).

Figure 37 : ACP sur les précipitations moyennes mensuelles de 29 stations de Dobroudja.



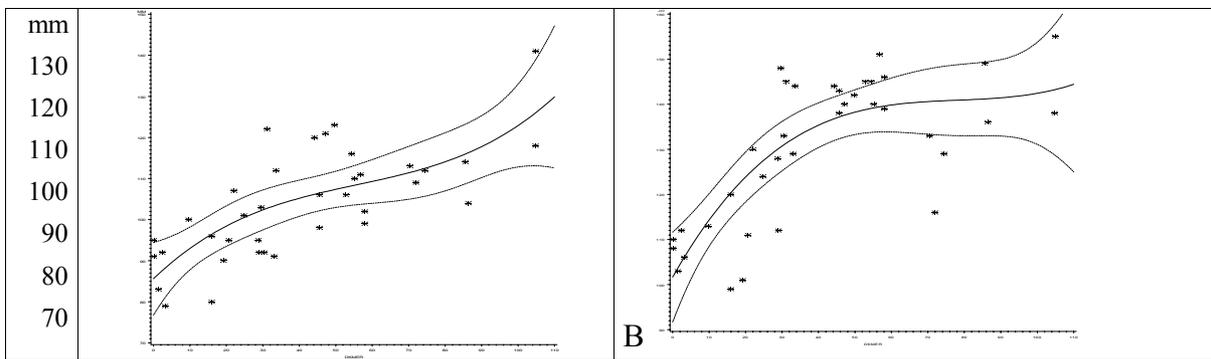
A : CP1, b : CP2. Cercle en trait plein : corrélation > 0, cercle en pointillés : corrélation < 0.

Figure 38 : Ecarts pluviométriques par rapport à l'indice régional.



a : mai, b : août. Cercle en trait plein : > 120 % par rapport à la moyenne régionale, cercle en pointillés : < 80 % par rapport à la moyenne régionale.

Figure 39 : Régressions cubiques entre les précipitations et la distance à la mer.



0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Km 0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100 Km

a : Précipitations de mars-mai = $85.61 + 0.85dk - 0.012dk^2 + 0.00007dk^3 \pm SE$
 b : Précipitations de juin-août = $101.67 + 1.44dk - 0.018dk^2 + 0.000077dk^3 \pm SE$
 où dk est la distance kilométrique minimale à la Mer Noire.

Au mois d'août, ce sont les stations de l'intérieur, situées dans la plaine danubienne, qui présentent le plus fort particularisme avec des pluies supérieures à 120 % par rapport à la moyenne régionale (Fig. 38b). Pour mieux comprendre les variations spatiales de la pluviométrie de chacun des mois, nous avons calculé les corrélations entre précipitations d'une part, et l'altitude et la distance à la mer d'autre part. Il s'avère que la distance à la mer est le premier élément expliquant les variations spatiales des abats pluviométriques (42 % de variance expliquée pour les totaux annuels par exemple). Son rôle est significatif de février à septembre et maximal en mai-juin, saison où le contraste thermique entre les températures continentales et marines est maximal.

Le rôle prépondérant des cellules de brises de mer au printemps et en été.

L'hypothèse est que les cellules de brises de mer qui se mettent en place les journées printanières et estivales ensoleillées inhibent ou limitent la convection sur le littoral, tout en la favorisant au niveau du front de brise, à quelques dizaines de kilomètres dans l'intérieur des terres. Pour tester cette hypothèse, nous avons réalisé des ajustements par régressions cubiques sur des nuages de points croisant précipitations et distances à la mer (Fig. 39). En effet, les nuages ne correspondent pas à une relation linéaire. Il existe un seuil au-delà duquel les précipitations n'augmentent plus. Ce seuil est plus marqué en été (Fig. 39b) qu'au printemps (Fig. 39a). Entre juin et août, ce seuil intervient à environ 30 Km de la côte. Cette valeur est compatible avec la littérature sur la pénétration des fronts de brise en climat tempéré (Abbs et Physick, 1992), comme avec la connaissance du climat de la région au sein de laquelle on observe, à 30-35 Km dans l'intérieur, des valeurs maximales de convection thermique et d'occurrence d'orages (Mihalescu, 1986).

c) Perspectives

Ce travail, même si une convention a été signée entre le CRC de l'Université de Bourgogne et l'Université Ovidius de Constanta, est issu d'une collaboration ponctuelle. Celle-ci aurait pu être poursuivie d'autant plus aisément que les soutiens financiers européens encouragent les collaborations avec l'Europe de l'Est. Pour ne pas trop se disperser, tant personnellement que pour l'équipe, je n'ai pas souhaité le faire. Il n'y a donc pas de perspective directe donnée à cette recherche.

Axe 2 : Qualité de l'air en Bourgogne

Le contexte national.

1996, avec la Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie (LAURE) du Ministre de l'Environnement de l'époque, Corinne Lepage, est une date clef en ce qui concerne la surveillance de la qualité de l'air en France. Avant cette date, les collectivités territoriales étaient libres de mettre en place, ou non, des réseaux de surveillance de la qualité de l'air. La plupart des grandes agglomérations en étaient dotées, pas toutes, Toulon par exemple.

Le contexte dijonnais.

À Dijon, le REseau de SURveillance Pour l'Agglomération DIjonnaise (RESUPADI) fonctionnait depuis 1979, mais sans grande autonomie et sans Directeur. Les prérogatives de la loi sur l'air ont conféré aux réseaux des missions plus importantes. À Dijon, Bruno Siéja fut le premier directeur du RESUPADI en 1997. Le développement de recherches en collaboration avec des universitaires est devenu un objectif.

L'attente des étudiants.

Les enseignants chercheurs du département de géographie de l'Université de Bourgogne effectuaient l'essentiel de leurs recherches en climatologie tropicale. Les étudiants de géographie désireux de se préparer à intégrer le monde du travail dans le domaine de l'environnement souhaitent souvent travailler en recherche appliquée, et ce sur la Bourgogne ou, tout au moins en France. Développer des recherches sur la qualité de l'air en Bourgogne répond à une forte demande de leur part.

Un pont entre des équipes de recherches.

Développer des recherches sur la qualité de l'air est un moyen de travailler en collaboration étroite avec des collègues de géographie humaine du laboratoire THEoriser et Modéliser pour Aménager (THEMA), dont l'un des axes majeurs est l'étude des transports en milieu urbain et périurbain. C'était aussi le moyen de collaborer avec Jean-Pierre Chabin, du CRC et non tropicaliste, et les collègues du Centre Départemental de la Côte d'Or de Météo France.

a) Objectifs

Faire l'état des lieux.

En l'absence de toute publication scientifique traitant de la qualité de l'air en Bourgogne, le premier objectif fut de faire un état des lieux. Quels polluants sont mesurés ? Où le sont-ils ? Depuis quand les données existent-elles ou sont sur support informatique ? Telles étaient en 1997 les premières questions pour identifier les polluants affectant le plus la qualité de l'air en Bourgogne. L'objectif était de repérer les secteurs à risque, et de préciser les périodes de l'année, les jours de la semaine et les heures les plus concernés.

Mieux comprendre les facteurs de variations du polluant principal : l'ozone.

L'étude de l'ozone, rapidement identifié comme étant parmi les polluants mesurés en Bourgogne le plus sujet à atteindre des valeurs dépassant les normes de recommandation, a constitué une seconde étape. Où et quand les concentrations sont-elles maximales ? Dans quelle mesure les conditions météorologiques, telles que l'on peut les appréhender, contrôlent-elles les variations spatiales et temporelles des concentrations en ozone mesurées par les stations fixes des réseaux ?

Prévoir les concentrations pour le lendemain.

Les premiers diagnostics pour comprendre les distributions spatiales et temporelles de l'ozone étant établis, l'étape suivante consiste en la prévision pour le lendemain des concentrations dudit gaz. Quels types de modèles développer de manière à ce qu'ils combinent performances et conditions d'utilisation compatibles avec les moyens, tant financier qu'en personnel, des réseaux ? Quelles données prendre en compte pour améliorer les performances de prévision ? Comment expliquer les inévitables erreurs ?

Spatialisation et agrégation d'échelles.

Les réseaux ont considérablement développé le nombre de stations fixes de mesures dans les années qui suivirent la LAURE. L'objectif fixé par la loi était qu'en 2000 tout le territoire soit équipé. *De facto* seules les principales aires urbaines sont relativement bien dotées. Se pose donc un problème qui n'est pas propre à la Bourgogne et à la qualité de l'air, mais inhérent à toute recherche en climatologie où les mesures sont ponctuelles alors que nos besoins d'informations concernent des aires représentant l'intégralité de l'espace. Quels outils utiliser pour interpoler des données ponctuelles de qualité de l'air ? Quelles variables intégrer pour dépasser la simple interpolation géostatistique ?

b) Résultats

Acidité forte et fumées noires : les mesures les plus anciennes à Dijon.

Créé en 1979, le RESUPADI ne dispose d'un véritable réseau de stations fixes (7 pour l'agglomération dijonnaise) que depuis 1990. Deux mesures sont effectuées dans l'ensemble des stations : l'acidité forte et les fumées noires. Des polluants comme le monoxyde de carbone (CO), le dioxyde de soufre (SO₂), les monoxydes et dioxydes d'azote (NO et NO₂) ainsi que l'ozone (O₃) ne sont mesurés que dans quelques stations ou/et plus récemment. En accord avec le RESUPADI, nous avons décidé de retenir ces deux mesures qui ne correspondent pas à deux molécules, mais qui regroupent divers polluants, pour dresser un premier état des lieux de la qualité de l'air dans l'agglomération dijonnaise (35/ Viro *et al.* 1998 ; 26/ Viro *et al.*, 1998).

La qualité de l'air en hiver s'est améliorée vers 1993.

L'acidité forte et les fumées noires, considérées à un pas de temps mensuel, présentent une nette cyclicité. Les valeurs maximales sont hivernales. Les valeurs minimales sont estivales. Ce rythme monomodal est à mettre en relation avec celui des émissions, sachant que le chauffage urbain via la combustion d'énergies fossiles (charbon et pétrole) est une source importante de polluants, plus déterminants pour les mesures d'acidité forte que pour celles des fumées noires. Des tests de Pettitt sur les séries désaisonnalisées (standardisées par mois) laissent apparaître une diminution significative de l'acidité forte et des fumées noires. Cette diminution prend la forme d'une rupture de stationnarité que l'on peut dater : 1993. Nous constatons que cette date correspond à la fois à des modifications de système de chauffage concernant plusieurs sites importants sur l'agglomération, à la mise en place du deuxième Plan de Déplacement Urbain (PDU) et à l'introduction des pots catalytiques sur les véhicules neufs (26/ Viro *et al.*, 1998). Cette étude démontre ainsi à l'échelle locale l'impact des progrès technologiques et d'une politique volontariste pour améliorer la qualité de l'air.

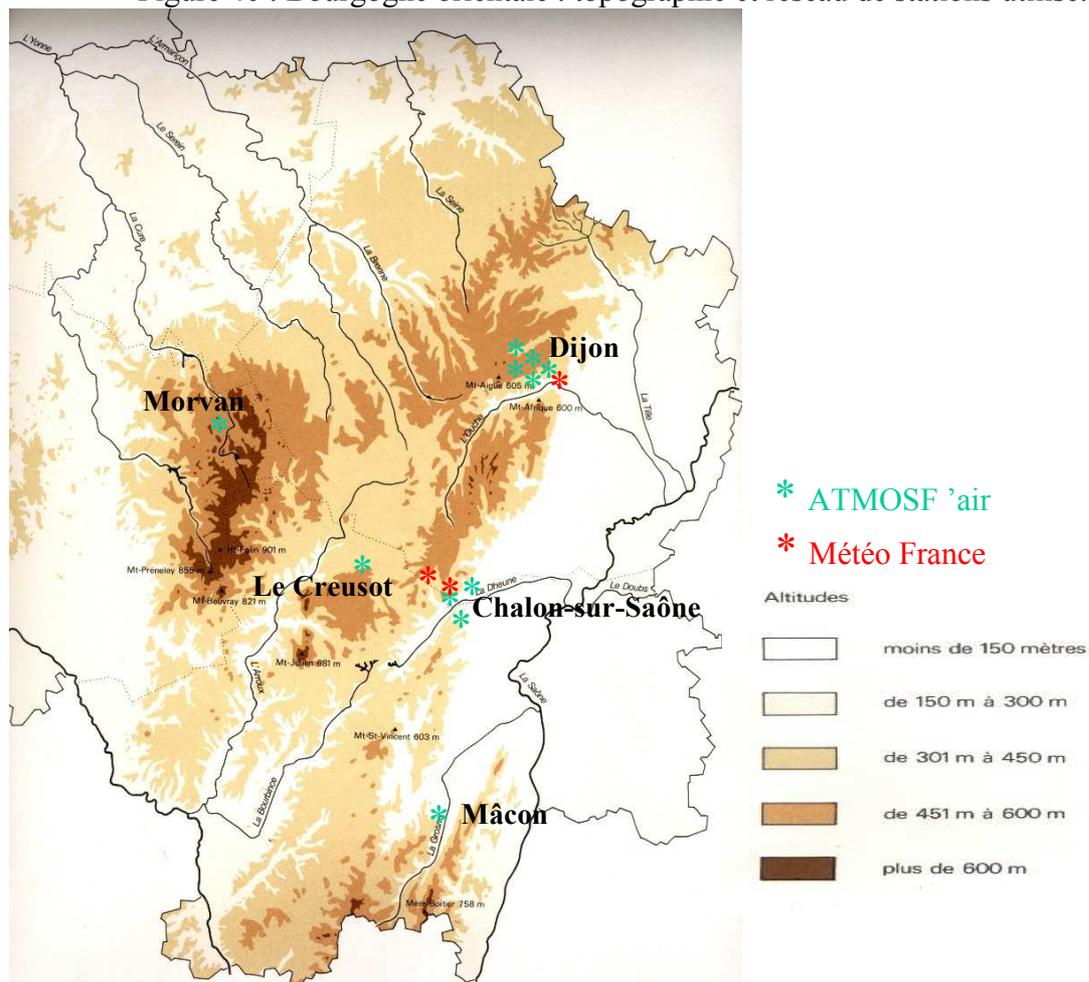
La pollution hivernale est associée aux conditions anticycloniques ou faiblement dispersives.

Pour comprendre les fluctuations d'une année sur l'autre des concentrations, d'autres pistes doivent être empruntées. Les conditions météorologiques, plus que les variations des émissions liées à l'activité économique, sont *a priori* à l'origine des variations de concentrations. Elles ont une influence sur les émissions (renforcement des besoins de chauffage par temps froid) et sur les conditions de dispersion (verticale ou horizontale). Nous avons considéré les conditions météorologiques à deux échelles : locale et synoptique. Pour les premières, nous intégrons les données mesurées par Météo France Côte d'Or sur l'agglomération dijonnaise. Pour les secondes, nous utilisons la classification des types de configurations météorologiques sur l'Europe de l'Ouest de Météo France (Bénichou, 1995). Les analyses montrent qu'à Dijon les conditions anticycloniques hivernales favorisent l'acidité forte. Renforcement des émissions et faible dispersion sont les hypothèses retenues. Secondairement, des fumées noires peuvent être importantes en dehors de ces périodes froides, par vent et précipitations faibles et léger flux de sud, type synoptique favorisant les inversions thermiques et les brouillards (26/ Viro *et al.*, 1998).

La pollution principale est désormais estivale et concerne l’ozone.

Depuis 1997, les mesures se sont diversifiées et sont effectuées dans un nombre croissant de postes (Fig. 40). Il est désormais possible de travailler sur 12 stations, avec un faible historique, sur les deux principales agglomérations de la région : Dijon et Chalon-sur-Saône, plus Mâcon et Le Creusot ainsi que deux stations rurales situées dans le Morvan et les Vosges. Les mesures de fumées noires et d’acidité forte, grâce à l’acquisition de capteurs plus perfectionnés par les deux réseaux régionaux maintenant appelés ATMOSF’air (Bourgogne Centre Nord et Bourgogne Sud), ont laissé place à celles de molécules et de particules fines. Parmi celles-ci, en Bourgogne, l’ozone est la plus susceptible de dépasser les seuils d’information fixés. La pollution à l’ozone relève de mécanismes complexes, puisque l’ozone est un polluant secondaire dont le temps moyen de résidence dans l’atmosphère est de l’ordre d’une semaine. L’échelle régionale doit ainsi être privilégiée et la saison estivale devient celle de toutes les préoccupations.

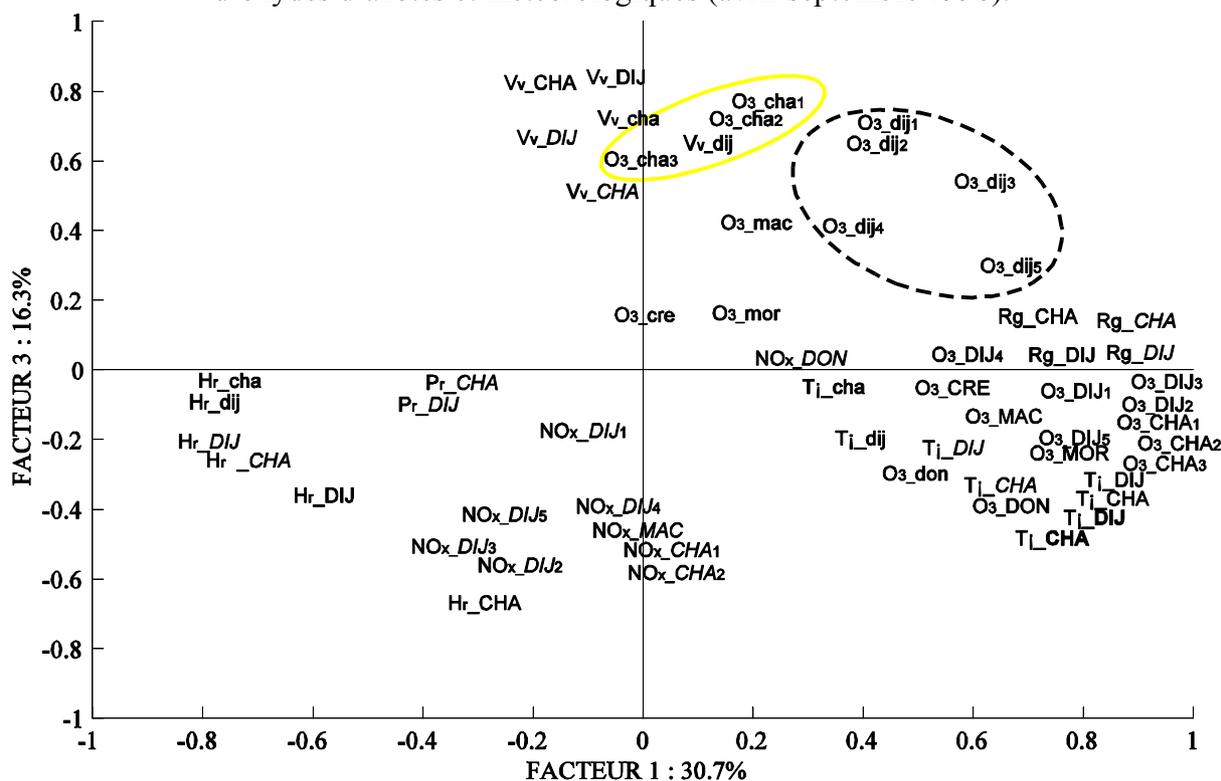
Figure 40 : Bourgogne orientale : topographie et réseau de stations utilisé.



Le jour, les concentrations d'ozone sont contrôlées par la circulation synoptique.

Les concentrations horaires d'ozone ont été étudiées pour les étés (avril-septembre) 1997-1998 (22/ Richard *et al.*, 2000 ; 22/ Richard *et al.*, 2000). Elles ont été croisées avec les données disponibles de précurseurs (oxydes d'azotes) ainsi qu'avec les variables météorologiques relevées dans ou près des deux agglomérations par Météo France. Les analyses montrent que la part de variance commune à l'ensemble des stations des deux réseaux, qu'elles soient situées en centre-ville ou en zone périurbaine, à Dijon ou à Chalon-sur-Saône, est importante (Fig. 41). Températures élevées et fort ensoleillement sont partout associés aux fortes concentrations. En Bourgogne, les épisodes d'ozone avec leurs pics diurnes sont, comme dans d'autres régions (Bavais et Roussel, 1992 ; Papais *et al.*, 1998), des phénomènes d'échelle au minimum régionale, contrôlés par la circulation synoptique.

Figure 41 : Premier plan factoriel d'une ACP portant sur des valeurs quotidiennes d'ozone, d'oxydes d'azotes et météorologiques (avril-septembre 1998).



PREFIXES :

- O₃ : ozone
- NO_x : Oxydes d'azote
- T_j : Température
- R_g : rayonnement
- Hr : Humidité relative
- Pr : Précipitations
- Vv : vitesse du vent

ACRONYMES :

- dij : Dijon
- cha : Chalon-sur-Saône
- mac : Macon
- Cre : Le Creusot
- mor : Morvan
- don : Donon

STYLE :

- minuscules : mini journalier
- majuscules : maxi journalier
- obliques : moyenne journalière
- gras : amplitude diurne

SUFFIXES :

- dij1 ^ dij5 : centre ^ péri-urbain
- cha1 ^ cha3 : centre ^ banlieue

CONTOURS :

- O3_cha1 : minima nocturnes d'ozone ^ Chalon
- O3_dij1 : minima nocturnes d'ozone ^ Dijon

La nuit, les conditions locales jouent un rôle renforcé.

Les concentrations nocturnes d'ozone sont plus faibles que celles qui sont enregistrées le jour. En France, les seuils réglementaires ne sont jamais dépassés. Est-ce une raison pour ne pas les étudier ? Du point de vue de l'impact sur la santé, faut-il se focaliser sur des valeurs maximales temporaires ou sur des expositions prolongées ? Par analogie, la canicule du mois d'août 2003 a autant tué du fait de températures nocturnes élevées qu'à cause des seules températures diurnes. L'analyse montre des différences entre les deux agglomérations, différences associées à la vitesse du vent. Chalon-sur-Saône, qui connaît statistiquement des nuits moins ventées que la capitale régionale, voit ses concentrations d'ozone nocturne atteindre des valeurs plus basses. Dans les centres-villes, la destruction nocturne de l'ozone par le NO, qui ne se transforme pas vite en NO₂, est un phénomène généralisé. En l'absence de vent, les centres-villes connaissent des valeurs d'ozone très faibles. En revanche, une légère brise advecte sur la ville de l'air en provenance de zones rurales où les faibles concentrations en NO n'ont pas conduit à une destruction aussi marquée de l'ozone. Tel est souvent le cas de Dijon où les brises de pente sont plus fréquentes (Marceau *et al.*, 1994).

Prévoir l'ozone dans les stations ATMOSF'air avec des méthodes simples.

Avant de se lancer dans la prévision à proprement parler, nous avons voulu vérifier que des prévisions de qualité acceptable pouvaient être réalisées avec les moyens qui sont les nôtres en Bourgogne. Dans la région parisienne ou en Alsace, des modèles eulériens de prévision sont développés. Ils sont le fruit de collaborations entre des réseaux riches, tant en personnel qu'en moyens financiers (AIRPARIF et ASPA), et des équipes de chercheurs au sein desquelles plusieurs personnes collaborent (équipe Vautard au LMD par exemple). En Bourgogne, le nombre de personnes, tous partenaires compris, pouvant travailler au moins partiellement sur la question de la prévision de la qualité de l'air se compte sur les doigts d'une main.

Nous avons donc opté pour le développement de modèles statistiques simples, robustes, faciles d'usage et parmi les plus utilisés pour la prévision quotidienne des valeurs maximales d'ozone (Robeson et Steyn, 1990). Parmi les outils statistiques susceptibles de correspondre à ces critères, nous avons retenu les régressions linéaires multiples, technique la plus utilisée, ce qui favorise les comparaisons. Nous avons éliminé les réseaux de neurones (nécessitant un plus fort coût d'investissement), et les analyses discriminantes (à la demande d'ATMOSF'air). Les régressions linéaires multiples fournissent des résultats conformes à l'attente d'ATMOSF'air : une valeur précise assortie d'une marge d'erreur, avec le rôle de chacun des 5 prédicteurs retenus dans l'élaboration du modèle (Vergèz, 1999) pour interprétations et tests. Ces modèles sont généralement développés pour un usage local (Ghattas, 1998).

Pour tester la qualité des prévisions il faut les confronter à l'observation. Pour cette raison, les prévisions portent sur les stations d'ATMOSF'air. Bien entendu, chaque station est située dans un environnement particulier qui fait que les valeurs ne sont pas aisément transposables. Mais ce problème n'est pas spécifique aux prévisions, il concerne l'ensemble des mesures effectuées par ATMOSF'air. Dans un premier temps, les prévisions concernent les valeurs maximales pour le lendemain. Elles sont conçues pour pouvoir être réalisées chaque jour avant 17h, heure de fermeture des bureaux d'ATMOSF'air et heure à laquelle les prévisions doivent être communiquées à la préfecture.

Des résultats encourageants en prévisibilité.

La prévisibilité a été testée sur 4 stations dijonnaises et 3 stations chalonnaises sur l'été 1999 (11/ Houzé *et al.*, 2000 ; 12/ Houzé *et al.*, 2000). On entend par prévisibilité prévision dans une situation idéalisée, celle où l'on connaît avec exactitude les conditions météorologiques du lendemain. L'erreur est ici imputable aux seules prévisions d'ozone. Nous avons considéré la qualité de l'air du jour au travers des précurseurs et de l'ozone mesurés dans les stations ATMOSF'air, ainsi que la météorologie du lendemain observée dans les stations Météo France. Pour prendre en compte l'ozone de fond, nous avons intégré dans les prédicteurs les prévisions d'ozone effectuées par le LMD (Vautard *et al.*, 2000).

Les modèles calculent pour chaque station du réseau ATMOSF'air une valeur d'ozone que l'on compare à la valeur maximale observée entre 10 et 18h t.u. Selon les stations, les performances oscillent entre 0.47 et 0.72 si l'on considère les coefficients de détermination (12/ Houzé *et al.*, 2000). Les erreurs moyennes sont partout inférieures à +/- 4 micro grammes. La prévision étant réalisée, un correctif systématique est apporté selon que l'on se situe en semaine ou lors d'un week-end. En effet, en zone urbaine les concentrations d'ozone du week-end sont relativement plus élevées qu'en semaine, toutes choses égales par ailleurs. Une des faiblesses de ces modèles est de sous évaluer la variance, ce qui pose problème en particulier pour la prévision des pics. À noter que des méthodes similaires ont été développées pour la prévision hivernale des concentrations de NO₂ (Perrot, 2002).

De la prévisibilité à la prévision opérationnelle.

Pour passer de la prévisibilité à la prévision, il faut s'appuyer sur les prévisions météorologiques. On emboîte ainsi les prévisions et leurs erreurs inhérentes. En France, ces prévisions sont effectuées par Météo France en utilisant les modèles ARPEGE et Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Développement INternational (ALADIN) (Pailleux *et al.*, 2000). Le modèle ALADIN-France, plus spécialement adapté aux prévisions sur la France, permet de gagner un facteur 2 par rapport à la résolution la plus forte d'ARPEGE auquel il est couplé. Nous disposons, sur trois points de grille centrés sur Dijon (Côte d'Or) et Chalon-sur-Saône (Saône-et-Loire) de variables simulées au niveau du sol (température, pression, flux solaires et thermiques, précipitations liquides de convection et précipitations liquides à grande échelle) ainsi que sur 11 niveaux (2, 10, 20, 50, 100, 250, 500, 750, 1000, 1250 et 1500 m) au-dessus du sol (température, composantes horizontales et verticales du vent, humidité relative). Enfin, nous intégrons la nébulosité totale, jusqu'à 1500 m, de 1500 m à 5 Km, et au-delà de 5 Km (39/ Houzé *et al.*, 2003 ; 31/ Houzé *et al.*, 2003).

Afin de concilier soucis de performance et caractère opératoire, nous travaillons sur les runs effectués chaque jour à 0h t.u. et avons sélectionné les échéances 27h et 36h. Par exemple, pour prévoir les concentrations maximales d'ozone du 14 juillet, on s'appuie sur le run du 13 juillet 0h t.u. L'échéance 27h renseigne sur le temps prévu pour le 14 juillet à 3h t.u., c'est-à-dire 5h légales donc conditions observées en fin de nuit. L'échéance 36h renseigne sur le temps prévu pour le 14 à 12h t.u., soit 14h légales, représentatives du temps prévu pour la journée du 14 juillet. La différence entre 12 t.u. et 3 h. t.u. est représentative de l'amplitude diurne. Les relevés ATMOSF'air du 13 juillet effectués entre 7h et 12h t.u sont disponibles à 13h t.u. (15h légales). ATMOSF'air dispose ainsi de deux heures (fin de journée de travail des personnels à 17h) pour faire tourner les modèles, contrôler les sorties et transmettre les prévisions à la préfecture et aux médias.

Pour chaque station, les équations de régression déterminées sur la période 1999-2001 sont appliquées sur le jeu de données 2002. Pour tester les performances des modèles, le

coefficient de corrélation (R) est le paramètre le plus courant. Un des inconvénients de R est qu'il est insensible à des prévisions contenant un biais constant comme une moyenne ou un écart-type erronés. Le second score de précision utilisé, le LEPS (Linear Error in Probability Space) a été introduit par Ward et Folland (1991) et révisé par Potts *et al.*, (1996). Le LEPS est moins sensible aux grosses erreurs pouvant intervenir dans un contexte extrême (probabilité faible) qu'aux petites erreurs correspondant à un contexte normal (probabilité forte). Le LEPS diffère de R car considère les différences de positions entre valeurs observées et prévues dans leurs distributions de probabilité cumulée respectives et non simplement leur différence de valeur (Philippon, 2002). Pour les valeurs continues le LEPS est calculé à partir de l'équation :

$$\text{LEPS}=3(1-|P_f-P_v|+P_f^2-P_f+P_v^2-P_v)-1$$

Où P_f et P_v consistent respectivement en la position de la prévision et la position de l'observation dans la distribution de probabilité cumulée. Le LEPS varie de -1 (score donné lorsque l'on prévoit l'inverse d'une situation extrême à 2 (score attribué quand une situation extrême est parfaitement prévue). La prévision correcte d'une situation moyenne ($P_v=0.5$) donne des valeurs de LEPS de 0.5 (Philippon, 2002). Nous élaborons deux modèles, 1/ *prévisibilité*, non opérationnel et intégrant des données d'observations météorologiques, 2/ *prévision*, opérationnel et utilisant les prévisions météorologiques ALADIN (31/ Houzé *et al.*, 2003, Tableau 1). Pour chacun des deux types, et pour chaque station, nous présentons les résultats sur les périodes d'apprentissage (1999-2001) et de validation (2002).

Des performances en prévision supérieures à celles obtenues en prévisibilité.

En prévisibilité, les coefficients de corrélations (R) obtenus sur la période d'apprentissage (1999-2001) sont respectivement pour Dijon, Chalon-sur-Saône et Mâcon de 0.61, 0.63 et 0.62. Ces valeurs quasi identiques signifient que l'ozone prévu et l'ozone observés partagent environ 38% de variance commune. Sur la période de validation (2002) les performances ne diminuent pour ainsi dire pas : -0.01 à -0.03 en ce qui concerne R. Cela signifie que les modèles, à défaut d'être très performants sont robustes.

En prévision, sur la période d'apprentissage (1999-2001), R oscille entre 0.71 et 0.78. Sur la période de validation (2002) les performances se dégradent très légèrement à Chalon-sur-Saône (-0.02 pour R et -0.05 pour LEPS). Ces différences ne sont pas significatives et montrent la robustesse des modèles.

Que l'on considère les périodes d'apprentissage (1999-2001) ou de validation (2002), les résultats en mode prévision sont systématiquement supérieurs à ceux obtenus en mode prévisibilité (Tableau 1). En prévision, R croît de +0.16 à Dijon, +0.12 à Chalon-sur-Saône et +0.19 à Mâcon. Le LEPS de +0.11, +0.05 et +0.14. Les parts de variances communes entre observations et prévisions atteignent 50% en moyenne sur les 3 stations sélectionnées. Pour rappel, la différence entre les modèles de prévision et les modèles de prévisibilité est que l'on utilise comme prédicteurs des prévisions météorologiques issues des modèles ARPEGE ALADIN et non plus les mesures effectuées *in situ* (qui correspondent pourtant à des prévisions parfaites). Les prévisions de Météo France ne peuvent pas être plus que parfaites ! Mais elles nous renseignent mieux sur l'état de l'atmosphère que ne le font les mesures *in situ*. Dans les stations météorologiques bourguignonnes, en l'absence de radiosondage, seules les conditions à 2 ou à 10 mètres de haut sont mesurées. En revanche, les modèles numériques fournissent des prévisions certes imparfaites, mais concernant l'atmosphère dans sa dimension verticale. Ainsi, des éléments de type stratification verticale, épaisseur de la couche limite, direction du vent et humidité en altitude sont prévus. L'examen de nos modèles de régressions

multiples montre que des prédicteurs relatifs à l'humidité, à la direction et la vitesse du vent compris entre 1000 et 1500 m au-dessus du sol, ainsi que les gradients verticaux de température prévus en fin de nuit entre le sol et 500 à 750 m sont fréquemment sélectionnés.

En prévisibilité, les variations d'ozone sont nettement sous-estimées. Pour les 3 stations, la différence entre les écarts-types des observations et ceux issus de la prévisibilité est de l'ordre de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. La figure 42 permet de mieux comparer les résultats des modèles de prévisibilité aux observations. Les pics d'ozone sont systématiquement sous-estimés en prévisibilité et les valeurs particulièrement faibles sont surestimées. Les modèles en mode prévisibilité ne sont donc pas assez dynamiques. Il serait possible de pallier ce problème en augmentant préalablement la variance du prédictand (l'ozone). En prévision, les différences observées sur les écarts-types (observations versus prévisions) s'atténuent de moitié. Elles sont de l'ordre de $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Les mauvaises prévisions des valeurs extrêmes sont moins marquées (Fig. 43).

Un comparatif portant sur les résidus (31/ Houzé *et al.*, 2003) montre que ceux calculés en prévision sont en moyenne moins élevés, mais surtout que les erreurs de prévisions les plus flagrantes sont nettement atténuées.

Les modèles en mode prévision sont plus dynamiques que ceux élaborés en mode prévisibilité. Ceci est lié au fait qu'en mode prévision nos modèles intègrent moins de prédicteurs mesurés le jour où est effectuée la prévision (mesures de la qualité de l'air ATMOSF'air) et plus de prédicteurs relatifs au jour pour lequel est effectuée la prévision (conditions météorologiques Météo France). En conséquence, les modèles en mode prévision sont plus à même de prévoir les pics d'ozone, même s'ils les sous-estiment encore.

Interpoler les données ponctuelles de qualité de l'air.

Les données de qualité de l'air sont mesurées (par ATMOSF'air) et prévues (par le CRC) en des points précis, donnés. En ce qui concerne les mesures, trois types existent :

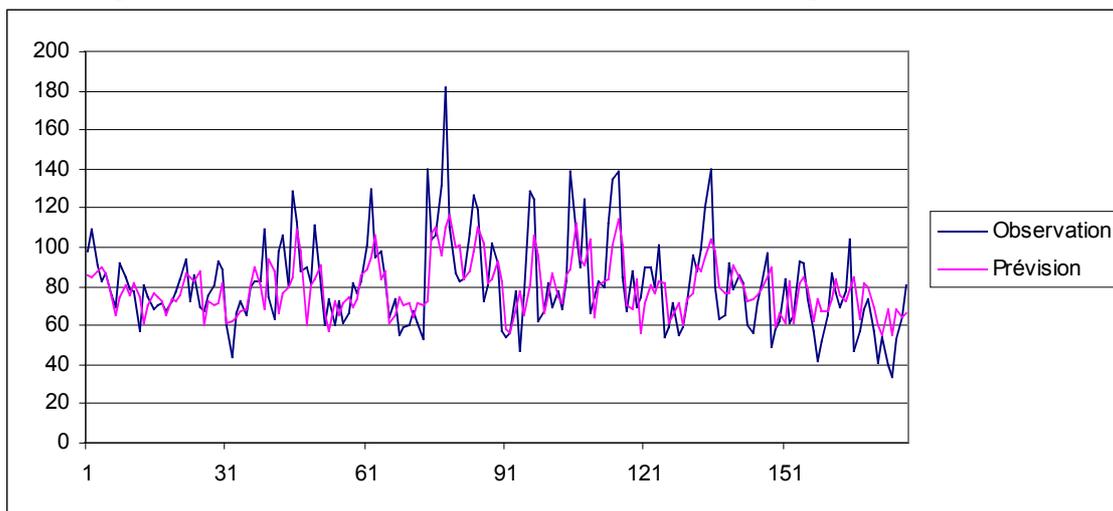
- Les stations fixes, où les mesures sont, problèmes exceptés, effectuées sans interruption ;
- Les campagnes ponctuelles (de quelques jours à quelques semaines) conduites à partir du laboratoire mobile, installé dans un camion placé sur un site sélectionné ;
- Les campagnes fondées sur la mise en place de capteurs passifs, types tube à diffusion. Ces campagnes permettent d'avoir des informations simultanées en un nombre relativement élevé de points dans l'espace. Leur limite principale réside dans la résolution temporelle.

Les attentes, qu'elles émanent des décideurs, de la population ou des scientifiques, portent sur l'ensemble du territoire. La question de l'interpolation se pose donc de manière aiguë.

Deux applications dédiées au NO₂ dans l'agglomération dijonnaise.

Deux études ont été menées dans cette optique. La première visait à interpoler les données de NO₂ mesurées dans les 7 stations de l'agglomération dijonnaise. Elle intégrait des éléments tels que le bâti ou le trafic. Dans la même optique, Nathalie Long (2000) s'est appuyée sur une campagne portant sur 119 points de mesures par tubes à diffusion, campagne conduite par ATMOSF'air lors de l'hiver 1999, pour perfectionner cette approche. Trafic, nombre d'habitants et d'emplois ainsi que relief ont été considérés pour les interpolations effectuées sur la base de régressions multiples. Cette campagne reposait sur 6 périodes consécutives de 15 jours, ce qui a également permis d'intégrer l'élément météorologique pour tenter d'expliquer les 6 cartes différentes.

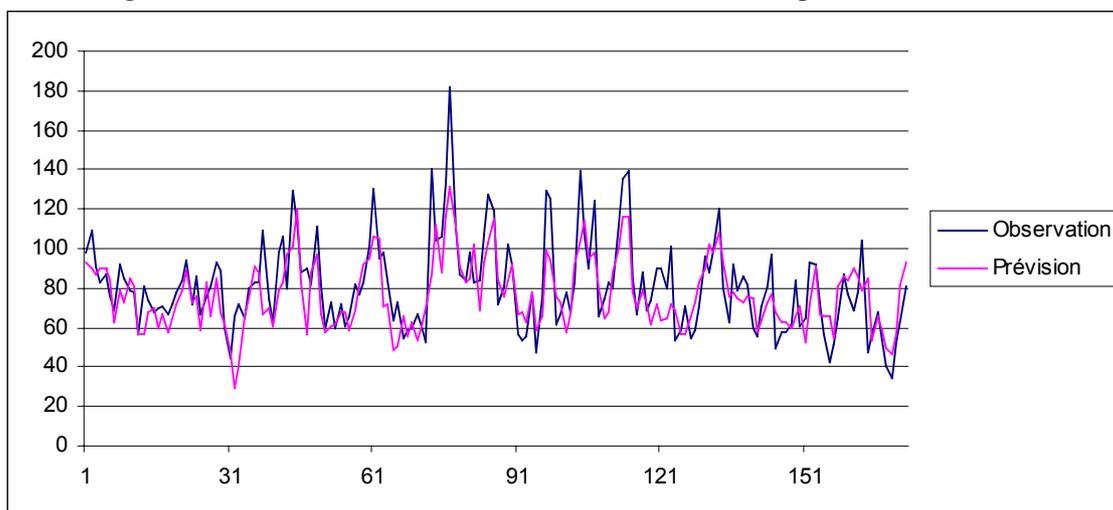
Figure 42 – Prévisibilité de la valeur maximale d’ozone pour le lendemain.



Abscisses : données journalières du 01 avril au 30 septembre 2002

Ordonnées : concentrations d’ozone en microgrammes/m³

Figure 43 – Prévisions de la valeur maximale d’ozone pour le lendemain.



Abscisses : données journalières du 01 avril au 30 septembre 2002

Ordonnées : concentrations d’ozone en microgrammes/m³

Sur le centre et les quartiers péricentaux de Dijon, les taux de NO₂ sont liés aux sources de NO (12/ Long *et al.*, 2000 ; 13/ Long *et al.*, 2000). Par contre, sur le reste de l’agglomération, y compris l’ouest de la commune de Dijon, le rôle joué par le relief semble prédominant, les concentrations variant inversement par rapport à l’altitude. Bien que l’approche temporelle soit limitée par le nombre de données : 6 valeurs, et par le pas de temps considéré (périodes de 15 jours), la direction du vent semble être une variable climatique prépondérante sur la répartition de la pollution sur l’agglomération, tandis que la vitesse du vent (dispersion des polluants) et les inversions thermiques (maintient des polluants dans les basses couches) ont plutôt un impact sur le niveau des concentrations.

c) Perspectives

Améliorer les prévisions et les accompagner d'un indice de robustesse.

Dans la continuité, des recherches seront consacrées à améliorer les modèles de prévision. Dans cette optique, l'étude va porter sur les erreurs de prévisions pour en identifier des facteurs récurrents pouvant donner lieu à d'éventuels correctifs. Les prévisions seront également assorties d'une indication relative à leur robustesse. Un indice sera défini en fonction de la cohérence entre les prévisions dédiées aux différentes stations. Ce travail fait partie de la thèse de Marie-Laure Houzé.

Spatialiser à l'échelle de la Bourgogne les concentrations en ozone.

A partir des campagnes réalisées par ATMOSF'air en août 2000, 105 points de mesures seront analysés pour deux périodes de 3 jours et 2 nuits chacune. Les données d'ozone mesurées par des tubes à diffusion seront interpolées à l'ensemble du territoire régional. L'interpolation s'appuiera sur des données météorologiques ainsi que sur un MNT et l'occupation sol décrite par CORINNE LAND COVER. Marie-Laure Houzé et Thierry Castel conduisent ces recherches.

Appréhender le dôme urbain de CO₂.

En collaboration avec Jean Lévêque, équipe GEOSOL INRA-Université de Bourgogne, des mesures de CO₂, polluant non mesuré par ATMOSF'air puisque non nocif, sont effectuées. L'objectif est de mieux appréhender le dôme urbain de CO₂ dans ses dimensions spatiales et temporelles. Ce travail est à placer dans le cadre de l'application du protocole de Kyoto, ratifié par l'Union Européenne, pour mieux connaître le rôle des agglomérations. En outre, les agglomérations peuvent être considérées comme des laboratoires du futur. Les concentrations de CO₂ mesurées en 2003 à Dijon (Gamba, 2003 ; Grisolano, 2003) oscillent en effet à 450 ppm, concentrations qui devraient être celles de l'atmosphère de fond dans quelques décennies. Des études d'impacts de telles concentrations, par exemple sur le rythme de croissance de la végétation, nécessitent de connaître nettement mieux que ce n'est le cas actuellement, les concentrations au sein de ces dômes urbains.

Chapitre 5 : conclusions principales

Les précipitations de la Dobroudja roumaine connaissent un régime tempéré continental. Mais les contraintes géographiques que sont le relief, même modeste, et surtout la présence de la mer Noire, modulent ce régime. En particulier, les stations côtières bénéficient d'un relatif surplus automnal, traduisant une variante méditerranéenne. Plus encore ces éléments physiques influent sur les volumes. Ce phénomène est le plus marqué en été où pénétration sur le continent du front de brises de mer et maximum pluviométrique coïncident, vers 30-35 Km de la côte.

La qualité de l'air en Bourgogne est globalement correcte. Elle s'est améliorée depuis 1993 en ce qui concerne les fumées noires et l'acidité forte. Ces améliorations sont à mettre au crédit de progrès technologiques et d'initiatives politiques. Néanmoins les concentrations en ozone sont et restent élevées. Des modèles statistiques de prévision des concentrations maximales pour le lendemain sont élaborés. Il s'agit de modèles conçus pour être opérationnels et fournis aux réseaux de surveillance de la qualité de l'air de Bourgogne (ATMOSF'air). Ces modèles montrent la pertinence de l'utilisation des prévisions météorologiques issues du modèle ALADIN de Météo France. Mais les résultats dédiés à des stations doivent être interpolés afin de documenter l'ensemble du territoire bourguignon.

Publications

Axe 1

6/ **RICHARD Y.**, MIHAILESCU I.F., PLANCHON O., 2000: Spatial distribution of the precipitation in Dobruja (Romania / Black Sea). *Inter. J. of Climatology*, **20**, 1275-1284.

Axe 2

26/ VIROT S., **RICHARD Y.**, SIEJA B., TABOULOT S., 1998 : Qualité de l'air de l'agglomération dijonnaise : facteurs d'évolution de l'acidité forte et des fumées noires. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **11**, 329-337.

22/ **RICHARD Y.**, HOUZE M.-L., CHABIN J.-P., THEVENIN D., 2000 : Pollution en ozone en Bourgogne orientale. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **13**, 528-537.

12/ HOUZE M.-L., **RICHARD Y.**, MONTEIRO S., 2000 : Prévisibilité à 24h de la pollution en ozone à Dijon et Chalon-sur-Saône. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **13**, 500-508.

31/ HOUZE M.-L., CHEVRAND P., **RICHARD Y.**, 2003 : Apports des données ALADIN dans le cadre d'une prévision de l'ozone troposphérique en Bourgogne. Actes des 6^{ème} rencontres de Théo Quant, Besançon, 8 pp. <http://thema.univ-fcomte.fr/theoq/pdf/2003/03Houze.pdf>

13/ LONG N., MONTEIRO S., CHABIN J.-P., MANNONE V., **RICHARD Y.**, 2000 : Concentrations intra-urbaine en NO₂ à Dijon – Développement d'un SIG et impact des conditions météorologiques. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **13**, 509-516.

Conclusion générale

1. Structures spatiales et cohérence saisonnière

Les recherches de structures spatiales de la variabilité pluviométrique et de sa composante intra saisonnière s'appuient sur une méthodologie adaptée : SPI, ACP et ACP étendues. Les résultats sont sensibles à la densité et à la qualité des données pluviométriques, en Afrique australe optimales en RSA.

Principaux résultats

En ce qui concerne l'Afrique du Sud, les résultats montrent que sécheresses et excédents, identifiés à partir du SPI, sont liés à des modifications de l'amplitude du régime pluviométrique saisonnier. Les sécheresses les plus marquées interviennent tout au long du siècle. Sur le critère des volumes précipités, ce pays n'a pas connu de changement significatif. Les anomalies pluviométriques majeures ne perdurent généralement pas tout au long de la saison des pluies. Statistiquement, octobre se distingue, de par le signe de l'anomalie pluviométrique, de la suite de la saison des pluies (décembre-avril).

A une échelle plus large, considérant Afrique australe et orientale, les principales anomalies interviennent lors des saisons des pluies respectives. A ce titre, elles ne sont pas synchrones. La variabilité interannuelle s'inscrit dans un cadre contraint par les régimes pluviométriques moyens. Néanmoins, certaines saisons sont plus propices au développement d'anomalies étendues. Tel est le cas des short rains (octobre-décembre) en Afrique de l'Est ou des précipitations de fin d'été (janvier-mars) en Afrique australe.

Perspectives

Il est nécessaire de replacer les anomalies pluviométriques exprimées par le SPI dans leur contexte environnemental. Pour cela, différentes couches d'information (relief, végétation, humidité du sol) seront intégrées dans un SIG. Une première application sera dédiée à l'extension des zones humides du bassin de l'Okavango.

La recherche des structures spatiales d'anomalies pluviométriques en Afrique, au sud de l'équateur, nécessite d'intégrer l'Angola et le Zaïre. Le problème fut longtemps la non existence ou disponibilité de données mesurées *in situ*. Avec le développement de l'estimation des pluies par satellites, ce type de recherche peut maintenant être effectué. Nous nous appuyerons sur les données CMAP ainsi que les précipitations estimées par satellite (MSG).

En Afrique du Sud, des excédents en octobre préfigurent une mauvaise saison des pluies (décembre-avril). Des ACP étendues seront effectuées sur les précipitations mensuelles d'autres espaces, en premier lieu le Mozambique, pour identifier les saisons cohérentes. La robustesse des résultats sera éprouvée avec des analyses portant sur des fenêtres emboîtées de résolution et de taille variables. La variabilité intra-saisonnière sera considérée pour développer des modèles statistiques de prévision saisonnière. Des prédicteurs de type précipitations d'octobre et anomalies de la TSO ou/et de l'atmosphère qui leur sont associées seront intégrés dans ces modèles.

2. Variabilité interannuelle

Les relations entre anomalies pluviométriques et celles de TSO, d'OLR ou du NDVI sont étudiées via des corrélations et des analyses composites. Le forçage exercé par la TSO sur la pluviométrie est appréhendé à partir de 8 runs de 50 ans sur un MGCA forcé par les TSO observées. Données satellites et sorties de modèles complètent les observations au sol.

Principaux résultats

L'activité photosynthétique estimée par satellite permet de suivre, dans le temps et avec une couverture spatiale continue, les anomalies pluviométriques, si tant est que celles-ci aient un impact sur la végétation. En Afrique australe, ceci est le cas lorsque l'on se situe en milieu steppique. Sur et autour du Kalahari, ainsi que sur le veld sud-africain, le NDVI rend correctement compte des excédents et déficits en pluies. Dans les régions côtières, qu'elles soient arides (façade ouest) ou plus humides (façades est), ce n'est plus le cas.

En Afrique tropicale, les anomalies pluviométriques sont fortement corrélées à celles de la TSO. Les océans les plus proches jouent un rôle important, océan Atlantique tropical pour l'Afrique de l'Ouest et océan Indien pour l'Afrique australe et orientale. Mais ce n'est pas systématique comme le montre l'influence mineure de l'océan Atlantique tropical sud sur la pluviométrie d'Afrique australe, tandis que les conditions affectant le Pacifique, via l'ENSO, sont déterminantes. Globalement, le forçage exercé par anomalies de TSO sur la pluviométrie est d'autant plus fort que l'on se situe dans les basses latitudes et que les mécanismes pluviogènes sont de type tropical, par exemple en janvier-février plus qu'en octobre-novembre en Afrique australe.

En Afrique tropicale, la convection profonde estimée par satellite permet d'appréhender assez correctement les anomalies pluviométriques. En Afrique australe, les anomalies interannuelles de l'OLR associées à celles des pluies témoignent de modifications dans le cadre de la circulation divergente est-ouest, sur l'océan Indien comme sur le Pacifique. Sur les océans des latitudes subtropicales à tempérées, des anomalies de la circulation atmosphérique induisent des anomalies de TSO. Celles qui de manière récurrente sont observées simultanément dans le sud-ouest des bassins indien et atlantique modulent également la pluviométrie, principalement en Afrique du Sud.

Perspectives

Les « runs » longs du CERFACS seront soumis par Nicolas Fauchereau à des techniques multivariées, dérivées de l'ACP, et de classification. L'objectif est, année par année, de mesurer l'intensité du forçage des TSO sur les précipitations, ainsi que de caractériser sa signature spatiale.

J'étudierai la circulation dans la haute troposphère au-dessus de l'océan Atlantique tropical pour les différents événements ENSO avec ou sans impact sur les pluies d'Afrique australe à partir des réanalyses du NCEP-II. Le rôle du pont atmosphérique dans la télé connexion entre ENSO et la pluviométrie en Afrique australe sera analysé.

Nous travaillerons à une meilleure identification des zones source en nous basant sur les flux d'humidité. Les rétro-trajectoires des masses d'air, calculées à partir des flux d'humidité 6 horaires seront déterminées pour établir des statistiques des zones source en ce qui concerne l'humidité advectée sur l'Afrique australe.

3. Variations décennales

L'étude des variations décennales repose sur des techniques utilisant des fenêtres glissantes de type moyennes, variance, corrélations, ACP ainsi que sur des transformées en ondelettes. Des expériences de sensibilité à des anomalies idéalisées et réalistes de TSO fournissent des éléments d'explication.

Principaux résultats

La relation entre les variations du niveau du lac Tanganyika et la pluviométrie sur le bassin versant met en évidence un changement d'échelle décennale. Depuis l'année 1961 les excédents pluviométriques induisent des hausses plus sensibles qu'avant. Cette plus grande efficacité des pluies est liée à une installation plus précoce de la saison des pluies ainsi qu'à une anthropisation des milieux modifiant les conditions d'écoulement de surface.

En Afrique, les structures spatiales de variabilité pluviométrique ont changé depuis la fin des années soixante. En Afrique australe elles deviennent plus fortes, indiquant par exemple que les sécheresses sont plus prononcées et étendues depuis 1970. Ces éléments sont à mettre en relation avec le phénomène ENSO, plus fréquent et de plus forte amplitude.

Des expériences de sensibilité d'un MCG atmosphérique aux anomalies de TSO montre également que la plus forte sensibilité des précipitations d'Afrique australe à l'ENSO est liée au contexte global de réchauffement. En particulier, le réchauffement de l'océan Indien subtropical fait que les ENSO récents induisent des sécheresses plus sévères en renforçant la composante dipolaire des champs de pression, d'OLR et de précipitations entre le continent et le proche océan Indien.

Perspectives

En Afrique orientale, la mise à jour des séries de variation du niveau du lac Tanganyika sera menée en utilisant les données TOPEX/POSEIDON, disponibles depuis 1996. Nous avons étudié le lien entre les précipitations relevées dans les postes pluviométriques situés dans le bassin versant du Tanganyika et les bilans hydrologiques du lac. Cette approche est partielle. L'objectif est de considérer les pluies sur le lac. Les données issues du satellite MSG seront utilisées. Le lien avec les anomalies de la circulation divergente est-ouest sera examiné.

Pour l'Afrique australe, il est nécessaire de mieux caractériser les changements dans le système climatique autour de 1970, en particulier comment la rupture observée dans les précipitations d'Afrique australe s'articule avec les variations décennales observées sur l'hémisphère sud. Le second objectif est de voir si la rupture de 1970 est une manifestation de fluctuations décennales ou d'un changement durable. Nous vérifierons sur les années ultérieures (après 1998) si les tendances mises en évidence depuis 1970 se confirment. Si cette tendance était confirmée, nos travaux auraient ouvert une piste dans l'étude du changement climatique observé en Afrique australe.

4. L'Afrique du Sud et le changement climatique

La recherche de changements au xx^e siècle s'appuie sur des données quotidiennes relevées dans 527 stations sud-africaines de 1920 à 1999 et fournies par le SWAS. Pour le xxi^e siècle, nous utilisons deux simulations effectuées avec le modèle couplé océan-atmosphère ARPEGE/OPA forcé par le scénario B2 sur la période 1950-2099. Préalablement aux études, données observées et simulations ont fait l'objet de contrôles.

Principaux résultats

En Afrique du Sud, depuis 1920, les cumuls pluviométriques ne sont marqués ni par des tendances ni par des ruptures. Néanmoins, si l'on considère le pas quotidien, certaines régions ont connu des changements significatifs. La majorité de ces changements interviennent vers 1970. Le plus net d'entre eux est observé dans la Province Est du Cap, entre Port Elisabeth et East London, où les stations situées dans les bassins versants des petits fleuves côtiers connaissent des événements pluvieux moins nombreux mais plus intenses.

Une simulation de 150 ans est utilisée (1959-2099). Sur et autour de l'Afrique du Sud, l'étude de la période 1970-1999 montre que ARPEGE/OPA reproduit correctement la dynamique (pression, vent...), ainsi que les répartitions spatiales et saisonnières des pluies. En revanche, il surestime les volumes précités d'un facteur deux en moyenne. Pour le xxi^e siècle, les précipitations sud-africaines seraient amenées à diminuer en toutes saisons, d'environ 8% pour janvier-mars. Le développement d'un modèle statistique de désagrégation régionale s'appuyant sur la dynamique, élément le mieux simulé par les MCG, permet de renforcer l'hypothèse d'une diminution des pluies estimée à environ 16%. Cette diminution, d'autant plus forte que l'on se situe sur l'intérieur de la RSA, est à mettre en relation avec une modification du champ de pression de surface qui présente des similarités avec les situations actuelles enregistrées lors de événements ENSO, à l'origine des principales sécheresses.

Perspectives

Nous avons commencé à travailler plus spécifiquement la question des fortes précipitations quotidiennes. Yan Zhao et moi étudions leur évolution en termes de volumes mais également en termes de temps de retour. Pour mieux comprendre à quoi est due, dans le MCG ARPEGE/OPA, la réduction des précipitations, nous travaillons sur les flux d'humidité à 850 et 500 hPa. Nous calculons les différentes composantes (flux moyens et transitoires) aux quatre bornes d'une fenêtre correspondant à l'Afrique australe subtropicale. Pour la période actuelle (1979-2000), une comparaison entre les flux calculés sur NCEP/DOE AMIP II et ARPEGE/OPA est effectuée. L'évolution de ces flux au cours du xxi^e siècle est ensuite analysée.

Une limite du travail accompli et en cours réside dans la dépendance des résultats à une simulation, un scénario et un modèle. Pour tester la robustesse de nos résultats, il est nécessaire de considérer d'autres simulations reposant sur :

- Des conditions initiales différentes,
- Plusieurs scénarii. La seule utilisation de B2 est insuffisante. B1, A1 et A2 sont d'autres scénarii fréquemment utilisés dans la littérature.
- Différents MCG.

La faisabilité de ceci dépendra des moyens à disposition, surtout en termes humains.

5. Dobroudja et Bourgogne

Les données météorologiques sont complétées par des données géographiques de type altitude et distance à la mer pour la Dobroudja. Des données de qualité de l'air et des prévisions météorologiques sont employées pour la Bourgogne, ainsi que de données relatives à l'environnement géographique (population, trafic, altitude, occupation des sols). Les statistiques explicatives viennent compléter les statistiques descriptives pour l'élaboration de modèles.

Principaux résultats

Les précipitations de la Dobroudja roumaine connaissent un régime tempéré continental. Mais les contraintes géographiques que sont le relief, même modeste, et surtout la présence de la mer Noire modulent ce régime. En particulier, les stations côtières bénéficient d'un relatif surplus automnal, traduisant une variante méditerranéenne. Plus encore, ces éléments physiques influent sur les volumes. Ce phénomène est le plus marqué en été où pénétration sur le continent du front de brises de mer et maximum pluviométrique coïncident, vers 30-35 Km de la côte.

La qualité de l'air en Bourgogne est globalement correcte. Elle s'est améliorée depuis 1993 en ce qui concerne les fumées noires et l'acidité forte. Ces améliorations sont à mettre au crédit de progrès technologiques et d'initiatives politiques. Néanmoins les concentrations en ozone sont et restent élevées. Des modèles statistiques de prévision des concentrations maximales pour le lendemain sont élaborés. Il s'agit de modèles conçus pour être opérationnels et fournis aux réseaux de surveillance de la qualité de l'air de Bourgogne (ATMOSF'air). Ces modèles montrent la pertinence de l'utilisation des prévisions météorologiques issues du modèle ALADIN de Météo France. Mais les résultats dédiés à des stations doivent être interpolés afin de documenter l'ensemble du territoire bourguignon.

Perspectives

Des recherches seront consacrées à améliorer les modèles de prévision. L'étude des erreurs de prévisions a pour objectif l'identification des facteurs pouvant donner lieu à des correctifs. Aux prévisions seront associées des indications relatives à leur robustesse. Un indice sera défini en fonction de la cohérence entre les prévisions dédiées aux différentes stations.

A partir des campagnes réalisées par ATMOSF'air en août 2000, 105 points de mesures seront analysés pour deux périodes de 3 jours et 2 nuits chacune. Les données d'ozone mesurées par des tubes à diffusion seront interpolées à l'ensemble du territoire régional. L'interpolation s'appuiera sur des données météorologiques ALADIN ainsi que sur un MNT et l'occupation sol.

Des mesures de CO₂, polluant non mesuré par ATMOSF'air puisque non nocif, sont effectuées. L'objectif est de mieux appréhender le dôme urbain de CO₂ dans ses dimensions spatiales et temporelles. Ce travail est à placer dans le cadre de l'application du protocole de Kyoto, ratifié par l'Union Européenne, pour mieux connaître le rôle des agglomérations. En outre, les agglomérations peuvent être considérées comme des laboratoires du futur car connaissent des concentrations qui devraient être celles de l'atmosphère de fond dans quelques décennies. Des études d'impacts de telles concentrations sur le rythme de croissance de la végétation seront conduites.

6. Climatologie, géographie : itinéraires.

Géographe physicien, l'intégralité de mes recherches s'inscrivent en climatologie, science de l'environnement à l'interface entre 1/ les surfaces étudiées par notamment les océanographes et les géographes, et 2/ l'atmosphère, étudiée par les météorologues.

La climatologie n'est pas une discipline scolaire.

En France, la climatologie n'est pas une discipline scolaire ou universitaire. Avant le troisième cycle, aucune formation libellée « climatologie » n'existe. La climatologie ne donne pas lieu à un diplôme universitaire. Elle ne correspond ni à une section du Conseil National des Universités (CNU), ni à une section du Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) puisque la racine climat se retrouve dans les sections 19 (système climatique), 20 (interactions climat-biosphère) et 31 (bioclimatologie). Dans l'enseignement secondaire, selon le niveau mais aussi selon l'époque, la climatologie est enseignée en géographie ou en sciences de la vie et de la terre. Toutefois, depuis que je suis Maître de Conférences, la majorité des lycéens qui m'ont contacté l'ont fait avec pour objectif la réalisation d'un dossier dans le cadre de leur cours de physique... Avec le baccalauréat en poche, une personne voulant faire de la climatologie peut s'orienter vers le concours de la météorologie nationale ou bien s'inscrire à l'université. Elle aura alors le choix entre physique, sciences terre, sciences vie et géographie. Des choix *a priori* très distincts. Les climatologues ont donc des formations très diverses, et par conséquent des compétences et des approches très diversifiées.

La climatologie est une science dont l'objet est bien défini.

Pourtant du point de vue épistémologique, la climatologie ne donne pas fréquemment lieu à des discussions aux thèses antagonistes quant à son contenu. Personne ne remet sérieusement en cause le caractère scientifique de la climatologie. Elle correspond bien à un « ensemble de connaissances, d'études d'une valeur universelle, caractérisées par un objet (domaine) et une méthode déterminés, et fondées sur des relations objectives vérifiables » (Petit Robert, 1996).

Toujours selon le Petit Robert, la climatologie est « l'étude de l'action des phénomènes météorologiques sur les différentes parties du globe, de leurs réactions mutuelles, de leur évolution temporelle et des différents climats ». Cette « science de l'atmosphère », si l'on s'en réfère au dictionnaire du climat (Beltrando et Chemery, 1995), « a pour objectif la description synthétique, le classement et l'explication de la répartition des différents types de climats dans un cadre géographique », auquel on pourrait ajouter la prévision aux échelles de temps supérieures à celles de la météorologie. Le climat y est défini comme « la combinaison des états de l'atmosphère en un lieu donné et sur une période définie », définition très proche de celle qui, reconnue par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), fut proposée par Gibbs en 1987 : « probabilité statistique d'occurrence de divers états de l'atmosphère au-dessus d'une région donnée durant une certaine période civile déterminée ».

Les méthodes diversifiées constituent une richesse.

« *La climatologie se trouve avoir [...] des frontières communes avec la physique, la physiologie, l'écologie, la biogéographie, l'agronomie, la médecine* » (Durand-Dastès, 1969). Une grande diversité méthodologique en résulte : l'historien du climat (Le Roy Ladurie, 1967) ne s'appuie pas sur la même méthode que le modélisateur des climats du passé (Joussaume, 1993) ou du futur (Le Treut, 1997), sans parler des chercheurs appartenant aux sciences du paléo environnement, dont la dendrochronologie, du chimiste de l'atmosphère (Mégie, 1989), du géologue (Foucault, 1993), du géographe (Hulme, 1992), de l'océanologue (Minster, 1994) ou du glaciologue (Lorius, 1991). La méthode, peut être inductive, déductive, hypothético-déductive, plus rarement comparative. Selon la formation, elle donne préférentiellement lieu à des travaux de terrain, de laboratoire, à l'utilisation de techniques statistiques ou au développement de modèles numériques. De surcroît le développement de techniques très différentes les unes des autres, et l'emploi d'une palette étendue d'outils, ne facilitent pas toujours les échanges entre climatologues.

Ainsi les appartenances disciplinaires constituent-elles encore parfois des frontières insuffisamment franchies. Néanmoins, les climatologues qui développent des collaborations avec leurs homonymes issus d'autres disciplines constatent que la diversité des formations constitue aussi une richesse pour la climatologie : l'objet étudié l'est au travers de différents filtres et angles. Lorsque les études font appel à des climatologues de formations différentes, notre objet, le climat, bénéficie de regards croisés dont peu d'objets scientifiques peuvent s'enorgueillir ! La climatologie est une science qui s'appuie sur cette diversité.

Cette science, comme la géographie, est en constante évolution.

Le terme climat a une origine grecque. Le « κλίμα » est l'angle d'inclinaison du rayonnement solaire. Le « κλίμα » appartient à la physique. Au début du siècle dernier, Hann (1908) définit le climat comme l'état moyen de l'atmosphère. Au cœur du siècle, Kendrew (1930), puis Conrad (1944) *in* Gibbs (1987), soulignent l'importance d'examiner les distributions de fréquences des éléments météorologiques autant que les moyennes. Enfin, en 1987, Gibbs propose une définition du climat toujours en vigueur, où il est fait explicitement appel à la statistique.

A l'image de la géographie, la climatologie a connu une évolution certaine : issue des mathématiques et de la physique, elle est devenue aujourd'hui le pivot des sciences de l'environnement. Toutefois, sa composante relevant directement de la « discipline géographie » est, selon les pays, plus ou moins développée. Elle l'est plus dans les pays anglo-saxons (Etats-Unis, Royaume-Uni, République Sud Africaine...), mais peut être également dans certains pays méditerranéens (Espagne) ou, pour des raisons historiques, l'enseignement de l'histoire et de la géographie dans le secondaire ne sont pas effectués par les mêmes personnes. La conséquence étant, pour la géographie, un plus grand équilibre entre sciences de l'environnement et sciences de l'homme et de la société, et ainsi une place plus importante accordée à la climatologie.

En climatologie géographique française, que je définirai tout simplement par la climatologie pratiquée par les climatologues formés à l'école française de la géographie, les monographies régionales caractéristiques de la géographie vidalienne ont marqué les années cinquante et soixante. L'absence de moyens de traitements puissants favorisait l'étude de cas, de situations particulières, d'épisodes, ce qui renforçait le lien avec la météorologie et ses bulletins quotidiens.

Les études des structures spatiales, de leur dynamique temporelle ont marqué une évolution à partir des années soixante-dix et quatre-vingt. L'apparition ou le développement de nouvelles données (satellites) et de moyens de calculs performants (informatique) ont permis d'éprouver le rôle des conditions de surface continentale ou océanique sur le climat. Occupation des sols, océanographie ou étude des glaces de mer par télédétection sont venus compléter la météorologie pour interpréter les signaux climatiques.

La climatologie doit aujourd'hui intégrer des facteurs anthropiques.

Le climat, longtemps perçu comme une « contrainte » ou un « atout » environnemental pour les sociétés, devient également un « élément de l'environnement » sur lequel agit la société. Les activités anthropiques génèrent des modifications locales à régionales du climat (îlots de chaleur urbain, îlots de douceur nocturne près des plans d'eau et lacs artificiels, ...), modifient et dégradent la qualité de l'air et génèrent des changements climatiques d'échelle planétaire.

Nous savons aujourd'hui que nos activités industrielles et agricoles transforment l'environnement à l'échelle globale. Nous savons que ces transformations affectent les processus climatiques qui déterminent notre cadre de vie en ce qu'il a de plus fondamental. Mais, en Afrique australe comme ailleurs, et surtout sous les tropiques, nous sommes encore incapables de faire des prévisions fiables et détaillées sur les conséquences de ces transformations. Pour mieux prévoir, pour mieux peser les risques de nos actions ou de notre inaction, il faut mieux comprendre. Les perspectives sont d'autant plus nombreuses que la compréhension actuelle paraît bien insuffisante lorsqu'elle est confrontée à la prévision du climat du ^{xxi} siècle.

Qualité de l'air, changement climatique, thématiques relativement récentes en climatologie participent de l'évolution de notre science et stimulent les collaborations avec des collègues météorologues, océanographes, chimistes ou hydrologues. Mais cette évolution signifie également que le climat, n'étant plus un objet strictement naturel, ne peut être étudié exclusivement en sciences de l'univers. Cette évolution thématique doit se traduire par une plus grande implication des sciences sociales en climatologie. Le climat actuel et de demain est aussi un produit des sociétés, un enjeu social (Peguy, 1989), presque un objet social.

Références bibliographiques

- ABBS D. J., PHYSICK W.L., 1992: Sea-breeze observations and modelling: a review. *Australian Meteorological Magazine*, **41**, 7-19.
- AGUADO E., BURT J.E., 1999: *Understanding Weather and Climate*. Prentice-Hall Inc., New Jersey, 474 pp.
- ALEXANDERSSON H., MOBERG A., 1997: Homogenization of Swedish temperature data. Part 1: Homogeneity test for linear trends. *Int. J. of Climatol.*, **17**, 25-34.
- ALLAN R.J., LINDESAY J.A., REASON C.J.C., 1995: Multidecadal variability in the climate system over the Indian Ocean Region during austral summer. *J. Climate*, **8**, 1853-1873.
- AN S.-I., WANG B., 2000: Interdecadal change of the structure of the ENSO mode and its impact on the ENSO frequency. *J. Climate*, **13**, 2044-2055.
- ANYAMBA A., EASTMAN J.R., 1996: Interannual variability of NDVI over Africa and its relation to El Niño / Southern Oscillation. *Int. J. Remote Sensing*, **17**, 2533-2548.
- ANYAMBA A., TUCKER C.J., MAHONEY R., 2002: From El Niño to La Niña: Vegetation response patterns over East and Southern Africa during the 1997-2000 period. *J. Climate*, **15**, 3096-3103.
- BART F., 1994 : Paysans et environnements montagnards au Rwanda – Dynamiques de dégradation et de recomposition sous forte pression démographique. In *Enregistreurs et indicateurs de l'évolution de l'environnement en zone tropicale*. Ed. R Maire, S Pomel & J.N. Salomon, Presses Universitaires de Bordeaux, France, 441-456.
- BAVAY R., ROUSSEL I., 1992: Conditions atmosphériques et pollution photo oxydante en Europe du Nord-Ouest : exemple de l'été 1989, *Pollution Atmosphérique*, **135**, 36-49.
- BEHERA S.K., YAMATAGA T., 2001: Subtropical SST dipole events in the southern Indian Ocean. *Geophysical Research Letters*, **28**, 327-330.
- BELTRANDO G., 1990: Variabilité interannuelle des précipitations en Afrique orientale (Kenya, Ouganda, Tanzanie) et relations avec la dynamique de l'atmosphère. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille I, Aix-en-Provence, 223 pp.
- BELTRANDO G., 2000: La climatologie: une science géographique. *L'information géographique*, **64**, SEDES n°3, 241-261.
- BELTRANDO G., CAMBERLIN P., 1992: Variabilité des précipitations dans la corne orientale de l'Afrique et indicateurs de la circulation atmosphérique indienne et pacifique. *Pub. Ass. Int. Climatologie*, **5**, 11-18.
- BELTRANDO G., CAMBERLIN P., 1993: Interannual variability of rainfall in the Eastern Horn of Africa and indicators of atmospheric circulation. *Int. J. of Climatol.*, **13**, 533-546.
- BELTRANDO G., CHEMERY L., 1995 : *Dictionnaire du climat*. Larousse, 344 pp.
- BENICHOU P., 1995: *Classification automatique de la configuration météorologique sur l'Europe occidentale*, Monographie n°8, Météo France, 93p.
- BERGER A., ANDJELIC T.P., 1988: Milutin Milankovitch, père de la théorie astronomique des paléoclimats. *Histoire & Mesure*, **III-3**, 385-402.
- BERGONZINI L., 1998 : Bilans hydriques de lacs (Kivu, Tanganyika, Rukwa et Nyassa) du rift Est-Africain. *Mus. Roy. Afr. Centr. Tervuren Belg. Annales Sciences Géologiques*, **103**, 183 pp.
- BERGONZINI L., 2002: Computed mean monthly water balance of a large lake: the case of Lake Tanganyika. J. Klerkx and B. Imanachunov (eds), *Lake Issyk-Kul: Its Natural Environment*, Kluwer Academic Publishers, 217-244.
- BEURK HUBBARD B., 2000: *Ondes et ondelettes. La saga d'un outil mathématique*. Belin, Pour la Science, 236 pp.
- BHALOTRA Y.P.R., 1984: Climate of Botswana; Part 1, Climatic Controls. Department. of Meteorological Services, Republic of Botswana.
- BHALOTRA Y.P.R., 1987: Climate of Botswana; Part 2, Elements of Climate. Department. of Meteorological Services, Republic of Botswana.

- BIDOU J.E., 1994 : Croissance de la population et mutations agraires au Burundi. Thèse de Doctorat, Université de Bordeaux III, 2 tomes.
- BLACK E., SLINGO J., SPERBER K.R., 2003: An observational study of the relationship between excessively strong short rains in coastal East Africa and Indian Ocean SST. *Monthly Weather Review*, **131**, 74-94.
- BOUCHER O., 1997: L'influence climatique des aérosols. *La Météorologie*, **17**, 11-22.
- CADET D.L., 1985: The Southern Oscillation over the Indian Ocean. *J. of Climatol.*, **5**, 189-212.
- BRUNETTI M., MAUGERI M., NANNI T., 2001: Changes in total precipitation, rainy days and extreme events in northeastern Italy. *Inter. J. of Climatol.*, **21**, 861-871.
- BUSUIOC A., VON STORCH H., SCHNUR R., 1999: Verification of GCM-Generated regional seasonal precipitation for current climate and of statistical downscaling estimates under changing climate conditions. *Journal of Climate*, **12**, 258-272.
- CAMBERLIN P., CHAUVIN P., DOUVILLE H, and ZHAO Y., 2003: Simulated ENSO-tropical rainfall teleconnections as from the ARPEGE-OPA coupled ocean-atmosphere model. *Clim. Dyn.*, soumis.
- CAMUS N., 2003 : *Détection de changements pluviométriques au xx^e siècle sur la Province du Nord (Afrique du Sud)*. Maîtrise, Dijon, 50 pp.
- CARTER T.R., 2001: Uncertainties assessing impacts regional climates. In : Brunet IM, Lopez Bonillo D. *Detecting and modelling regional climate change*. Tarragona : Springer, 441-469.
- CASSAGNE E., 2003: *Détection de changements pluviométriques au xx^e siècle dans la Province Est du Cap (Afrique du Sud)*. Maîtrise, Dijon, 50 pp.
- CHIPANSHI A.C., 1989: Analysis of rainfall probabilities to determine maize species suitability: an agrometeorological study of Zambia. *Singapore J. of Tropical Geography*, **10**, n°2, 110-118.
- CLARK C.O., COLE J.E., WEBSTER P.J., 2000: Indian ocean SST and Indian summer rainfall: predictive relationships and their decadal variability. *J. Climate*, **13**, 2503-2519.
- CLARK C.O., WEBSTER P.J., COLE J.E., 2003: Interdecadal variability of the relationship between Indian ocean zonal mode and East African coastal rainfall anomalies. *J. Climate*, **16**, 548-554.
- COMPAGNUCCI R.H., AGOSTA E.A., and VARGAS V.M., 2002: Climatic change and quasi-oscillations in central-west Argentina summer precipitation: main features and coherent behaviour with southern African region. *Climate Dynamics*, **18**, 421-435.
- COOK K.H., 2000: The South Indian convergence zone and interannual rainfall variability over Southern Africa. *J. Climate*, **13**, 3789-3804.
- COOK K.H., 2001: A southern Hemisphere Wave Response to ENSO with Implications for Southern Africa Precipitation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **58**, 2146-2162.
- CURRIE R.G., 1991: Deterministic signals in tree-rings from Tasmania, New Zealand and South Africa. *Ann. Geophysicae*, **9**, 71-81.
- CURRIE R.G., 1993: Luni-solar 18.6 and 10-11-year solar cycle signals on South African rainfall. *Int. J. of Climatol.*, **13**, 237-256.
- D'ABRETON P.C., 1992: *The dynamics and energetics of tropical-temperate troughs over southern Africa*. Phd, University of Witwatersrand, Johannesburg, 231 pp.
- D'ABRETON P.C., LINDESAY J.A., 1993: Water vapour transport over Southern Africa during wet and dry early and late summer months. *Int. J. of Climatol.*, **13**, 151-170.
- DEQUE M., DREVETON C., BRAUN A., CARIOLLE D., 1994: The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Clim. Dyn.*, **10**, 249-266.
- DIAB R.D., GARSTANG M., 1986: Classification of synoptic weather regimes in South Africa by discriminant analysis. Preprints of the second International conference on southern hemisphere Meteorology, 374-377.
- DIAB R.D., PRESTON WHYTE R.A., WASHINGTON R., 1991: Distribution of rainfall by synoptic type over Natal, South Africa. *Int. J. of Climatol.*, **11**, 877-888.
- DOMMENGET D., LATIF M., 2000: Interannual and decadal variability in the Tropical Atlantic. *J. Climate*, **13**, 777-792.

- DOUGUEDROIT A., NORRANT C., 2002: Annual and seasonal century-scale trends of the precipitation in the mediterranean area during the twentieth century. H. J. BÖLLE ed. Springer, 159-163.
- DOUGUEDROIT A., ZIMINA R.P. : 1987 : Le climat méditerranéen en France et en URSS. *Méditerranée*, **2-3**, 75-84.
- DURAND-DASTES F., 1969: *Géographie des airs*. P.U.F., 274p.
- DYER T.G.J., 1976: Meridional interactions between rainfall and surface pressure. *Nature*, **264**, 48-49.
- DYER T.G.J., 1977a: The assignment of rainfall stations into homogeneous groups. An application of principal component analysis. *Q. J. R. Met. Soc.*, **103**, 1005-1013.
- DYER T.G.J., 1977b: On the application of some stochastic models to precipitation forecasting. *Q. J. R. Met. Soc.*, **103**, 177-189.
- DYER T.G.J., 1979: Rainfall along the east coast of Southern Africa, the Southern Oscillation, and the latitude of the subtropical high pressure belt. *Q. J. R. Met. Soc.*, **105**, 445-451.
- DYER T.G.J., 1982: On the intra-annual variation in rainfall over sub-continent of Southern Africa. *J. of Climatol.*, **2**, 47-64.
- ELLIOTT J.R., JEWSON S.P., SUTTON R.T., 2001: The impact of the 1997/98 El Niño event on the Atlantic Ocean. *J. Climate*, **14**, 1069-1077.
- FAO-Unesco, 1976: *Carte mondiale des sols 1: 5 000 000*, Vol VI Afrique et légende, 307p.
- FARRAR T.J., NICHOLSON S.E., LARE A.R., 1994: The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture. *Remote Sensing Environ.*, **50**, 121-133.
- FAUCHEREAU N., 1999 : Variabilité pluviométrique et ressource en eau en République Sud Africaine. Mémoire de DEA, Dijon, 48p.
- FOLLAND C.K., PARKER D.E., KATES F.E., 1984: Worldwide marine temperature fluctuations 1856-1981. *Nature*, **310**, 610-673.
- FONTAINE B., 1990: Etude comparée des moussons indienne et ouest africaine: caractéristiques, variabilité et téléconnexions. Thèse d'Etat, Université de Bourgogne, Dijon, 511 pp.
- FOUCAULT A., 1993: *Climat - Histoire et avenir du milieu terrestre*. Fayard, Le temps des Sciences, 328 p.
- GAMBA N., 2003 : *Mesures du CO₂ atmosphérique en milieu urbain*. Mémoire de maîtrise, Dijon, 30 pp.
- GARCIA O., 1985: *Atlas of Highly Reflective Clouds for the global tropics 1971-1983*. U.S. Department of Commerce, NOAA, Environmental Research Laboratory.
- GARREAU R. D., BATTISTI D. S., 1999: Interannual (ENSO) and interdecadal (ENSO-like) variability in the southern hemisphere tropospheric circulation. *J. Climate*, **12**, 2113-2123.
- GATES W.L., 1992: The Atmospheric Model Intercomparison Project. *Bull. Meteor. Am. Sci.*, **73**, 1962-1970.
- GERVAIS-LAMBONY P., 1999: Nouvelle Afrique du Sud, nouveaux territoires, nouvelles identités? *L'Espace Géographique*, **2**, 99-109.
- GHATTAS B., 1998: Agrégation d'arbres de classification. *Revue de Statistiques appliquée*, **48**, 85-98.
- GIBBS W.J., 1987: Defining climate. *Bulletin de l'OMM*, **36**, **4**, 316-322.
- GONDWE P.M., JURY M.R., 1997: Sensitivity of vegetation (NDVI) to climate over Southern Africa, relationships with rainfall and OLR. *S. Afr. Geogr. J.*, **79**(1), 52-60.
- GRISOLANO M., 2003 : *Etude de la pollution urbaine : les émissions de dioxyde de carbone atmosphérique*. Mémoire de maîtrise, Dijon, 50 pp.
- GRUBER A., KRUEGER A.F., 1984: The status of NOAA outgoing longwave radiation dataset. *Bull. Am. Meteor. Soc.*, **65**, 958-962.
- GUILCHER A., 1982: Problèmes climato-océanographiques du désert côtier d'Angola, particulièrement à la baie des Tigres (16°35'S). *Noroi*, **116**, 507-517.
- GUTMAN G., 1989: On the relationship between monthly mean and maximum-value composite normalized vegetation indices. *Int. J. Remote Sensing*, **10**, 1317-1325.

- HANN J., 1908: Handbuch der Klimatologie, 3 , Stuttgart.
- HANSSEN-BAUER I., FORLAND E.J., 1994: Homogenizing long Norwegian precipitation series. *J. of Climate*, **7**, 1001-1013.
- HASTENRATH S., 1970: Diurnal variations of rainfall over Southern Africa. *Notos*, **19**, 85-94.
- HASTENRATH S., 1985: *Climate and circulation of the tropics*. D. Reil, Dordrecht, 455 pp.
- HASTENRATH S., GREISCHAR L., VAN HEERDEN J., 1995: Prediction of the summer rainfall over South Africa. *J. Climate*, **8**, 1511-1518.
- HAYES M.J., SVODOVA D., WILHITE D.A., VANYARKHO O.V., 1999: Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **80**, 429-438.
- HEINE K., 1988: Klimatvariabilität und bodenerodion in Südafrika. *Geographische Rundschau*, **H.12**, 6-14.
- HENIN C., HISARD P., PITON B., 1986: Programme Français Océan et Climat Atlantique équatorial (FOCAL). Ed. ORSTOM, Paris, 191 pp.
- HIRST A.C., HASTENRATH S., 1983: Atmosphere-ocean mechanisms of climate anomalies in the Angola-tropical Atlantic sector. *J. of Physical Oceanography*, **13**, 1146-1157.
- HOFFMAN T., TODD S., NTSHONA Z., and TURNER S., 1999: *Land Degradation in South Africa*. Cape Town.
- HOLBEN B.N., 1986: Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, **7**, 1417-1434.
- HUDSON D.A., HEWITSON B.C., 1997: Mid-latitudes cyclones south of Africa in the genesis GCM. *Int. J. of Climatol.*, **17**, 459-473.
- HUDSON D.A., JONES R.G., 2002: Simulations of present-day and future climate over Southern Africa using HadAM3H. Hadley Centre technical note 38, Bracknell, UK, 36p.
- HULME M., 1992: Rainfall changes in Africa: 1931-1960 to 1961-1990. *Int. J. of Climatol.*, **12**, 685-699.
- HULME M., ARNTZEN J., DOWNING T., LEEMANS R., MALCOLM J., REYNARD N., RINGROSE S., ROGERS D., CHIZIYA E., CONWAY D., JOYCE A., PAIN J., MARKHAM C. MULNEGA H., 1996: *Climate change in Southern Africa; an exploration of some potential impacts and implications in the SADC region*. Report to WWF International. University of East Anglia. Climate Research Unit and WWF International. Gland, Switzerland, 104p.
- IPCC, 2001: *Climate Change: the scientific basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the IPCC. Cambridge University Press, 881 p.
- ISMAÏL S.A., 1987: Long-range seasonal rainfall forecast for Zimbabwe and its relation with El Niño /Southern Oscillation (ENSO). *Theor. Appl. Climatol.* **38**, 93-102.
- JANICOT S., 1990 : Variabilité des précipitations en Afrique de l'ouest et circulations quasi stationnaires durant une phase de transition climatique. Thèse de doctorat, Université de Paris 6, Paris, 178 pp.
- JANICOT S., FONTAINE B., 1993: L'évolution des idées sur la variabilité interannuelle récente des précipitations en Afrique de l'ouest. *La Météorologie*, 8ème série, **1**, 23-53.
- JANICOT S., MORON V., FONTAINE B., 1996: Sahel droughts and ENSO dynamics. *Geophys. Res. Letters*, **23**, 515-518.
- JOUBERT A.M., 1997: Simulations by the atmospheric model intercomparison project of atmospheric circulation over Southern Africa. *Int. J. of Climatol.*, **17**, 1129-1154.
- JOUBERT A.M., TYSON P.D., 1996: Equilibrium and fully coupled GCM simulations of future Southern African climates. *South African Journal of Science*, **92**, 471-484.
- JOUSSAUME S., 1993: *Climat, d'hier à demain*. CNRS Editions, 143p.
- JURY M.R., 1992: A climatic dipole governing the interannual variability of convection over the SW Indian Ocean and SE Africa region. *Trends in Geophys. Res.* **1**, 165-172.
- JURY M.R., ENGERT S., 1999 : Teleconnections modulating inter-annual climate variability over Northern Namibia. *Int. J. of Climatol.*, **19**, 1459-1475.

- JURY M.R., MULENGA H.M., MASON S.J., 1999: Exploratory long-range models to estimate summer climate variability over Southern Africa. *J. Climate*, **12**, 1892-1899.
- JURY M.R., MULENGA H.M., RAUTENBACH H., 2000: Tropical Atlantic variability and Indo-Pacific ENSO: Statistical analysis and numerical simulation. *The Global Atmosphere and Ocean System*, **7**, 107-124.
- JURY M.R., PARKER B., WALISER D., 1994: Evolution of the ITCZ in the SW Indian Ocean: 1988-90. *Theor. Appl. Climatol.*, **48**, 187-194.
- JURY M.R., PATHACK B., WALISER D., 1993: Satellite OLR and microwave data as a proxy for summer rainfall over sub-equatorial Africa and adjacent oceans. *Int. J. of Climatol.*, **13**, 257-269.
- JURY M.R., WALISER D., 1990: Satellite microwave measurements of atmospheric water vapour and marine wind speed: case study application. *South African J. Marine Sci.*, **9**, 309-316.
- JUSTICE C.O., TOWNSHEND J.R.G., HOLBEN B.N., TUCKER C.J., 1985: Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *Int. J. Remote Sensing*, **6**, 1271-1318.
- KALNAY E, KANAMITSU M, KISTLER R, COLLINS W, DEAVEN D, GANDIN L, IREDELL M, SAHA S, WHITE G, WOOLLEN J, ZHU Y, CHELLIAH M, EBISUZAKI W, HIGGINS W, JANOWIAK J, MO KC, ROPELEWSKI C, WANG J, LEETMAA A, REYNOLDS R, JENNE R, JOSEPH D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society* **77**: 437-471.
- KANAMITSU M., EBISUZAKI W., WOOLLEN J., YANG S.-K., HNOLO J.J., POTTER G.L., 2002: NCEP-DOE AMIP-II reanalysis (R-2). *Bulletin of the American Meteorology Society*, 1631-1643.
- KLEIN S.A., 1999: Remote Sea surface temperature variations during ENSO: evidence for a tropical atmospheric bridge. *J. Climate*, **12**, 917-932.
- KRUGER A.C., 1999: The influence of the decadal-scale variability of summer rainfall on the impact of El Niño and La Niña events in South Africa. *Int. J. of Climatol.*, **19**, 59-68.
- LAMARQUE P., JOURDAIN S., 1994: Elaboration de longues séries climatiques homogènes pour l'étude de l'évolution climatique. *La Météorologie*, **7**, 61-68.
- LANDMAN W.A., MASON S.J., 1999: Change in the association between Indian ocean sea-surface temperatures and summer rainfall over South Africa and Namibia. *Int. J. of Climatol.*, **19**, 1477-1492.
- LE ROY LADURIE, 1967: Histoire du climat depuis l'an mil. Flammarion, 376 pp.
- LE TREUT H., 1997: Climat: pourquoi les modèles n'ont pas tord. *La Recherche*, **298**, mai, 68-73.
- LINDESAY J.A., 1988: South African rainfall, the Southern Oscillation and a southern hemisphere semi-annual cycle. *J. of Climatol.*, **8**, 17-30.
- LONG N. 2000 : *Le dioxyde d'azote sur l'agglomération dijonnaise en hiver 1999 Développement d'un SIG set influence des conditions météorologiques*. Mémoire de DEA, Dijon, 50 pp.
- LORIUS C., 1991 : *Les glaces de l'Antarctique*. Odile Jacob, Paris.
- LOS S.O., JUSTICE C.O., TUCKER C.J., 1994: A global 1° by 1° NDVI data set for climate studies derived from the GIMMS continental NDVI data. *Int. J. Remote Sensing*, **15**, 3519-3546.
- LYONS S.W., 1991: Origins of convective variability over equatorial Southern Africa during austral summer. *J. Climate*, **4**, 23-39.
- MAKARAU A., 1995: Intra-seasonal oscillatory modes of the southern Africa summer circulation. PhD Thesis. Dept Oceanography, Univ Cape Town.
- MAKARAU A., JURY M.R., 1997: Predictability of Zimbabwe summer rainfall. *Int. J. Climatol.*, **17**, 1432-1432.
- MARCEAU J., TABOULOT S., AUBERT J.-C., 1994: *Atlas climatique de la Côte d'Or*. Météo-France, Conseil Général de la Côte d'Or, 127p.
- MASON S.J., 1990: Temporal variability of sea surface temperature around Southern Africa: a possible forcing mechanism for the 18-year rainfall oscillation? *South African J. of Sc.*, **86**, 243-252.
- MASON S.J., 1992: *Sea surface temperature and South African rainfall variability*. Phd, University of Witwatersrand, Johannesburg, 235 pp.

- MASON S.J., 1995: Sea-surface temperature - South African rainfall associations, 1910-1989. *Int. J. of Climatol.*, **15**, 119-135.
- MASON S.J., 1996: Climatic change over the Lowveld of South Africa. *Climatic Change*, **32**, 35-54.
- MASON S.J., LINDESAY J.A., 1993: A note on the modulation of Southern Oscillation - Southern African rainfall associations with the Quasi-Biennial Oscillation. *J. of Geophys. Res.*, **98**, 8847-8850.
- MASON S.J., WAYLEN P.R., NIMMACK G.M., RAJARATNAM B., HARRISON M., 1999: Changes in extreme rainfall events in South Africa. *Climatic Change*, **41**, 249-257.
- MATARIRA C.H., 1988. A diagnostic study of atmospheric circulation changes associated with rainfall anomalies over SE central Africa, PhD thesis, University of Thessaloniki, Greece, 183 pp.
- MATARIRA C.H., 1990a: Drought over Zimbabwe in a regional and global context. *Int. J. Climatol.*, **10**, 609-625.
- MATARIRA C.H., 1990b: Frequency and tracks of anticyclones and their effect on rainfall patterns over Zimbabwe. *Theor. Appl. Climatol.*, **42**, 53-66.
- MATARIRA C.H., 1990c: Precipitation characteristics during Zimbabwe's rainy season. *Zimbabwe Sci. Nexs.*, **4/6**, 36-39.
- MATARIRA C.H., FLOCAS A.A., 1989: Spatial and temporal rainfall variability over SE central Africa during extremely dry and wet years. *J. Meteorol.*, **14**(135), 3-9.
- MATARIRA C.H., JURY M.R., 1992: Contrasting meteorological structure of intra-seasonal wet and dry spells in Zimbabwe. *Int. J. of Climatol.*, **12**, 165-176.
- MEGIE G., 1989: *Ozone, l'équilibre rompu*. Presses du CNRS, 257p.
- MESTRE O., 2000 : *Méthodes statistiques pour l'homogénéisation de longues séries climatiques*. Thèse de l'Université Paul Sabatier, Toulouse, 225 pp.
- MIHAILESCU I.F., 1986 : Particularités de la répartition des précipitations atmosphériques dans la Dobroudja du Sud (Roumanie). *Freiburg Geo. Hefte, Freiburg, Heft*, 342-351.
- defining regions. *J. Climate*, **14**, 2790-2797.
- MINOURA H., 1999: Some characteristics of surface ozone concentrations observed in an urban atmosphere. *Atmospheric Research*, **51**, 153-169.
- MINSTER J.-F., 1994: Les océans. *Dominos Flammarion*, 33, 126 pp.
- MISRA V., 2003: The influence of Pacific SST variability on the precipitation over Southern Africa. *J. Climate*, **16**, 2408-2418.
- MISTRY V.V., CONWAY D., 2002: Remote forcing of East African rainfall and relationships with fluctuations in levels of Lake Victoria. *Inter J. of Climatol*, **23**, 67-89.
- NASH D.J., ENDFIELD G.H., 2002: A 19th century climate chronology for the Kalahari region of central Southern Africa derived from missionary correspondence. *Inter J. of Climatol*, **22**, 821-841.
- NEW M., HULME M., JONES P., 1999: Representing twentieth-century space-time climate variability. Part I: development of a 1961-90 mean monthly terrestrial climatology. *J. Climate*, **12**, 829-856.
- NEW M., HULME M., JONES P., 2000: Representing twentieth-century space-time climate variability. Part II: development of 1901-96 monthly grid of terrestrial surface climate. *J. Climate*, **13**, 2217-2238.
- NICHOLSON S.E., 1986a: The spatial coherence of african rainfall anomalies: interhemispheric teleconnections. *J. Climate and Applied Climatol.*, **25**, 1365-1381.
- NICHOLSON S.E., 1986b: The Nature of rainfall variability in Africa south of the equator. *J. of Climatol.*, **6**, 515-530.
- NICHOLSON S.E., 1989: Rainfall variability in southern Africa and its relationship to ENSO and the Atlantic and Indian oceans. *Proc. 3rd Int. Conf.S. Hem. Met. and Oceanogr. Buenos Aires: Amer Met. Soc.*, 366-367.
- NICHOLSON S.E., 1997: An analysis of the ENSO signal in the tropical Atlantic and western Indian oceans. *Int. J. Climatol.*, **17**, 345-375.

- NICHOLSON S.E., ENTEKHABI D., 1987: Rainfall variability in equatorial and southern Africa: Relationships with sea surface temperatures along south-western coast of Africa. *J. Climate and Applied Meteorology*, **26**, n°5, 561-578.
- NICHOLSON S.E., FARRAR T.J., 1994: The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. I. NDVI response to rainfall. *Remote Sensing Environ.*, **50**, 107-120.
- NICHOLSON S.E., KIM J., 1997: The relationship of the ENSO to African rainfall. *Int. J. Climatol.*, **17**, 117-135.
- NICHOLSON S.E., LEPOSO D., GRIST J., 2001: The relationship between El Niño and drought over Botswana. *J. Climate*, **14**, 323-335.
- NICHOLSON S.E., NYENZI B.S., 1990: Temporal and spatial variability of SSTs in the tropical Atlantic and Indian oceans. *Met. Atmos. Phys.*, **42**, 1-17.
- NICHOLSON S.E., SELATO J.C., 2000: The influence of la Niña on African rainfall. *Int. J. Climatol.*, **20**, 1761-1776.
- NIEUWOLT S., 1972: Rainfall variability in Zambia. *Singapore J. of Tropical Geography*, **34**, june, 44-57.
- NORRANT C., DOUGUEDRIT A., 2003: Tendances récentes des précipitations et des pressions de surface dans le Bassin méditerranéen. *Annales de géographie*, 631, 298-305.
- OGALLO L.J., 1989: The spatial and temporal patterns of the east African seasonal rainfall derived from principal component analysis. *Inter J of Climatol.*, **9**, 145-167.
- PAGNEY P., PEGUY C.-P., 1972: Climatologie : deux perspectives. *Recherches Géographiques en France*. Comité National de Géographie Français, 135-144.
- PAILLEUX J., GELEYN J.-F., LEGRAND E., 2000: La prévision numérique du temps avec les modèles ARPEGE et ALADIN. *La Météorologie*, **30**, 32-60.
- PALMER T.N., ANDERSON D.L.T., 1994: The prospects for seasonal forecasting - a review paper. *Q. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **112**, 613-638.
- PAPAI S., FONTAN J., LASSERRE-BIGORRY A., PONT V., 1998: Analyse de la pollution photochimique en France pendant l'année 1996. *Pollution Atmosphérique*, juillet-septembre, 82-93.
- PEDELABORDE P., 1957 : *Le climat du Bassin Parisien*, Paris, Ed. Génin, 539 pp, + atlas.
- PEGUY C.P., 1989: Jeux et enjeux du climat. Masson, 254 pp.
- PERROT Y., 2002 : *Les oxydes d'azote et l'ozone en Bourgogne*. Mémoire de DEA, Dijon, 50 pp.
- PHILIPPON N., 2002 : *Une nouvelle approche pour la prévision statistique des précipitations saisonnières en Afrique de l'Ouest et de l'Est : méthodes, diagnostics (1968-1998) et applications (2000-2001)*. Thèse de doctorat en géographie, Université de Dijon.
- PICAUT J., SERVAIN J., BUSALACCHI A.L., SEVA M., 1984: Interannual variability versus seasonal variability in the tropical Atlantic. *Geophys. Res. Letters*, **11**, 787-790.
- PLANCHON O. 1997: Les climats maritimes dans le Monde. Thèse, Dijon, Presses Universitaires du Septentrion, Villeneuve d'Ascq, 233 pp.
- POCCARD I., 1995 : *Modes de variabilité saisonniers et interannuels de la convection sur l'Afrique tropicale*. Mémoire de maîtrise, Dijon, 50 pp.
- POCCARD I., 1996: *Approche des relations entre NDVI, pluie et OLR en Afrique*. Mémoire de DEA, Dijon, 50 pp.
- POCCARD I., 2000 : *Etude diagnostique de nouvelles données climatiques : les réanalyses*. Exemples d'application aux précipitations. Thèse de Doctorat, Université de Bourgogne, Dijon, 217 pp.
- POCCARD I, JANICOT S, CAMBERLIN P., 2000: Comparison of Rainfall Structures between NCEP/NCAR Reanalyses and observed data over tropical Africa. *Climate Dynamics*, **16**, 897-915.
- POTTS J.M., FOLLAND C.K., JOLIFFE I.T., SEXTON D., 1996: Revised LEPS scores for assessing climate model simulations and long-range forecasts. *Journal of Climate*, **9**, 34-53.
- PRINCE S.D., ASTLE W.L., 1986: Satellite remote sensing of rangelands in Botswana. I. Landsat MSS and herbaceous vegetation. *Int. J. Remote Sensing*, **7**, 1533-1553.

- PRINCE S.D., TUCKER C.J., 1986: Satellite remote sensing of rangelands in Botswana. II. NOAA AVHRR and herbaceous vegetation. *Int. J. Remote Sensing*, **7**, 1555-1570.
- REASON C.J.C., 1998: Warm and cold events in the southeast Atlantic / southwest Indian Ocean region and potential impacts on circulation and rainfall over southern Africa. *Meteorology and Atmospheric Physics*, **69**, 49-65.
- REASON C.J.C., 1999: Interannual warm and cool events in the subtropical/mid-latitude South Indian Ocean region. *Geophysical Res. Letters*, **26**, 215-218.
- REASON C.J.C., 2000: Multidecadal climate variability in the subtropics / midlatitudes of the Southern Hemisphere oceans. *Tellus*, **52A**: 203-223.
- REASON C.J.C., 2001: Subtropical Indian Ocean SST dipole events and Southern African rainfall. *Geophysical Research Letters*, **28**, 2225-2227.
- REASON C.J.C., 2002: Sensitivity of the Southern African circulation to dipole sea-surface temperature patterns in the South Indian Ocean. *Inter J. of Climatol*, **22**, 377-393.
- REASON C.J.C., ALLAN R.J., LINDESAY J.A., and ANSELL T.J., 2000: ENSO and climatic signals across the Indian Ocean basin in the global context: Part I, Interannual composite patterns. *Int. J. Climatol.*, **20**, 1285-1327.
- REASON C.J.C., LUTJEHARMS J.R.E., 1998: Variability of the south Indian Ocean and implications for southern African rainfall. *South african J. of Sc.*, **94**, 115-123.
- REASON C.J.C., MULENGA H., 1999: Relationships between South African rainfall and SST anomalies in the South West Indian Ocean. *Inter J. of Climatol*, **19**, 1651-1673.
- REASON C.J.C., ROUAULT M., 2002: ENSO-like decadal variability and South African rainfall. *Geophys. Res. Lett.*, **29**, 10.1029.
- RICHARD Y., 1988: *Etude statistique de la pollution atmosphérique en dioxyde de soufre dans la région d'Aix-Marseille*. Mémoire de D.E.A., Université d'Aix-Marseille II, Aix-en-Provence, 49p.
- RICHARD Y., 1993: Relations entre la variabilité pluviométrique en Afrique australe tropicale et les champs de surface océanique des océans Indien et Atlantique. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille I, Aix-en-Provence, 248 pp + 200 Fig.
- RINGROSE S., MATHESON W., 1991: A Landsat analysis of range conditions in the Botswana Kalahari drought. *Int. J. Remote Sensing*, **12**, 1023-1051.
- ROBESON S.M., STEYN D.G., 1990: Evaluation and comparison of statistical forecast models for daily maximum ozone concentrations. *Atmospheric Environment*, **24B**, 303-312.
- ROCHA A., 1992: The influence of global SST on Southern African summer climate. Phd Thesis, University of Melbourne, Australia, 249p.
- ROCHA A., SIMMONDS I., 1997a: Interannual variability of south-eastern african summer rainfall. Part 1: Relationships with air-sea interaction processes. *Inter J. of Climatol.*, **17**, 235-265.
- ROCHA A., SIMMONDS I., 1997b: Interannual variability of south-eastern african summer rainfall. Part 2: Modelling the impact of Sea-Surface Temperatures on rainfall and circulation. *Inter J. of Climatol.*, **17**, 267-290.
- ROUAULT M., FLORENCHIE P., FAUCHEREAU N., REASON C.J.C., 2003: South East tropical Atlantic warm events and southern African rainfall. *Geophysical Research Letters*, **30**, 8009.
- ROUCOU P. ARAGAO J.O.R., HARZALLAH A., FONTAINE B., and JANICOT S., 1996: Vertical motion changes related to North-East Brazil rainfall variability: a GCM study. *International Journal of Climatology*, **16**, 879-891.
- ROYER J.-F., CARIOLLE D., CHAUVIN F., *et al.*, 2002 : Simulation des changements climatiques au cours du XXI^e siècle incluant l'ozone stratosphérique. *C. R. Géoscience*, **334** (3) : 147-154.
- SAJI N. H., GOSWAMI B. N., VINAYACHANDRAN P. N., YAMAGATA T., 1999: A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, **401**, 360-363.
- SERVAIN J., PICAUT J., BUSULACCHI A.J., 1985: Interannual and seasonal variability of the tropical Atlantic ocean depicted by sixteen years of sea surface temperature and wind stress. J.C.J. Nihoul, Ed., Coupled Ocean Atmosphere Models, 211-237.

- SEWELL R.D., LANDMAN W.A., 2001: Indo-Pacific relationships in terms of Sea-Surface Temperature variations. *Inter. J. of Climatol.*, **21**, 1518-1528.
- SHARON D., 1981: The distribution in space of local rainfall in the Namib desert. *J. of Climatologie*, **1**, 69-75.
- SHINODA M., KAWAMURA, R., 1996: Relationships between rainfall over semi-arid Southern Africa and geopotential heights and sea surface temperatures. *J. Meteorol. Soc. Japan*, **74**, 21-36.
- SICHINGABULA H.M., 1998: Rainfall variability, drought and implications of its impacts on Zambia, 1886-1996. Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, November 1998, IAHS Publ. No. 252, 125-134.
- SLONOSKY V.C., JONES P.D., DAVIES T.D., 1999: Homogenization techniques for European monthly mean surface pressure series. *J. of Climate*, **12**, 2658-2672.
- SMAKHTINA O., 1998: Historical changes in rainfall pattern in the Eastern Cape Province, South Africa. Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998, IAHS Publ. No. 252, 135-142.
- SUPPIAH R., HENNESSY K.J., 1998: Trends in total rainfall, heavy rain events and number of dry days in Australia, 1910-1990. *International Journal of Climatology*, **10**, 1141-1164.
- SUTCLIFFE, PARKS, 1999: *The hydrology of the Nile*. IAHS special publication, **5**, 179 pp.
- TALJAARD J.J., 1986: Change of rainfall distribution and circulation patterns over Southern Africa in summer. *J. of Climatol.*, **6**, 579-592.
- THERON G.F., 1990: Annual and semi-annual cycles in atmospheric circulation patterns over South Africa, 1968-1977. Unpublished MSc Dissertation, University of the Witwatersrand, 94 pp.
- THIBON C., 1992 : Politiques de l'environnement dans la région des grands lacs. In *Afrique Contemporaine*, 230-238.
- TODD M., WASHINGTON R., 1998: Extreme daily rainfall in southern African and southwest Indian Ocean tropical-temperate links. *S. Afr. J. Sci.*, **94**, 64-70.
- TODD M., WASHINGTON R., 1999: Circulation anomalies associated with tropical-temperate troughs in southern Africa and the south west Indian Ocean. *Clim. Dyn.*, **15**, 937-951.
- TORRENCE C., COMPO G.P., 1998 : A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **79**, 61-78.
- TOWNSHEND J.R.G., JUSTICE C.O., 1986: Analysis of the dynamics of African vegetation using the NDVI. *Int. J. Remote Sensing*, **7**, 1435-1445.
- TRENBERTH K.E., HURREL J.W., 1994: Decadal atmosphere-ocean variations in the Pacific. *Clim. Dyn.*, **9**, 303-319.
- TRENBERTH K.E., STEPANIAK D.P., HURREL J.W., 2001 : Quality of Reanalyses in the tropics. *J. Climate*, **14**, 1499-1510.
- 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, Dijon, Université de Bourgogne, 379 pp.
- TRZASKA S., MORON V., FONTAINE B., 1996: Global atmospheric response to specific linear combinations of the main SS TODD M., WASHINGTON R., 1998: Extreme daily rainfall in southern African and southwest Indian Ocean tropical-temperate links. *S. Afr. J. Sci.*, **94**, 64-70.
- TUCKER C. ., VANPRAET C.L., SHARMAN M.J., VAN ITTERSUM G., 1985: Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the senegalesse sahel: 1980-1984. *Remote Sensing Environ.*, **17**, 233-249.
- TYSON P.D., 1971: Spatial variation of rainfall spectra in South Africa. *Annals of the Association of American Geographers*, Lawrence Texas, 711-720.
- TYSON P.D., 1981: Atmospheric circulation variations and the occurrence of extended wet and dry spells over southern Africa. *J. of Climatol.*, **1**, 115-130.
- TYSON P.D., 1984: The atmospheric modulation of extended wet and dry spells over South Africa, 1958-1978. *J. of Climatol.*, **4**, 621-635.

- TYSON P.D., 1986: *Climatic change and variability in Southern Africa*. Cape Town, Oxford University Press, 220 pp.
- UNGANAI L.S., MASON S.J., 2002: Long-range predictability of Zimbabwe summer rainfall. *Int. J. Climatol.*, **22**, 1091-1103.
- VAN HEERDEN J., TERBLANCHE D.E., SCHULZE G.C., 1988: The Southern Oscillation and South African summer rainfall. *J. of Climatol.*, **8**, 577-597.
- VAN LANGENHOVE G., AMAKALI M., DE BRUINE B., 1998: Variability of flow regimes in Namibian rivers: natural and human induced causes. Proceedings of the Abidjan'98 Conference held at Abidjan, Côte d'Ivoire, Novembre 1998, IAHS Publ. No. 252, 455-462.
- VAN REGENMORTEL G., 1995: Regionalization of Botswana rainfall during the 1980s using PCA. *Int. J. of Climatol.*, **15**, 313-323.
- VAUTARD R., BEEKMANN M., ROUX J., GOMBERT D., 2000: Validation of a deterministic forecasting system for the ozone concentrations over Paris area. *Atmospheric Environment*, submit.
- VEENENDAAL E.M., ERNST W.H.O., MODISE G.S., 1996: Effect of seasonal rainfall pattern on seeding emergence and establishment of grasses in a savanna in south-eastern Botswana. *J. of Africa Environ.*, **52**, 305-317.
- VENEGAS S., MYSAK, L.A., 1997: Atmosphere-Ocean Coupled Variability in the South Atlantic. *Journal of Climate*, **10**, 2904-2920.
- VENZSKE S., ALLEN M.R., SUTTON R.T., ROWELL D.P., 1999: The atmospheric response over the North Atlantic to decadal changes in Sea Surface Temperature. *Journal of Climate*, **12**, 2562-2584.
- VERGEZ G., 1999: *Prévisions des pointes d'ozone dans l'agglomération lyonnaise*. Note de travail de l'Ecole Nationale de la Météorologie, n°669, 92p.
- VON STORCH H., ZORITA E., CUBASCH U., 1993: Downscaling of global climate change estimates to regional scales: an application to Iberian rainfall in wintertime. *Journal of Climate*, **6**, 1161-1171.
- WALKER N.D., 1987: Interannual sea surface temperature variability and associated atmospheric forcing within the Benguela system. *South African J. of Marine Science*, **5**, 121-132.
- WALKER N.D., 1989: Sea surface temperature-rainfall relationships and associated ocean-atmosphere coupling mechanisms in the Southern Africa region. C.S.I.R. research report 683, Stellenbosch, South Africa, 173 pp.
- WALKER N.D., 1990: Links between South African summer rainfall and temperature variability of the Agulhas and Benguela system. *J. Geophys. Res.*, **95** (C3), 3297-3319.
- WALKER N.D., LINDESAY J.A., 1989: Preliminary observations of oceanic influences on the february-march 1988 floods in the central South Africa. *South African J. of Science*, **85**, 164-169.
- WALKER N.D., MEY R.D., 1986: Preliminary observations of seasonal and interannual heat fluxes of the agulhas current and its retroflexion region. Preprints of the second International conference on southern hemisphere Meteorology, 396-399.
- WALKER N.D., TAUNTON-CLARK J., PUGH J., 1984: Sea temperatures off the south african west coast as indicators of Benguela warm events. *South African J. of Science*, **80**, 72-77.
- WANG X.L., ROPELEWSKI C.F., 1995: An assessment of ENSO-Scale secular variability. *J Climate*, **8**, 1594-1599.
- WANG B., WANG Y., 1996: Temporal structure of the southern oscillation as revealed by waveform and wavelet analysis. *J Climate*, **9**, 1586-1598.
- VAN ZINDEREN BAKKER E.M., 1976: The evolution of late-quaternary paleoclimates of southern Africa. *Palaeoecology of Africa*, **9**, 160-202.
- WARD M.N., FOLLAND C.K., 1991: Prediction of seasonal rainfall in the north nordeste of Brazil using eigenvectors of sea-surface temperature. *Int. J. of Climatol.*, **11**, 711-743.
- WASHINGTON R., TODD M., 1999: Tropical-temperate links in southern african and southwest Indian ocean satellite-derived daily rainfall. *Int. J. of Climatol.*, **19**, 1601-1616.
- WAYLEN P., HENWORTH S., 1996: A note on the timing of precipitation variability in Zimbabwe as related to the southern oscillation. *Int. J. of Climatol.*, **16**, 1137-1148.

- WEARE B., NASSTROM J.S., 1982: Examples of extended empirical orthogonal function analyses. *Monthly Weather Review*, **110**, 481-485.
- WHITE F., 1986: La végétation de l'Afrique. Mémoire accompagnant la carte de végétation de l'Afrique. UNESCO/AETFAT/UNSO, Orstom Unesco, Paris, 384p.
- WOODRUFF S.D., SLUTZ R.J., JENNE R.L., STEURER P.M., 1987: A comprehensive ocean-atmosphere data set. *Bull. Am. Met. Soc.*, **68**, n°10, 1239-1250.
- WRIGHT P.B., 1989: Homogenized long-period Southern Oscillation indices. *Int. J. of Climatol.*, **9**, 33-54.
- XIE P., ARKIN P.A., 1996: Analyses of global monthly precipitation using gauge observations, satellite estimates, and numerical model predictions. *J. Climate*, **9**, 840-858.
- YOUNG K.C., 1993: Detecting removing inhomogeneities from long-term monthly sea level pressure times series. *J. of Climate*, **6**, 1205-1220.
- ZINYOWERA M.C., UNANGAI S.L., 1992: Drought in Southern Africa: An Update on the 1991-92 drought. *Drought Network News*, Oct., **4**, n°3, 3-4.

Table des figures

Chapitre 1 : Aspects spatiaux et saisonniers de la variabilité pluviométrique

Figure 1 : Complexité des crises alimentaires en Afrique australe : l'exemple de 2002.

Figure 2 : Principaux barrages répertoriés en Afrique du Sud.

Figure 3 : Transferts entre bassins versants en Afrique australe.

Figure 4 : Extension spatiale du SPI 6 mois fin avril lors des 10 années les plus sèches en Afrique du Sud (1920-1990).

Figure 5 : Indices de dégradation en RSA.

Figure 6 : Carte du bassin de l'Okavango.

Figure 7 : Photographie aérienne dans le bassin de l'Okavango.

Figure 8 : Les pluies de l'été 2002-2003 au Mozambique et une de leurs conséquences.

Figure 9 : Cohérence inter mensuelle des scores obtenus sur le premier axe d'une ACP étendue portant sur les précipitations mensuelles en RSA (1920-1999).

Figure 10 : Composante temporelle du premier axe d'une ACP étendue portant sur les précipitations mensuelles en RSA (1920-1999) et événements ENSO/LNSO.

Figure 11 : corrélations entre les précipitations d'octobre et celles de décembre-avril (1920-1999).

Chapitre 2 : Variabilité interannuelle

Figure 12 : Coefficients de détermination entre précipitations et NDVI.

(Points de grille de 1° côté, 1983-1988).

Figure 13 : Corrélations entre la TSO et les précipitations de janvier-mars en Afrique australe (1950-1969).

Figure 14 : Indices Standardisés de Précipitations (SPI) en RSA pour octobre-décembre.

Figure 15 : Parts de variance des précipitations saisonnières forcées par les TSO.

Figure 16 : Précipitations moyennes mensuelles en mm (NCEP 1948-1997).

Chapitre 3 : Variabilité décennale

Figure 17 : Evolution de ΔH^* sur le Tanganyika (1932-1994).

Figure 18 : Précipitations comparées des périodes 1932-1961 et 1962-1990 pour huit régions climatiques au sein et autour du bassin du lac Tanganyika.

Figure 19 : Ondelettes sur la série pluviométrique SARI.

Figure 20 : Ondelettes sur la série pluviométrique SARI exprimée en anomalies par mois.

Figure 21 : Puissance spectrale locale des ondelettes dans 4 bandes de longueur d'onde.

Figure 22 : Précipitations de janvier-mars en Afrique australe.

Figure 23 : Anomalies pluviométriques lors des cinq janvier-mars les plus secs.

Figure 24 : Différence des pressions standardisées de Tahiti et de Darwin (1900-1999).

Figure 25 : TSO standardisée de janvier-mars dans le sud-ouest de l’océan indien.

Figure 26 : Anomalies de TSO imposées à ARPEGE/Climat (mois de mars).

Figure 27 : Précipitations calculées par ARPEGE/climat en mars.

Figure 28 : Evolution des corrélations entre SARI et SOI. Décembre-avril 1900-1998 - fenêtres glissantes de 20 ans.

Chapitre 4 : Changement climatique ?

Figure 29 : Carte générale de RSA avec nouvelle nomenclature.

Figure 30 : RSA : Province du Nord.

Figure 31 : Tests de Spearman sur 30 séries pluviométriques (novembre-mai 1920-1999) de la Province Est du Cap.

Figure 32 : Ressources en eau et accès à cette ressource.

Figure 33 : Précipitations de janvier-mars.

Figure 34. Corrélations entre un indice de précipitations “Afrique australe” et la pression au niveau de la mer.

Figure 35. Précipitations sud-africaines pour 2070-2099 (MCG ARPEGE/OPA, scénario B2) en % par rapport aux précipitations de 1970-1999.

Figure 36. Première paire de l’analyse canonique des corrélations entre pression au niveau de la mer et précipitations dans la simulation B2 ARPEGE/OPA (1970-1999).

Chapitre 5 : Dobroudja et Bourgogne

Figure 37 : ACP sur les précipitations moyennes mensuelles de 29 stations de Dobroudja.

Figure 38 : Ecart pluviométrique par rapport à l’indice régional.

Figure 39 : Régressions cubiques entre les précipitations et la distance à la Mer.

Figure 40 : Bourgogne orientale : topographie et réseau de stations utilisés.

Figure 41 : Premier plan factoriel d’une ACP portant sur des valeurs quotidiennes d’ozone, d’oxydes d’azotes et météorologique (avril-septembre 1998).

Figure 42 : Prévisibilité de la valeur maximale d’ozone pour le lendemain.

Figure 43 : Prévisions de la valeur maximale d’ozone pour le lendemain.

Acronymes

ACI : Action Concertée Incitative
ACP : Analyse en Composantes Principales (CP Composante Principale)
ALADIN : Aire Limitée, Adaptation Dynamique, Développement International
AMIP : Atmospheric Model Intercomparison Project
ARPEGE : Action de Recherche Petite Echelle Grande Echelle
ATMOSF'air : nom des deux réseaux de surveillance de la qualité de l'air en Bourgogne
CEA : Centre Energie Atomique
CMAP : Climate prediction centre Merge Analysis Precipitation
COADS : Comprehensive Ocean Atmosphere DataSet
CNRM : Centre National de Recherches Météorologiques
CNRS : Centre National de la Recherche Scientifique
CRC : Centre de Recherche de Climatologie
DOE : Department Of Energy
ECLAT : Etude du Climat de l'Atlantique Tropical
ECMWF : European Centre for Medium-Range Weather Forecasts
ENSO : El Niño Southern Oscillation
FOCAL : Français Océan et Climat Atlantique équatorial
GDR : Groupement De Recherche
GES : Gaz à Effet de Serre
GIEC : Groupe Intergouvernemental des Experts du Climat (IPCC en anglais)
GISST : Global Interpolated Sea Surface Temperatures
HDR : Habilitation à Diriger des Recherches
HRC : High Reflective Clouds
IPCC : Intergovernmental Panel on the Global Change (GIEC en français)
ISRA : Institut Sénégalais de Recherche Agronomique
LAURE : Loi sur l'Air et l'Utilisation Rationnelle de l'Energie
LEPS : Linear Error in Probability Space
LMD : Laboratoire de Météorologie Dynamique
LNSO : La Niña Southern Oscillation
LOTI : L'Océan Tropical Indien
MCG : Modèle de Circulation Générale
MCGA : Modèle de Circulation Générale de l'Atmosphère
MNT : Modèle Numérique de Terrain
NAO : North Atlantic Oscillation
NCAR : National Center for Atmospheric Research
NCEP/NCAR : National Centers for Environmental Prediction
NDVI : Normalized Difference Vegetation Index
OLR : Outgoing Longwave Radiation
OMM : Organisation Météorologique Mondiale
OPA : Océan Parallélisé.
PDU : Plan de Déplacement Urbain
PICS : Programme International de Coopération Scientifique
PM : Pression au niveau de la Mer
PNEDC : Programme National d'Etude de la Dynamique du Climat
QBO : Quasi Biennial Oscillation
RESUPADI : REseau de SURveillance de la qualité de l'air Pour l'Agglomération Dijonnaise
RSA : République Sud Africaine
SARI : Southern African Rainfall Index
SAWS : South African Weather Service
SDU : Sciences de l'Univers
SHS : Sciences de l'Homme et de la Société
SIG : Système d'Information Géographique
SPI : Indice Standardisé de Précipitations
SRES : Special Report on Emissions Scenarios
THEMA : THEoriser et Modéliser pour Aménager
TSO : Température de Surface Océanique
UKMO : United Kingdom Meteorological Office
ZCIT : Zone de Convergence InterTropicale

Résumé

Note : Les chapitres 1 à 4 concernent l'Afrique, et essentiellement l'Afrique australe

Chapitre 1 : Aspects spatiaux et saisonniers de la variabilité pluviométrique

Excédents et déficits pluviométriques sont en priorité liés à des modifications de l'amplitude du régime pluviométrique saisonnier. La variabilité interannuelle s'inscrit dans un cadre spatial contraint par les régimes pluviométriques moyens. Néanmoins, certaines saisons sont plus propices au développement d'anomalies généralisées. Tel est le cas des short rains en Afrique de l'Est. Les anomalies pluviométriques majeures interviennent lors de la saison des pluies mais ne revêtent pas un caractère homogène. En Afrique du Sud, Octobre se distingue nettement, de par le signe de l'anomalie pluviométrique, de la suite de la saison des pluies.

Chapitre 2 : Variabilité interannuelle

En Afrique australe, les anomalies pluviométriques ont un impact sur la végétation d'autant plus important que l'on se situe en milieu steppique, milieu où les données satellites de type NDVI sont les mieux à même de rendre compte des excédents et déficits en pluies. Les anomalies pluviométriques d'Afrique australe sont très liées à l'océan Indien et à l'ENSO, mais relativement indépendantes de l'océan Atlantique tropical sud. La convection profonde témoigne de modifications dans le cadre de la circulation divergente est-ouest, sur l'océan Indien comme sur le Pacifique. Aux latitudes subtropicales les anomalies de la circulation atmosphérique observées simultanément dans le sud-ouest des bassins indien et atlantique modulent également la pluviométrie.

Chapitre 3 : Variabilité décennale

La relation existant entre les variations du niveau du lac Tanganyika et la pluviométrie sur le bassin versant met en évidence un changement d'échelle décennale. Depuis l'année 1961, on note une plus grande efficacité des pluies liée en partie à une installation plus précoce de la saison des pluies. Les structures spatiales de variabilité pluviométriques se sont modifiées dans les années soixante. En Afrique australe elles deviennent plus fortes. Ces éléments sont à mettre en relation avec le phénomène ENSO, plus fréquent et de plus forte amplitude ainsi qu'avec le réchauffement de l'océan Indien subtropical.

Chapitre 4 : RSA : changements pluviométriques

En Afrique du Sud, les cumuls pluviométriques ne sont marqués ni par des tendances ni par des ruptures. Mais la Province Est du Cap connaît depuis 1970 des événements pluvieux moins nombreux et plus intenses. Les stations concernées sont toutes situées sur les versants sud et est du Drakensberg. Pour le XXI^e siècle, le MCG APREGÉ/OPA simule une diminution des précipitations, confirmée par un modèle statistique de désagrégation régionale s'appuyant sur la dynamique de l'atmosphère.

Chapitre 5 : Dobroudja et Bourgogne

Les précipitations de la Dobroudja roumaine connaissent un régime modulé par les contraintes géographiques (relief et distance à la mer). Plus encore ces éléments physiques influent sur les volumes via la pénétration du front de brises de mer. La qualité de l'air en Bourgogne s'est améliorée depuis 1993 en ce qui concerne les fumées noires et l'acidité forte. Néanmoins les concentrations en ozone sont et restent élevées. Des modèles statistiques de prévision des concentrations maximales pour le lendemain sont conçus pour être opérationnels et fournis aux réseaux de surveillance de la qualité de l'air de Bourgogne (ATMOSF'air).