HAL
archives-ouvertes.fr

CHANGEMENT CLIMATIQUE, CHOCS PLUVIOMETRIQUES ET SECURITE ALIMENTAIRE : ESSAIS SUR L'USAGE DE L'INFORMATION CLIMATIQUE EN ECONOMIE DU DEVELOPPEMENT

Catherine Simonet

▶ **To cite this version:**

Catherine Simonet. CHANGEMENT CLIMATIQUE, CHOCS PLUVIOMETRIQUES ET SECURITE ALIMENTAIRE : ESSAIS SUR L'USAGE DE L'INFORMATION CLIMATIQUE EN ECONOMIE DU DEVELOPPEMENT. Economies et finances. Université d'Auvergne - Clermont-Ferrand I, 2012. Français. tel-00859800

HAL Id: tel-00859800
https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00859800

Submitted on 11 Sep 2013

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.

Université d'Auvergne, Clermont-Ferrand 1
Faculté des Sciences Économiques et de Gestion
École Doctorale des Sciences Économiques, Juridiques et de Gestion
Centre d'Études et de Recherches sur le Développement International (CERDI)

CHANGEMENT CLIMATIQUE, CHOCS PLUVIOMETRIQUES ET SECURITE ALIMENTAIRE:
ESSAIS SUR L'USAGE DE L'INFORMATION CLIMATIQUE EN ECONOMIE DU DEVELOPPEMENT

Thèse Nouveau Régime
Présentée et soutenue publiquement le 21 septembre 2012
Pour l'obtention du titre de Docteur ès Sciences Économiques

Par

Catherine SIMONET

Sous la direction de
Mme Catherine ARAUJO-BONJEAN et
M. le Professeur Patrick GUILLAUMONT

Membres du jury

Mme Mathilde MAUREL, Directrice de Recherche CNRS, Université de Paris1	Rapporteur
M. Alexander SARRIS, Professeur, Université d'Athènes	Rapporteur
M. Jean-Louis ARCAND, Professeur, IHEID-Graduate Institute	Président
Mme Catherine ARAUJO-BONJEAN, Chargée de Recherche CNRS, CERDI	Directeur
M. Patrick GUILLAUMONT, Professeur émérite, Université d'Auvergne	Directeur

L'Université d'Auvergne n'entend donner aucune approbation ou improbation aux opinions émises dans cette thèse. Ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

Remerciements

C'est avec beaucoup de joie que j'achève ce travail. La thèse est une expérience unique, pleine de rencontres, de collaborations et de discussions très enrichissantes. C'est également une vraie « tranche de vie » avec ses moments de tourments mais aussi de joies. Ce travail n'aurait sans doute pas vu le jour sans le soutien et la confiance que m'ont témoigné les personnes que je souhaite ici remercier.

En premier lieu, mes pensées vont vers mes directeurs de thèse Catherine Araujo-Bonjean et Patrick Guillaumont pour m'avoir conseillée dans mes moments de doute, suivie dans mes choix et soutenue dans mes difficultés. J'ai beaucoup appris à leurs côtés. Ils ont été de véritables baromètres durant cette thèse. Mes visites dans leur bureau ont souvent fait la pluie et le beau temps de ces quatre années.

Je souhaite ensuite remercier Mme Mathilde Maurel et M. Alexander Sarris pour avoir accepté de rapporter cette thèse, M. Jean-Louis Arcand pour avoir accepté de présider ce jury. C'est pour moi un grand honneur et un vrai plaisir de présenter mon travail devant eux.

J'adresse également mes sincères remerciements à tous les géographes, climatologues et météorologues qui m'ont accompagnée. Je remercie, Eric Langlois, du CERAMAC pour son aide et sa patience lors de mon apprentissage des logiciels SIG. Mes remerciements vont aussi au Professeur Willmott et au Docteur Matsuura, pour avoir toujours répondu à mes interrogations concernant leurs bases de données, à M. Pointin du LAMP pour m'avoir aidée sur les bases météorologiques et aux membres « fondateurs » du séminaire multidisciplinaire d'épistémologie : Christophe D., Eric D., François V., pour m'avoir fait prendre du recul sur ma discipline. Tous, m'ont permis d'aller chercher des réponses dans d'autres sciences et de découvrir la grande variété des climats universitaires.

J'aimerais remercier l'ensemble des membres du CERDI : personnel administratif, enseignants et chercheurs. J'ai passé ici sept ans de ma formation et n'y serais certainement pas restée écrire une thèse si l'atmosphère n'y était pas si agréable. Pour cela je remercie sincèrement: Annie, Bruno, Catherine « la rouge », Cécile, Christelle, Lina, Martine, Michèle, Odette et Solange qui maintiennent sur cet établissement un champ anticyclonique où le soleil brille souvent.

Merci également à Nathalie, véritable colonne de mercure de la FERDI, pour son accueil toujours chaleureux au premier étage et son moral toujours au beau fixe !

J'ai une grande pensée pour la *« dream team »* de mon bureau, mes camarades de promotion : Christian, Emilie, Fred, Hélène, Huan, Sébastien et Stéphanie. Avec eux, les seules tempêtes étaient des *« brain storming »* et les pauses café de vrais rayons de soleil ! Merci de m'avoir soutenue, écoutée et motivée. Merci aussi à tous les autres doctorants du CERDI avec qui j'ai passé de très bons moments : Antoine, Aurore, Joël, Maxence, Mireille, Rohen, Victor (mon parrain) et les autres, avec qui j'ai pu relâcher la pression quand l'atmosphère était trop lourde. J'ai également une pensée pour les membres d'AMADE, les étudiants du CERDI auprès de qui souffle un air frais et revigorant.

Je tiens à remercier mes parents qui, malgré un ciel parfois orageux, sont restés présents ses quatre dernières années. Je les remercie d'avoir soutenu mes choix durant toute ma scolarité en me fournissant un climat studieux et heureux et d'avoir relu ma thèse. Merci aussi à mes frères Pierre et Paul, double arc en ciel dans ces périodes de giboulées.

J'adresse aussi mes remerciements aux doctorants du LAMP : Fred et Cécé, Julien B. et son nectar de poire, Cricri et Laurent avec qui j'ai passé d'excellents moments à parler de tout, sauf de la pluie et du beau temps !

Merci à celles que j'appelle les « filles de Paris », mes amies de khâgne BL : Anne, Miya, Samar et Sylvanie qui sont tels les cumulus d'un ciel de traîne maintenant dispersées aux quatre vents. Nos virées belges, slovaques et parisiennes m'ont fait un bien fou. Merci pour ces bols d'air !

Je remercie énormément mes deux colocs du 24 RSR : Nunu et Bobo qui ont fait de notre appartement un repère au microclimat tellement doux quand mon moral fondait comme neige au soleil. Merci les mecs, ça CA c'est la coloc' ! Merci aussi Willy, toujours partant pour les soirées CERDI les plus caniculaires !

Je tiens également à remercier mes anciens camarades de promotion de master : Fred, Hélène, Louise, Manu, Paul-Marie, qui même lorsqu'ils sont partis très loin des climats auvergnats m'ont soutenue. Merci de leurs passages réguliers et bienfaisants sur Clermont-Ferrand, que j'ai attendus et appréciés comme le retour de la mousson !

Merci aux mouches : Claire (Clairette), Emilie (Milouch), Gaëlle (Gaellouch), Hélène (Hélènouch), Juliette (Juyette) et Stéphanie (Stéphouch), mes hirondelles à moi ; celles qui annoncent le printemps un jour d'hiver. Avec elles j'ai partagé des bourrasques de fou rire, des averses de joie, et des tornades de bonheur. Merci pour votre écoute, votre soutien et votre joie de vivre !

Ma soutenance aura lieu le 21 septembre prochain. Durant ce travail, exactement, 4 printemps, étés, automnes, hivers se sont écoulés. On dit que la météo joue sur votre moral, qu'en est-il quand vous travaillez sur la pluie autant de temps ! Je n'oublie pas Yo' pour m'avoir supportée dans toutes ces turbulences : 4 ans, deux thèses, de la pluie, quelques nuages et beaucoup de soleil. Je suis fière de nous !

Cette période m'aura beaucoup appris et fait grandir, auprès de tous. Je garde de cette expérience l'optimisme et la sagesse résumés par Pierre Dac :

« Il vaut mieux qu'il pleuve aujourd'hui plutôt qu'un jour où il fait beau ».

Résumé

Partant du constat d'une faible connaissance et d'une utilisation encore limitée des données climatiques en économie du développement, cette thèse propose une exploitation originale à la fois macroéconomique et microéconomique des données climatiques. Elle répond à un double objectif consistant d'une part, à enrichir les connaissances concernant les données climatiques en fournissant une nouvelle base de données mondiale directement exploitable par les économistes, d'autre part, à en proposer des exploitations variées et à différentes échelles de l'économie. La première partie propose une utilisation macroéconomique des données climatiques. Elle doit permettre une meilleure appréhension des données climatiques mondiales, afin d'améliorer des connaissances sur les caractéristiques du changement climatique d'un point de vue économique. Le chapitre 1 produit une base de données climatiques disponible pour près de 200 pays au niveau mensuel pour la période 1900-2008. S'appuyant sur ce premier travail, le chapitre 2 propose une utilisation originale de la base en construisant un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique pouvant servir d'outil pour guider l'allocation de l'aide à l'adaptation au changement climatique. La seconde partie de cette thèse est constituée de deux études microéconomiques dont le but est d'analyser les réactions des agents face à un choc climatique. Dans ces deux chapitres, les données pluviométriques pallient le manque de données concernant la production agricole. Au niveau du ménage agricole d'abord, le chapitre 3 s'intéresse aux conséquences d'un épisode de baisse de la pluviométrie sur l'état nutritionnel des enfants de moins de cinq ans et révèle que les ménages ruraux n'ont pas la capacité d'assurer ou d'absorber ces chocs climatiques. Au niveau d'un marché céréalier ensuite, le chapitre 4 s'attache à étudier la réaction des prix face à un choc pluviométrique et met en évidence la présence d'une spéculation, particulièrement sur des marchés mal intégrés et de petite taille.

Mots clés : changement climatique, choc pluviométrique, système d'information géographique, vulnérabilité, santé des enfants, prix céréalier, bulle spéculative, sécurité alimentaire, sibling estimateur, M-TAR, Markov switching ADF.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE 1

PARTIE 1: CONSTRUIRE UNE BASE DE DONNEES SUR LE CLIMAT POUR MESURER LA VULNERABILITE A SON CHANGEMENT **..... 6**

Chapitre 1 : Elaboration d'une base de données des caractéristiques climatiques nationales 10

Chapitre 2 : Un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique : quels sont les pays en développement les plus vulnérables ? 47

PARTIE 2: EVALUER L'IMPACT DES CHOCS PLUVIOMETRIQUES SUR LA SECURITE ALIMENTAIRE 92

Chapitre3 : Impact des chocs climatiques sur la santé des enfants au Burkina Faso 95

Chapitre 4 : Chocs climatiques et bulles spéculatives sur les marchés céréaliers nigériens 122

CONCLUSION GENERALE 148

Table des matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE 1

PARTIE 1: CONSTRUIRE UNE BASE DE DONNÉES SUR LE CLIMAT POUR MESURER LA VULNÉRABILITÉ À SON CHANGEMENT 5

Chapitre 1: Elaboration d'une base de données des caractéristiques climatiques nationales 10

Résumé 10
1.1. Introduction 11
1.2. Les bases de données climatiques issues d'une interpolation spatiale 13
1.2.1. VasClim0 : la base issue d'un krigeage 13
Présentation de la base 13
Principe de construction 13
Caractéristiques de la base 16
1.2.2. La base de l'unité de recherche climatique (Climatic Research Unit-CRU TS3) 17
Présentation 17
Principe de construction 17
Caractéristiques de la base 19
1.2.3. Base de l'université de Delaware : Udel (2.01) 21
Présentation 21
Principe d'interpolation 21
Caractéristiques de la base 22
1.3. Création de la base climatique « pays » à partir de la grille Udel. 25
1.4. Indicateurs construits à partir de la nouvelle base de données climatiques 29
1.4.1. Temps, climat, choc climatique, changement climatique : quelques définitions 29
1.4.2. Indicateurs calculés à partir de la nouvelle base de données 31
Caractérisation du climat 31
Changement climatique 40
Chocs 41
1.5. Conclusion et perspectives 42
Annexes 44

Chapitre 2: Un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique : quels sont les pays en développement les plus vulnérables ? 47
***An Index of Physical Vulnerability to Climate Change: who are the most vulnerable developing countries?* 47**

Résumé 47
2.1. Introduction 48
2.2. What is vulnerability about? 49
2.2.1. General economic vulnerability versus structural economic vulnerability 50
2.2.2. Structural or physical vulnerability to climate change: can it be identified? 50
2.2.3. Main current approaches to climate change vulnerability 51
2.2.4. From analysis to measurement of vulnerability to climate change 54
Existing indices: not focused only on structural vulnerability 54
Concerning the relevance of an index measured at the country level 55

2.3. Components of the Physical Vulnerability to Climate Change Index (PVCCI) 56
2.3.1. Risk of progressive and durable shocks 57
Risk of flooding from the rise of sea level: shock and exposure 57
Risk of increasing aridity: assessment from past trends in temperature and rainfall, and initial conditions 59
2.3.2. Risk of increasing recurrent shocks 59
Average present frequency as an indicator of exposure 60
Trends in the intensity of past shocks as a proxy of future shocks 61
2.3.3. Aggregation of components in a synthetic index 61
2.4. Calculation and robustness of the Index 63
2.4.1. Data 63
2.4.2. Sensitivity analysis 66
Beginning and length of the trend 66
Test for non linear trend 66
Measurement of the shocks 67
Components averaging 68
2.5. The vulnerability to climate change of developing countries 68
2.5.1. Why are developing countries considered so vulnerable to climate change? 68
2.5.2. What the PVCCI shows 69
Aggregate Results: Broad discrepancies according to country grouping 69
Heterogenous results even within broad categories as illustrated by African countries 75
Several types of vulnerability identified : a tentative typology 79
2.6. Conclusion 79
Appendix 81

PARTIE 2: EVALUER L'IMPACT DES CHOCS PLUVIOMÉTRIQUES SUR LA SÉCURITÉ ALIMENTAIRE 91

Chapitre3: Impact des chocs climatiques sur la santé des enfants au Burkina Faso 95
Impact of climate related shocks on child's health in Burkina Faso 95
Résumé 95
3.1. Introduction 96
3.2. The relationships between climate and nutrition in Burkina Faso 98
3.2.1. Climate and agricultural cycle 98
3.2.2. From weather shocks to child heath 99
3.2.3. The time path of climate shocks 100
3.3. Data 101
3.3.1. Child heath 101
3.3.2. Rainfall data 102
3.4. Conceptual and empirical framework 105
3.5. Main results 107
3.5.1. Impact of rainfall shocks in prenatal period 107
3.5.2. The critical period of life 109
3.5.3. Gender effect 110
3.5.3. An asymmetric impact of rainfall shocks 111
3.5.4. Shocks mitigation 112
3.6. Robustness tests and discussion 113

3.6.1. The difference in differences estimator 114
3.6.2. Other robustness checks 116
An impact limited to rural areas 116
Sensitivity to the child's birth date 116
Sensitivity to the measure of shocks 117
3.6.3. Discussion 117
Rainfall shocks and diseases 117
Potential selection bias 117
3.7. Concluding remarks 118
Appendix 119

Chapitre 4: Chocs climatiques et bulles spéculatives sur les marchés céréaliers nigériens 122
***Climate Shocks and Speculative Bubbles on Grain Markets in Niger*..... 122**
Résumé 122
4.1. Introduction 123
4.2. Millet price fluctuations in Niger since 1990 124
4.3. A rational bubble model for millet 127
4.3.1. The millet pricing model 127
4.3.2. Periodically and partially collapsing bubbles 129
4.4. The fundamental value of millet 130
4.5. Testing for asymmetry in the bubble process 134
4.6. Testing for explosive behaviour in the bubble component 140
4.7. Concluding remarks 142
Appendix 144

CONCLUSION GÉNÉRALE 148

Tables des figures

Chapitre 1 : Elaboration d'une base de données des caractéristiques climatiques nationales

FIG. 1.1-Principe du *krigeage* ... 14
FIG. 1.2-Répartition géographique des 9 343 stations utilisées ... 16
FIG. 1.3-Répartition des stations météorologiques utilisées pour la construction de CRUTEMP3 ... 20
FIG. 1.4-Localisation et nombre des stations utilisées dans Udel pour la période 1900-2008 ... 23
FIG. 1.5-Localisation des stations utilisées pour l'interpolation de la température en Octobre 2008 ... 26
FIG. 1.6-Mise en correspondance des coordonnées géographiques et des frontières ... 27
FIG. 1.7-Somme des écarts moyens entre les deux bases élevés au carré (en km²) ... 28
FIG. 1.8-Comparaison des écarts de superficie suivant la grille ou les frontières des pays (en km²) ... 29
FIG. 1.9-Cumuls pluviométriques annuels moyens calculés sur la période 1900-2008 ... 31
FIG. 1.10-Valeurs de température moyennes journalières calculées sur la période 1900-2008 ... 32
FIG. 1.11-Asymétrie de la distribution de la pluviométrie *(skewness)* ... 33
FIG. 1.12-Asymétrie de la distribution de température *(skewness)* ... 33
FIG. 1.13-Ecart-type de la pluviométrie, répartition par quartile ... 34
FIG. 1.14-Ecart-type des séries de température, répartition par quartile ... 35
FIG. 1.15-Coefficient de voussure des séries de pluviométrie (*kurtosis*) ... 35
FIG. 1.16-Coefficient de voussure des séries de température journalière moyenne (*kurtosis*) ... 36
FIG. 1.17-Coefficient d'asymétrie et d'aplatissement de la pluviométrie par pays ... 37
FIG. 1.18-Coefficient de variation de la pluviométrie par quartile ... 38
FIG. 1.20-Variabilité saisonnière de la pluviométrie par quartile ... 39
FIG. 1.21-Variabilité saisonnière de température par quartile ... 39
FIG. 1.22-Tendance dans les séries de température par quadrillage ... 41

Chapitre 2 : Un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique : quels sont les pays en développement les plus vulnérables ?

FIG. 2.1-Vulnerability to climate change framework, the reading of IPPC definition by Füssel (2010) ... 53
FIG. 2.2-Vulnerability frameworks in the light of the Shocks, Exposure and Resilience definitions ... 53
FIG. 2.3-Composition of the Physical Vulnerability to Climate Change Index ... 63

Chapitre 3 : Impact des chocs climatiques sur la santé des enfants au Burkina Faso

FIG. 3.1-The crop calendar ... 100
FIG. 3.2-Prevalence of moderate stunting ($haz < -2$) by age in months ... 101
FIG. 3.3-Average height-for-age z-scores by province and quartiles ... 102

Chapitre 4: Chocs climatiques et bulles spéculatives sur les marchés céréaliers nigériens

FIG. 4.1-Millet prices in Niger, Fcfa/kg, January 1990 to October 2008 ... 125
FIG. 4.2-Price shocks in Niamey and rainfall shocks ... 126
FIG. 4.3-Fundamental component of the millet price in Katako (Niamey) (Fcfa/kg) ... 132
FIG. 4.4-Probabilities of expanding and collapsing regimes in Gaya ... 139
FIG. A4.1-Rolling ADF test result ... 146

Liste des tableaux

Chapitre 1 : Elaboration d'une base de données des caractéristiques climatiques nationales
TAB. 1.2-Présentation des différentes bases météorologiques 24
TAB. A1.1-Liste des pays disponibles pour la base Climate Change Country Profiles 44
TAB. A1.2-Nombre de points de quadrillage par pays. 45

Chapitre 2 : Un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique : quels sont les pays en développement les plus vulnérables ?
TAB. 2.1-Trend in rainfall in Benin 65
TAB. 2.2-Comparison of results considering the starting date for trend 66
TAB. 2.3-Test for non linear trend 67
TAB. 2.4-PVCCI quadratic, by group of countries (1/3) 71
TAB. 2.4-PVCCI quadratic, by group of countries (2/3) 72
TAB. 2.4-PVCCI quadratic, by group of countries (3/3) 73
TAB. 2.5-Tentative typology of the types of vulnerability as drawn in the index 79
TAB. A2.1-Sensitivity of index to components averaging 81
TAB. A2.2-Elementary components of the PVCCI for African Countries 85
TAB. A2.3-Aggregated components and overall level of PVCCI for African countries 87
TAB. A2.4-PVCCI arithmetic by group of countries 90

Chapitre 3 : Impact des chocs climatiques sur la santé des enfants au Burkina Faso
TAB. 3.1-Distance between the municipality centroid and reference weather stations (km) 103
TAB. 3.2-Estimation results with child, mother and household's characteristics 108
TAB. 3.3-Impact of a rainfall shock in the child's birth year 109
TAB. 3.4-Impact of a rainfall shock at first and second year of life 110
TAB. 3.5-Impact of a rainfall shock in the child's birth year by gender 111
TAB. 3.6-Impact of severe rainfall shocks in prenatal period 112
TAB. 3.7-Factors of shocks mitigation 113
TAB. 3.8-Number of children according to their year of birth 114
TAB. 3.9-Estimation results from the DD estimator 115
TAB. 3.10-Impact of rainfall shocks in prenatal period on restricted samples 116
TAB. A3.1-Composition of the wealth index 119
TAB. A3.2-Summary statistics 120
TAB. A3.3-Impact of a rainfall shock in the child's birth year using two alternative measures of long-term rainfall mean 121
TAB. A3.4-Impact of a rainfall shock at age one and two with two estimation of long-term rainfall mean 121

Chapitre 4: Chocs climatiques et bulles spéculatives sur les marchés céréaliers nigériens
TAB. 4.1-Estimation of the fundamental value of millet 131
TAB. 4.2-Bubbles' characteristics 133
TAB. 4.3-Results from the M-TAR model 136
TAB. 4.4-Results from the Markov-switching ADF test 138
TAB. 4.5-Most significant ADF statistics 141
TAB. A4.1-Unit root tests**.** Sample period: January 1990 to October 2008 144
TAB. A4.2-Simulated critical values for the rolling ADF test 144

Introduction générale

Ces dix dernières années, le changement climatique et les récurrentes crises alimentaires mettent à mal l'atteinte des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD). Leurs conséquences économiques, humaines et sociales, frappent en premier lieu des populations vulnérables. Entre décembre 2011 et mars 2012, les prix mondiaux des denrées alimentaires ont augmenté de 8 % accentuant le risque d'insécurité alimentaire pour les populations des pays importateurs de ces biens (d'après le Rapport Food Price Watch de la Banque mondiale, avril 2012)[1]. En 2010, les catastrophes liées au changement climatique ont touché environ 300 millions de personnes et provoqué le déplacement de 40 millions d'individus[2] majoritairement situés dans les pays en développement. Aussi, une analyse des situations de crises écologiques et alimentaires, une meilleure compréhension des conséquences du changement climatique, des mauvaises récoltes et de la hausse des prix sont primordiales pour permettre le développement économique et social des populations pauvres. En effet, l'analyse de ces crises doit permettre de limiter leurs impacts, leurs occurrences et leurs expansions. De plus, elle doit guider l'aide humaine et financière vers les populations les plus exposées. C'est pourquoi ces enjeux sont au centre des préoccupations mondiales actuelles comme en témoignent les nombreux rapports d'organisations internationales publiés sur ces thèmes ces cinq dernières années. Citons à titre d'exemple les travaux du Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat (GIEC), les éditions 2008 et 2010 du Rapport sur le Développement dans le Monde de la Banque mondiale, respectivement consacrées à l'agriculture et au changement climatique ou encore les Rapports du Programme des Nations Unies pour le Développement. Une bonne appréhension de ces phénomènes est une des chevilles ouvrières du développement. Or cette compréhension passe notamment par l'exploitation d'une information climatique, de plus en plus sollicitée en économie du développement.

Des informations climatiques précieuses en économie du développement…

Les récentes études sur le changement climatique ou les crises alimentaires mondiales ou régionales positionnent les données climatiques comme une source d'information cruciale en économie du développement.

[1] Rapport Food Price Watch, Avril 2012, disponible sur le site Internet : http://siteresources.worldbank.org/EXTPOVERTY/Resources/336991-1311966520397/Food-Price-Watch-April-2012.htm.

[2] Source : site Internet du Programme Alimentaire Mondial, rapport de la 17e conférence des parties de Durban, publié le 6 décembre 2011 : http://fr.wfp.org/histoires/7-faits-sur-la-faim-et-le-changement-climatique, consulté en janvier 2012.

Les conséquences économiques du changement climatique sont abondamment étudiées (Fankhauser 1995, Nordhaus et Boyer 2000, McCarthy *et al.* 2001). Afin d'évaluer les différents impacts du phénomène, les données météorologiques sont essentielles. Elles permettent de caractériser le changement climatique et d'appréhender les conséquences de ce dernier. Ainsi, différents indicateurs de vulnérabilité au changement climatique (par exemple, Kaly *et al.* 2004, Baettig *et al.* 2007, Wheeler 2011) mais également des articles concernant ses conséquences sur le secteur agricole (par exemple, Deschenes et Greenstone 2007), se réfèrent à ce type de données. Parce que ces dernières sont disponibles au niveau mondial et sur une longue période, elles permettent une approche globale du phénomène et une comparaison objective entre les pays.

Dans le même temps, les récentes crises alimentaires mondiales et régionales, comme celles ayant eu lieu dans la Corne de l'Afrique en 2011 font également apparaître les données climatiques comme un élément d'analyse majeur. On estime à trois millions le nombre de personnes directement affectées par la crise alimentaire nigérienne de 2005 (Bulletin Hebdomadaire de Morbidité, de Mortalité et de Surveillance Nutritionnelle au Niger, Séminaire épidémiologique, 2005)[3]. Dans des pays dont l'économie est fortement dépendante d'un secteur agricole technologiquement peu développé (irrigation, engrais…), les variations climatiques peuvent avoir des conséquences graves sur la disponibilité alimentaire. Ainsi, d'après le site de la FAO, la famine en Somalie est responsable de la mort de dizaines de milliers de personnes durant l'été 2011[4].

Plus généralement, le climat semble être un déterminant important de la croissance économique à toutes les échelles. Au niveau microéconomique, un ménage pauvre rural dont la principale source de revenu est l'élevage et/ou l'agriculture est très fortement dépendant des conditions météorologiques. Un évènement inattendu tel qu'une sécheresse peut avoir de nombreuses conséquences sur le revenu du ménage, mais également sur l'état de santé des enfants ou sur leur scolarisation. Au niveau macroéconomique, la croissance économique d'un pays ou sa stabilité politique (Miguel *et al.* 2004, Brückner et Ciconne 2011) peuvent être mises à mal lors d'une période de sécheresse. Le climat est ainsi considéré comme un facteur direct ou indirect de croissance économique selon les auteurs (Sachs et Warner 1997a, Acemoglu et Robinson 2010).

Par ailleurs, les données climatiques présentent d'autres avantages lors d'une analyse empirique. Le premier est l'exogénéité de ces données. Alors que l'interdépendance régit les relations entre les variables économiques, les chocs climatiques ne sont pas déterminés par les facteurs économiques[5]. Leur utilisation en économétrie permet donc de mettre en évidence un lien de causalité entre deux entités économiques. Le second avantage réside dans leur objectivité. Elles sont en effet moins l'objet de manipulation que d'autres variables économiques collectées. Ainsi, elles peuvent se substituer à des variables telles que le revenu ou la récolte des ménages dont la collecte peut faire l'objet d'un biais (réponse stratégique, information cachée). Lorsque l'agriculture est très dépendante des conditions climatiques et qu'elle est la première source d'activité des ménages, les chocs climatiques sont de bonnes approximations des chocs de

[3] Séminaire d'épidémiologie numéro 33, du 15 au 21 août 2005, consultable sur le site de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), au lien :http://www.who.int/hac/crises/ner/sitreps/bulletin_niger_s33.pdf.
[4] Site Internet : http://www.faosomalia.org/ consulté en Décembre 2011.
[5] Même s'ils ne le sont pas, le changement est mondial, il est donc compliqué, sauf cas particuliers (pluies acides), d'établir une cause physique directe entre un élément économique et un choc climatique.

revenu du ménage (Jensen 2000, Alderman *et al.* 2006, Maccini et Yang 2009). De la même façon au niveau national, elles peuvent également être utilisées dans des estimations de croissance pour pallier l'endogénéité de certaines variables ou leur manque de disponibilité.

… et pourtant encore peu utilisées…

Bien que leurs intérêts économiques et empiriques soient abondamment loués, la difficulté d'obtention de ces données notamment due aux coûts de collecte limite leurs utilisations. Les coûts de collecte des informations climatiques représentent un investissement important pour des pays en développement dont la capacité financière est souvent limitée. Ces données sont également souvent complexes à utiliser et nécessitent de bien connaître leur mode de collecte comme leur méthode de construction.

Si elles sont présentes depuis de nombreuses années en économie du développement et bien que leurs exploitations augmentent, les données climatiques demeurent encore sous-utilisées. Aussi, la bonne utilisation de ces variables en économie constitue un véritable enjeu de recherche nécessitant une interaction multidisciplinaire : elle exige une connaissance des constructions de données climatiques mise en œuvre par les météorologues ainsi qu'une maîtrise des outils de gestion des systèmes d'information géographique pour finalement produire une base accessible aux économistes.

…dont cette thèse propose une exploitation originale au niveau macro et microéconomique.

Cette thèse veut répondre à un double objectif :

- d'une part, enrichir les connaissances concernant les données climatiques en fournissant une nouvelle base de données mondiale directement exploitable par les économistes (**chapitre 1**) ;
- d'autre part, en proposer des exploitations variées et à différentes échelles de l'économie :
    - au niveau mondial, avec la construction d'un indicateur de vulnérabilité au changement climatique (**chapitre 2**) ;
    - au niveau régional, en étudiant la présence de bulles spéculatives sur les marchés céréaliers nigériens (**chapitre 4**) ;
    - au niveau du ménage, en s'intéressant à la malnutrition des enfants burkinabés lors d'épisodes de sécheresse (**chapitre 3**).

La thèse fait ainsi appel à plusieurs méthodes économétriques sur les données de panel et sur les séries temporelles. Elle utilise également d'autres procédés statistiques tels que la construction d'indicateurs. En amont de ce travail, une exploitation dense des systèmes d'informations géographiques permet de produire une analyse multidisciplinaire précise. Cette thèse, essentiellement empirique, a également une portée stratégique puisque l'ensemble de ces travaux a été mené dans le but de formuler des recommandations politiques argumentées.

Elle s'organise en deux parties constituées chacune de deux chapitres. Ces chapitres peuvent être lus indépendamment les uns des autres.

La première partie propose une exploitation macroéconomique des données climatiques. Les deux chapitres qui la composent répondent au besoin d'une meilleure appréhension des données climatiques mondiales, afin d'améliorer les connaissances sur les caractéristiques du changement climatique d'un point de vue économique.

Le **chapitre 1** produit une base de données climatiques disponible pour près de 200 pays au niveau mensuel pour la période 1900-2008. Il dresse un état des lieux des bases de données météorologiques mondiales disponibles. Il propose également des indicateurs de mesures du climat, du changement climatique et des chocs calculés à partir de cette nouvelle base climatique.

S'appuyant sur ce premier travail, le **chapitre 2** propose une utilisation originale de la base en construisant un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique pouvant servir d'outil pour guider l'allocation de l'aide à l'adaptation au changement climatique[6].

La seconde partie de cette thèse est constituée de deux études microéconomiques dont le but est d'analyser les réactions des agents face à un choc climatique. Dans ces deux chapitres, les données pluviométriques pallient le manque de données concernant la production agricole.

Au niveau des ménages agricoles d'abord, le **chapitre 3** s'intéresse aux conséquences d'un épisode de baisse de la pluviométrie sur l'état nutritionnel des enfants de moins de cinq ans. En combinant une enquête sur les ménages burkinabés effectuée en 2008 avec des données de la Direction de la Météorologie du Burkina Faso, l'analyse se porte sur la période d'âge critique de l'enfant lors d'un épisode de sécheresse. Les douze premiers mois de vie de l'enfant sont ainsi identifiés comme étant la période durant laquelle il est le plus vulnérable aux chocs climatiques. L'analyse montre que les ménages ruraux n'ont pas la capacité d'assurer ou d'absorber ces chocs climatiques.

Au niveau d'un marché céréalier ensuite, le **chapitre 4** s'attache à étudier la réaction des prix face à un choc pluviométrique. Les prix céréaliers s'avèrent ne pas refléter l'évolution de leurs fondamentaux. Les marchés surréagissent à un choc climatique laissant supposer la présence de bulle spéculative. Après avoir estimé les valeurs fondamentales des prix en utilisant notamment la pluviométrie comme approximation des données de production, le travail se porte sur la partie non expliquée par les fondamentaux. La mise en évidence de bulles spéculatives est ensuite effectuée en utilisant leurs propriétés statistiques. Ainsi, les tests utilisés révèlent la présence d'une spéculation, particulièrement sur des marchés mal intégrés et de petite taille.

[6] Aide allouée notamment par le Fond d'Adaptation et le Fond Global pour l'Environnement.

PARTIE 1

Construire une base de données sur le climat pour mesurer la vulnérabilité à son changement

Construire une base de données sur le climat pour mesurer la vulnérabilité à son changement

Le rôle de la géographie et, plus particulièrement, du climat dans le développement économique et social des pays est l'objet d'une controverse persistante. Plus précisément, deux paradigmes s'opposent sur la façon dont les caractéristiques géographiques des pays peuvent être la cause de leur pauvreté. D'un côté, la géographie est considérée comme primo-déterminante des différences de richesse entre les pays et donc une cause directe du faible développement de certains pays, tandis que de l'autre, elle est un facteur indirect qui joue à travers la qualité institutionnelle et la bonne gouvernance des États.

Considérer la géographie comme un facteur déterminant de la croissance économique des pays est une thèse ancienne. Le rôle du climat sur le développement des civilisations est évoqué dans les écrits d'Aristote et d'Hippocrate. Cependant, c'est Montesquieu qui est le plus souvent cité comme l'un des fondateurs de la « théorie du climat » *("climate thesis")* telle qu'elle est définie dans l'ouvrage de Landes en 1998. Dans son ouvrage *De l'Esprit des Lois*, Montesquieu présente les premières ébauches de ce paradigme décrivant l'existence d'une corrélation entre la chaleur du pays et son niveau de développement. En effet, la chaleur imposerait à l'homme la mise en œuvre d'une agriculture de subsistance : « Ce sont les différents besoins dans les différents climats, qui ont formé les différentes manières de vivre ; et ces différentes manières de vivre ont formé les diverses sortes de lois » (Montesquieu*, De L'Esprit des Lois*, Livre 14, chapitre 5). Cette théorie, développée à l'extrême par l'auteur, l'amène à considérer le climat comme prédominant sur l'Homme : « L'empire du climat[7] est le premier de tous les empires » (Montesquieu, *De L'Esprit des Lois*, Livre 19, chapitre 14). L'auteur perçoit alors, dans les différences géographiques, l'explication de la pauvreté et même de l'esclavage de certains peuples.

Historiquement dérivées de cette théorie, de nombreuses thèses considèrent aujourd'hui les caractéristiques géographiques de certains pays comme étant les causes de leur faible développement. Ainsi, les pays situés en zones tropicales seraient moins riches à cause de la forte prévalence de maladies infectieuses (Sachs et Warner 1997a), de leur enclavement géographique (Sachs *et al.* 2000), de coûts de transport élevés (Gallup *et al.* 1998), ou d'une culture céréalière difficile liée à la variabilité du climat ou à la pauvreté des sols (Sachs et Warner 1997a). La latitude des pays et leurs caractéristiques climatiques sont alors des facteurs explicatifs directs de leur faible développement. Les travaux de Sachs et Warner (1997a et 1997b) nourrissent cette littérature en montrant que les pays faiblement développés sont situés dans des zones enclavées et fortement dépendantes des produits de base. Diamond, dans un article publié dans le journal *Science* en 1997*,* étudie également la localisation historique des premiers agriculteurs dans la zone du « Croissant Fertile », au Moyen-Orient et relie le développement de ces premières civilisations aux caractéristiques géographiques de la région. Cette théorie a servi nombre d'études sur le retard de croissance des pays africains, comme celle de Bloom et Sachs (1998). Les auteurs affirment ainsi: "*At the root of Africa's poverty lies its extraordinarily disadvantageous geography"*. Dans un article de 2006, Nordhaus s'inscrit dans la droite ligne de ces études en affirmant que le développement des sociétés fortement dépendantes de l'agriculture est d'autant plus influencé par leurs caractéristiques géographiques. D'après l'auteur, les premières civilisations, extrêmement dépendantes des conditions climatiques et des ressources

[7] La définition du climat retenue ici est restreinte aux seules caractéristiques de température.

naturelles, présentaient un développement économique fortement lié à leur géographie et surtout à leur climat[8]. Dans cet article, il réalimente cette hypothèse en utilisant une nouvelle méthode de quadrillage géographique de la richesse. Selon ses calculs, la géographie de l'Afrique constitue un désavantage économique par rapport à celle des régions industrielles tempérées : les facteurs géographiques expliquent 20 % des différences de revenu entre les deux zones. Le travail de Dell et ses co-auteurs (2009) met également en avant la température comme facteur explicatif du revenu. En effet, le revenu national chute selon l'auteur de 8,5 % par degré Celsius supplémentaire.

Afin de valider empiriquement cette théorie, les auteurs utilisent les données géographiques -telles que la latitude, l'altitude, la distance à la mer la part des terres tropicales (Bloom et Sachs 1998) ou des variables muettes géographiques «Afrique», «enclavement» (Sachs et Warner 1997b, Sachs *et al.* 2000)- comme facteurs explicatifs directs des variables économiques. Les facteurs géographiques étant exogènes[9], ils ne dépendent pas des critères économiques et sociaux et peuvent donc être utilisés directement pour expliquer le revenu. Néanmoins, la principale limite de ces études réside dans la très faible variabilité temporelle des données géographiques disponibles, qui contraint les analyses statistiques temporelles et de panel. En effet, les facteurs géophysiques n'évoluent pas dans le temps (latitude, altitude, enclavement), ou très peu (qualité des sols, climat).

Souvent accusées de « déterminisme géographique », ces thèses se voient par ailleurs opposer le paradigme des institutions. Selon ce dernier, les institutions et la bonne gouvernance sont au cœur du processus de croissance économique des États (Acemoglu et Robinson 2010). Corruption, faiblesse du système juridique et administratif sont les premières causes de la pauvreté des nations. Cependant, tester empiriquement les facteurs institutionnels se heurte bien souvent aux problèmes de l'endogénéité des variables institutionnelles et de bonne gouvernance. La causalité inverse du développement économique sur le développement institutionnel des États est, en effet, bien établie et résumée dans les travaux d'Acemoglu *et al.* (2001) et Rodrik et Subramanian (2003). Ces auteurs utilisent alors les facteurs géographiques comme variables instrumentales des données institutionnelles. Selon eux le fort impact du climat sur le développement économique est en fait le résultat de l'omission de variables clés par lesquelles transitent les effets du climat, notamment la qualité institutionnelle (Rodrik *et al.* 2004). Les recherches de Hall et Jones (1999) montrent que les différences de richesses entre les nations sont dues aux institutions et politiques publiques. Acemoglu, Johnson et Robinson, dans leur article *The Colonial Origins of Comparative Development* (2001), attribuent également un rôle fondamental aux institutions, dont le processus de développement est lui-même dépendant de la géographie. Selon les auteurs, le climat est un facteur explicatif du type de colonisation, qui a ensuite orienté le développement des institutions des pays. Les zones présentant un climat défavorable seraient le lieu de colonies d'exploitation alors que les zones de climat favorable (présentant donc une moindre mortalité des colons) auraient permis des colonies de peuplement. Dans ces dernières, les colons auraient établi des institutions permettant un meilleur développement économique, ce qui expliquerait les différences de richesses actuelles entre les pays.

[8] Cette thèse est également décrite dans l'ouvrage *Effondrement* de J. Diamond (2005).

[9] On considère ici par facteurs géographiques uniquement les éléments « géophysiques »: la population n'est pas considérée comme exogène par exemple.

Easterly et Levine (2003) et Rodrik (2003) confirment également que le développement dépend des institutions qui elles-mêmes dépendent de la géographie.

Ainsi, selon ces deux paradigmes, le climat peut-être considéré comme un facteur de développement économique direct et/ou indirect. L'effet du climat transiterait par de multiples canaux : l'agriculture (Mendelsohn *et al.* 2001, Deschenes et Greenstone 2007), la santé (Gallup et Sachs 1998 et 2001, Deschenes et Moretti 2007), la productivité (Meese *et al.* 1982), les conflits (Miguel *et al.* 2004), les institutions politiques (Brückner et Ciccone 2011), etc. C'est pourquoi son influence et son instabilité sont largement étudiées. Elles peuvent déterminer le basculement des pays dans une « trappe à pauvreté » et orientent les caractéristiques de l'aide au développement (Guillaumont et Guillaumont-Jeanneney 2010).

La disponibilité de nouvelles bases de données météorologiques mondiales (1) et le phénomène du changement climatique (2) alimentent ces études et enrichissent ces théories plaçant le climat au cœur des problématiques de développement.

Ces dix dernières années ont vu l'apparition et le développement de bases données météorologiques mondiales, présentant un nouvel enjeu pour ces courants de recherche. En effet, les études concernant l'impact de la géographie souffraient bien souvent de la faiblesse des données géographiques. En particulier, les données climatiques étaient bien souvent peu nombreuses, peu fiables et peu disponibles. De plus, comme nous l'avons évoqué précédemment, les variables utilisées possédaient une faible variabilité temporelle (muettes géographiques régionales, latitude, part des zones tropicales…). Les nouvelles bases de données mondiales, en revanche, apportent une réponse à ces faiblesses. Elles proposent, pour un grand nombre de pays et sur une longue période (depuis 1900), des données de caractéristiques (pluviométrie et température), disponibles suivant une fréquence élevée (mensuelle). Ces bases permettent donc d'approfondir considérablement la connaissance:

- des canaux de transmission par lesquels les chocs climatiques peuvent affecter la croissance (Miguel 2004 , Barrios *et al.* 2010, Brückner et Ciccone 2011) ;
- de l'impact direct du climat sur le revenu (Nordhaus 2006, Dell *et al.* 2008).

Toutefois, construites par des météorologues, elles demeurent encore peu connues et leurs utilisations sont l'objet de débats en économie. La controverse entre Brückner et Ciccone (2007) et Miguel et Satyanath (2010, 2011) sur les méthodes de calculs des chocs climatiques en atteste. De la qualité de l'exploitation de ces bases de données dépend la fiabilité des résultats. Le chapitre 1 dresse un état des lieux des bases de données météorologiques mondiales disponibles et de leur utilisation en économie du développement. L'objectif de ce chapitre est à la fois de décrire le mode de construction et les caractéristiques d'une base de données météorologiques et d'en proposer une utilisation au niveau macroéconomique.

Le rôle du changement climatique, dans l'augmentation du nombre et de l'amplitude des chocs climatiques étant avéré (IPCC 2007b), l'étude des chocs climatiques et de leurs impacts sur le développement présentent un nouvel enjeu. Il paraît en effet important de bien comprendre quels sont les pays particulièrement touchés par le changement climatique et sous quelles conditions. En plaçant le changement climatique au cœur des problématiques politiques et économiques mondiales, le chapitre 2 propose la construction d'un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique, susceptible de guider l'allocation de l'aide à l'adaptation dans un contexte de ressources humaines et financières limitées. Cet indicateur s'appuie sur la base climatique mondiale construite dans le chapitre 1.

Chapitre 1

Elaboration d'une base de données des caractéristiques climatiques nationales

Résumé

L'objectif de ce chapitre est de présenter la construction d'une base de données climatiques, disponible au niveau national pour l'ensemble des pays du monde. Dans un premier temps, les principales bases de données climatiques mondiales pouvant être utilisées en sciences économiques sont décrites et caractérisées. Après avoir justifié l'utilisation de la base de l'université de Delaware (base quadrillée à 0.5° de longitude/latitude) nous transformons cette grille en une base de données nationales. La nouvelle base ainsi construite présente le cumul pluviométrique mensuel et la température mensuelle moyenne pour près de 200 pays et territoires sur la période 1900-2008. Le chapitre présente enfin les principales caractéristiques de cette nouvelle base en construisant différents indicateurs à partir de celle-ci.

1.1. Introduction

Depuis que le changement climatique est au cœur des préoccupations mondiales, les bases de données météorologiques ont vu leur nombre se multiplier. Les indices construits à partir de ces données semblent fournir de bonnes approximations de l'évolution du climat (Parry *et al.* 2007). Dans le même temps, les économistes du développement trouvent dans ces bases de véritables ressources d'instrumentation (Miguel *et al.* 2004). Ces dernières fournissent en effet des données pour des pays où l'information est complexe à obtenir ou indisponible. Par ailleurs, les bases de données météorologiques sont de plus en plus nombreuses puisqu'elles bénéficient de la multiplication de modèles et logiciels de meilleures performances, permettant une exploitation rigoureuse des informations climatiques. Ainsi, la demande de données météorologiques apparaît de plus en plus importante tandis que leur offre est également grandissante.

Ce chapitre a pour but de construire une nouvelle base de données climatiques disponibles pour l'ensemble des pays à partir de la grille de données proposée par le Professeur Willmott et le Docteur Matsuura de l'Université de Delaware : ***Terrestrial Air Temperature version 2.01 et Terrestrial Precipitation version 2.01***[10]. La base produite dans ce travail est exploitable pour près de 200 pays et territoires au niveau mensuel sur la période 1900 à 2008. Le chapitre fait également un état des lieux des principales bases de données météorologiques disponibles en présentant les caractéristiques de chacune. L'utilisation des informations climatiques souffrant d'une faible expérience en sciences économiques, notre but est de fournir les clés de compréhension de ces bases météorologiques et de proposer une nouvelle base, permettant ainsi une exploitation originale et rigoureuse des variables climatiques par les économistes.

Les bases climatiques sont extrêmement nombreuses. Nous choisissons donc de cantonner notre étude à certaines bases aux caractéristiques précises.

Le travail se focalise ainsi sur les bases de données issues d'interpolations spatiales qui fournissent une information climatique sous forme de quadrillage. Ces dernières années, sous l'impulsion de la recherche sur le changement climatique, de nombreuses données de quadrillage[11] de la précipitation et de la température terrestre ont été développées (Dai et Del Genio 1997, New *et al.* 2000). Nous ne présentons ici que des données mondiales puisque notre but est d'obtenir une information exploitable pour l'ensemble des pays du monde et particulièrement les pays en développement dans lesquels l'information climatique peut être complexe à obtenir.

L'analyse porte sur deux éléments climatiques: la température et la pluviométrie[12]. Il s'agit des éléments les plus utilisés par les économistes du développement car ils présentent un lien souvent très étroit avec des variables économiques agricoles telles que les rendements (Sultan *et al.* 2005). Les chocs climatiques sont de bonnes approximations des chocs de revenu des ménages ruraux agricoles (Beegle *et al.* 2006) au

[10] Températures terrestres et précipitations version 2.01.
[11] Nous utilisons ici indifféremment les termes quadrillage et grillage pour faire référence au résultat final de la base de données issue d'une interpolation spatiale.
[12] Dans la plupart des cas, les bases présentées plus loin fournissent également des données concernant d'autres variables climatiques (pression aérienne, taux d'humidité,…) Cf. tableau 1.2 pour connaître les séries climatiques disponibles dans ces bases.

niveau microéconomique. Ils sont également de bons facteurs explicatifs des variations de croissance économique au niveau macroéconomique pour des pays dont l'économie est fortement dépendante du secteur agricole (Mansouri 2004, Miguel *et al.* 2004).

Les bases de quadrillage mondiales de variables climatiques peuvent être groupées en deux catégories selon l'origine des données permettant leur construction. Deux types de sources d'information sont utilisées : les stations météorologiques (thermomètre et pluviomètre) ou les satellites. Les stations produisent une mesure directe de la pluviométrie et de la température. En revanche les satellites produisent une mesure indirecte des grandeurs climatiques. Ils envoient des signaux qui, après traitement par des algorithmes d'inversion peuvent être traduits en grandeur climatique (température, pluviométrie). Ces deux techniques sont sujettes à des erreurs : bruits des instruments de mesure dans la première, erreurs de modélisation des signaux satellitaires dans la seconde. L'information issue de données de stations est actuellement la plus utilisée dans les études économiques. Elle fournit l'information du terrain et est disponible en quantité importante même pour les pays en développement. Nous choisissons de limiter notre analyse aux bases utilisant cette source d'information aussi appelées données *in situ*, c'est-à-dire de données climatiques effectives, mesurées par des appareils de mesure disposés au sol[13].

A partir de ces relevés *in situ* deux types de bases peuvent être produits. D'une part, une interpolation spatiale des données permet la production des bases de données *ex post*. Il s'agit de bases ne portant que sur la pluviométrie et la température passée. D'autre part, il est également possible d'établir à partir de ces données des projections climatique. Les bases ainsi produites sont des projections de situations climatiques faites à partir de données climatiques passées. Dans ce cas, la base propose des variables *ex ante* : données pluviométriques pour l'année 2050 par exemple. Ces bases s'appuient souvent sur différents scénarii d'évolution du climat. Notre étude s'attache uniquement aux bases proposant des données climatiques sur la période passée. Nous nous focalisons sur les données climatiques disponibles de façon rétrospective, et non sur des projections.

La première partie du chapitre présente les bases de données quadrillées mondiales les mieux renseignées à l'heure actuelle ainsi que leurs principes de construction. Dans la deuxième partie nous expliquons les raisons pour lesquelles nous avons retenu la base de l'Université de Delaware puis comment nous avons construit une base de données météorologiques des aires géopolitiques à partir de la base quadrillée. Enfin, la troisième partie, propose différents indicateurs établis à partir de cette nouvelle base.

[13] Nous ne présentons pas les bases « mixtes » issues de données *in situ* et de données satellitaires telles que la base produite pas la *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) : *Global Precipitation Climatology Project* (GPCP). Cette base utilisée par Brückner et Ciccone (2011) est disponible pour un quadrillage latitude-longitude 2.5° × 2.5° sur la période 1979-2009. La dernière version actuelle disponible de cette base est la version 2.1. Pour plus d'informations lire Adler *et al.* (2003). Notons que cette base est comparée par Miguel et Satyanath (2011) à celle du Climate Research Unit (décrite dans la partie 1.1).Les données de ces deux bases (une issue uniquement de données *in situ*, l'autre issue de données mixtes) sont peu corrélées (Miguel et Satyanath 2011).

1.2. Les bases de données climatiques issues d'une interpolation spatiale

Les bases de quadrillage mondial fournissent des informations météorologiques parfois complexes à obtenir. Elles sont obtenues à partir de différentes méthodes dont nous exposons les grands principes et les limites d'utilisation. Nous présentons ici trois bases importantes VasClim0, CRU et Udel, produites respectivement au sein d'universités allemande, anglaise et américaine.

1.2.1. VasClim0 : la base issue d'un krigeage

Présentation de la base

La base de données Variability Analysis of Surface Climate Observations : VASClim0, est le résultat d'un projet de recherche mené par le Global Precipitation Climatology Centre (GPCC) et l'Institut pour l'Atmosphère et l'Environnement de l'Université Johann Wolfgang Goethe à Frankfort. Ce projet s'inscrit au sein d'un programme allemand de recherche sur le climat : DeKlim (Deutschen Klimaforschungsprogramm). Sous la responsabilité de trois chercheurs (C.Beck, J.Grieser et B.Rudolf), VASClim0 a pour but d'apporter au programme DeKlim une base de données météorologiques permettant une analyse de la variation du climat sur cinquante ans. La base propose un quadrillage mondial de quatre variables météorologiques : la précipitation, la température au sol, la couverture neigeuse et la pression de l'air depuis 1951 suivant une résolution temporelle mensuelle. Le quadrillage des données couvre la totalité de la surface terrestre suivant trois résolutions spatiales différentes (0.5°lat./lon., 1.0°lat./lon. ou 2.5°lat./lon.). La base VASClim0 est très précise sur cette période, mais n'a pour l'instant pas été prolongée.

La construction du quadrillage repose sur l'interpolation de données pluviométriques issues de diverses stations météorologiques réparties dans le monde. La méthode d'interpolation utilisée est du *krigeage* ordinaire.

Principe de construction

Daniel G. Krige professeur à l'Université de Witwatersrand en Afrique du Sud et ingénieur des mines a élaboré la technique du *krigeage* afin d'évaluer les disponibilités des ressources minérales. La méthode est développée pour la première fois en 1951 (Krige 1951). Elle est formalisée en 1962 par Georges Matheron dans l'ouvrage : *Traité de géostatistique appliquée*. Dans ce document, G.Matheron donne le nom de l'ingénieur sud africain à la technique d'interpolation. Après son utilisation pour l'évaluation des ressources minières (Krige 1951), le *krigeage* a été très rapidement utilisé en météorologie pour l'interpolation de données climatiques (Beck *et al.* 2005). La méthode est également utilisée en sciences économiques (Lentes *et al.* 2010), via l'économétrie spatiale ou environnementale.

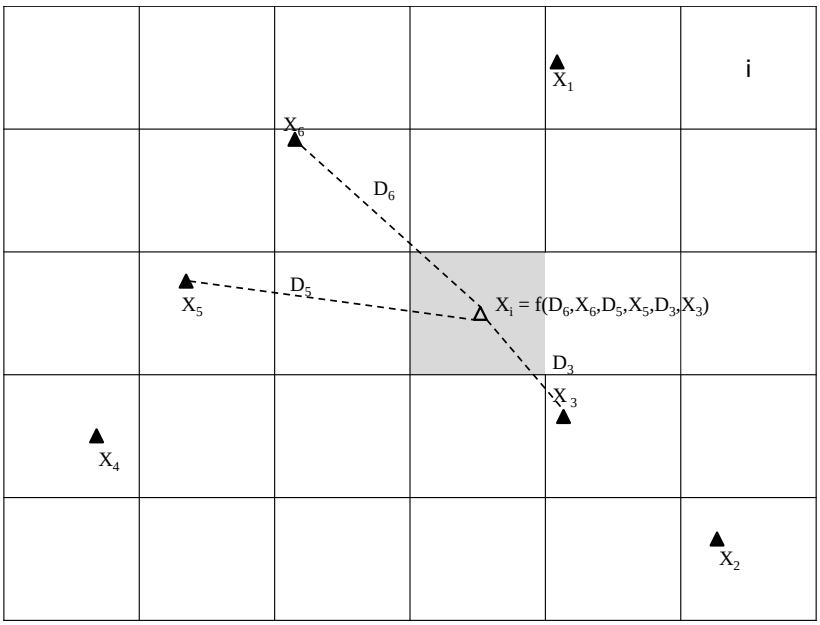
Le *krigeage* est une méthode d'interpolation spatiale, utilisant l'autocorrélation spatiale des données comme support de calcul. Ce principe simple permet d'obtenir pour une surface donnée une estimation de la valeur de la série étudiée en chaque point de la superficie de référence. La méthode de *krigeage* est basée sur une estimation linéaire de l'espérance et de la variance à partir de données spatialisées. Plus

précisément il s'agit d'une exploitation du *variogramme*[14] de la série. Cette méthode d'interpolation permet une estimation linéaire non biaisée et à variance minimale des données estimées. Pour les données météorologiques, le *krigeage* consiste à effectuer une interpolation entre différentes stations en pondérant les stations selon la distance du point à chaque station périphérique utilisée et selon la distance de chaque stations entre elles. Ainsi, pour une même interpolation, deux stations proches l'une de l'autre ont un poids respectif moins important que deux stations éloignées. La méthode de *krigeage* permet de régler le problème de l'hétérogénéité dans la répartition géographique des stations. C'est une méthode d'interpolation spatiale simple puisqu'elle repose sur l'inverse des distances entre les points.

Ainsi, comme le montre la Figure 1.1, pour une aire donnée *A*, contenant 6 stations auxquelles sont associées des données météorologiques X, le *krigeage* doit permettre de déterminer pour chaque centre i (ou centroïde) du quadrillage de l'aire[15] la valeur de la donnée pluviométrique, considérant une corrélation entre les valeurs de la donnée dans les stations voisines et la distance du point d'estimation à ces stations. Le nombre de stations choisi pour l'interpolation peut varier.

Le principe du *krigeage* est très proche des algorithmes d'estimation spatiale traditionnelle. Les résultats obtenus avec cette méthode sont similaires à ceux obtenus avec un l'algorithme de Shepard (1968) ou des méthodes de triangulation par pondération inverse de la distance. La particularité du *krigeage* est d'utiliser la fonction de distribution spatiale révélée par la série et non une fonction de distribution exogène. L'avantage de la méthode est de fournir la variance des erreurs pour l'ensemble des points étudiés. Pour cette base, les auteurs notent que la méthode de Shepard et le krigeage ordinaire donnent des résultats similaires. L'algorithme de Shepard est préféré au krigeage dans les bases de données décrites par la suite.

FIG. 1.1-Principe du *krigeage*



[14] Le *variogramme* définit la variance de la série en fonction de la distance entre les points de données.
[15] La précision du quadrillage est définie en amont de l'interpolation.

On distingue plusieurs types de *krigeage* : le *krigeage* simple, ordinaire ou avec dérive/tendance. D'après Goovaerts (1997), soit *u* un point à estimer et $\mathbf{u}_\alpha$ le point voisin renseigné. $n(\mathbf{u})$ est l'ensemble des points voisins utilisés dans l'estimation de la série. Alors l'estimation $Z^*(\mathbf{u})$ de la moyenne de la série en u est :

$$Z^*(\boldsymbol{u}) - m(\boldsymbol{u}) = \sum_{\alpha=1}^{n(\boldsymbol{u})} \lambda_\alpha \left[Z(\boldsymbol{u}_\alpha) - m(\boldsymbol{u}_\alpha)\right] \quad (1)$$

Avec $m(\mathbf{u})$ moyenne espérée de $Z(\mathbf{u})$ et λ_a le poids de *krigeage* assigné à $Z(\mathbf{u}_\alpha)$ pour l'estimation de $Z(\mathbf{u})$. Notons que le poids de *krigeage* assigné à un même u_a peut être différent selon le point estimé. De plus, le poids de *krigeage* est défini comme le poids permettant la minimisation de la variance des estimateurs :

$$\sigma_E^2(\boldsymbol{u}) = Var\{Z^*(\boldsymbol{u}) - Z(\boldsymbol{u})\} \quad (2)$$

Sous contrainte d'une estimation non biaisée :

$$\mathrm{E}\{\mathrm{Z}^*(\mathbf{u}) - \mathrm{Z}(\mathbf{u})\} = 0 \quad (3)$$

L'estimation $Z(\mathbf{u})$ est ensuite décomposée entre une valeur résiduelle, $r(\mathbf{u})$ et une tendance, $m(\mathbf{u})$.

La distinction des différents types de *krigeage* se fait sur l'estimation de la tendance $m(\mathbf{u})$. Le *krigeage simple* considère la tendance comme égale à une constante *m*. Le *krigeage ordinaire* au contraire considère que la valeur de la tendance est égale à la valeur de la tendance du point voisin : $m(\mathbf{u}) = m(\mathbf{u}_\alpha)$. Finalement, le *krigeage avec tendance ou dérive,* appelé aussi méthode universelle, considère la tendance $m(\mathbf{u})$ comme une combinaison linéaire des valeurs moyennes des points voisins en intégrant leurs coordonnées géographiques.

$$m(\mathbf{u}) = m(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y \quad (4)$$

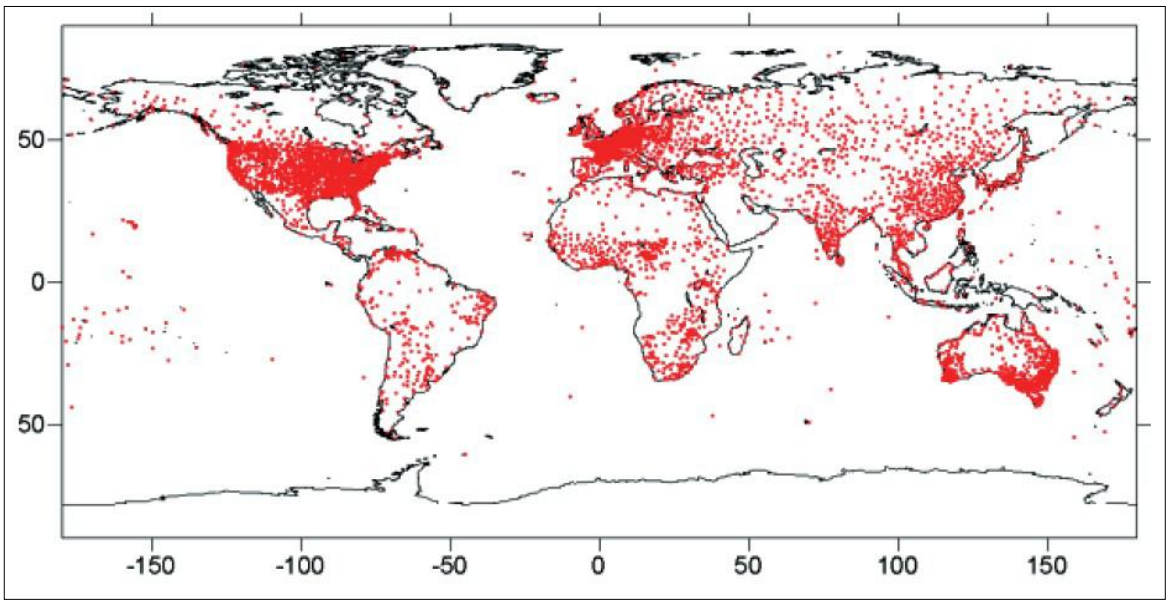
La méthode du *krigeage* repose sur de nombreuses hypothèses qui limitent l'utilisation des résultats d'une telle interpolation. Tout d'abord, la technique repose sur une hypothèse de distribution linéaire des données. Cette hypothèse est importante puisqu'elle pose le problème du nivellement des données. Les chocs ponctuels et très locaux sont de fait lissés par le *krigeage*. La méthode d'interpolation utilisée ne permet pas de prendre en considération les microclimats, ni même les phénomènes de versants. Elle ne tient pas compte non plus de la distance du point à la mer. Le travail nécessite de plus un nettoyage préliminaire des données qui permet de régler les problèmes de points aberrants dus aux erreurs de mesure et d'homogénéiser la base. Cette étape lisse également les épisodes extrêmes localisés. De plus, par construction cette méthode crée une corrélation entre les points. Celle-ci ne doit théoriquement reproduire que la corrélation liée à la géographie et au climat. La covariance entre les points, illustre en effet le *variogramme* de la zone. Cependant il s'agit d'une construction statistique, la base de données VasClim0 doit donc être utilisée avec précaution en économie et en économétrie. La base peut être exploitée pour l'étude des phénomènes de long terme tels que le changement climatique (Grieser et Beck 2006). L'estimation par *krigeage* est toujours associée à des erreurs. Les auteurs associent aux points estimés, des erreurs de mesure qui peuvent être prises en compte lors d'une exploitation statistique de la base.

Caractéristiques de la base

Les données issues de VasClim0 sont issues d'un *krigeage* ordinaire. L'interpolation utilisée prend en compte 9343 stations (Figure 1.2). Les auteurs retiennent trois sources principales de données: l'Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) soient 13 500 stations, l'unité de recherche sur le climat (CRU correspond aux données du *Climatic Research Unit*) soient 9 500 stations, le réseau de climatologie historique mondial (GHCN: *Global Historical Climatology Network)*, soient 22 600 stations. Les stations sont identifiées selon leur position géographique, leur altitude, leur nom et leur code de l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM ou *code WMO)*. Elles sont ensuite harmonisées. Par exemple certaines stations sont identiques dans les différentes bases mais ne présentent pas les mêmes valeurs. Dans ce cas, les auteurs doivent faire un choix pour la valeur la plus crédible entre les données en concurrence. De plus, les méthodes d'agrégation sont différentes selon l'origine des mesures, ce qui nécessite une harmonisation des données. Les stations ne présentant pas assez de valeurs sur la période 1951-2000 ont été supprimées. Finalement, 90% des stations retenues proposent des données depuis 1951 sans valeur manquante. Afin d'éviter les problèmes d'hétérogénéité, les auteurs ont préféré solliciter le moins de sources de possibles. C'est pourquoi les données nationales sont peu utilisées (sauf pour contrôle) car leur système de mesure n'est pas harmonisé au niveau mondial[16]. Ces étapes de validations sont communes à l'ensemble des bases présentées dans cette partie : VasClim0 ; CRU et Udel.

La base VasClim0 n'est actuellement disponible que sur une période plus restreinte que les autres bases présentées ci-après: 1950-2000.

FIG. 1.2-Répartition géographique des 9 343 stations utilisées



Source: Beck *et al.* (2005)

[16] Ceci devrait bientôt être le cas grâce au travail de l'OMM.

La base a été exploitée par différents auteurs notamment dans le cadre d'une meilleure compréhension du changement climatique.Ainsi, Grieser et Beck (2006) ne mettent pas en évidence la présence d'une tendance dans la pluviométrie au niveau global sur l'ensemble de la période. Ils distinguent toutefois des ruptures de tendances suivant des sous-périodes[17]. Les auteurs montrent des différences importantes dans les valeurs de ces tendances selon les régions lorsqu'ils travaillent sur données annuelles et au niveau de chaque point de quadrillage (Beck *et al.* 2005). Cette base a également servi à la construction d'une carte de la production primaire nette de biomasse (Grieser *et al.* 2006).

1.2.2. La base de l'unité de recherche climatique (Climatic Research Unit-CRU TS3)[18]

Présentation

La base CRU est l'une des sources de données climatiques les plus utilisées. Le CRU est une unité de recherche rattachée à l'Université d'East Anglia en Angleterre. L'unité fournit depuis de nombreuses années des grilles de données dont les couvertures spatiales et temporelles ont évolué. Dans les années 1990, une numérotation des versions a été mise en place. Les données CRU les plus récentes disponibles actuellement sont celles de la troisième version de la base : CRU TS3. La base CRU TS3 doit regrouper à terme les séries de plusieurs variables climatiques depuis 1901 jusqu'à 2004: précipitation terrestre, température, couverture nuageuse, fourchette de température diurne, fréquence des jours de gel, température journalière et moyenne mensuelle, température minimale et maximale, pression atmosphérique, fréquence des jours de pluie. Toutes ces séries ne sont pas disponibles actuellement. La base CRUTEMP3 est une sous catégorie de CRUTS3, elle contient les données de température aérienne au dessus de la surface terrestre et les anomalies de température mensuelle, de 1850 à 2006 pour une grille de 5°lat/lon. Elle est associée à la base HadCRUT3 qui regroupe à la fois les séries pour la surface maritime et terrestre. La description de la construction de cette version est faite dans Brohan *et al.* (2006). Les données de température de la base CRUTEMP3 ne sont pas exprimées en termes de valeurs mais d'anomalies. L'anomalie est définie en météorologie comme l'écart de la série à sa moyenne de long terme.

Principe de construction

La base de données CRUTEMP3 est une amélioration de la version 2 de la base CRU (CRUTEMP2). Elle est le résultat de l'amélioration successive d'une méthodologie développée au sein du Climatic Research Institute à la fin des années 1980 (Jones *et al.* 1986a, b et c, Jones 1994).

[17] Les conséquences d'une tendance et d'une rupture de tendance pluviométrique sur la croissance économique des pays est également étudiée par Barrios *et al.* (2010) à partir de la base CRU présentée ci-après.
[18] Cette partie a été rédigée avant la publication en janvier 2012 de l'article de Jones *et al.*, concernant la nouvelle base CRUTEMP4 et avant la diffusion des données en avril 2012 sur le site CRU. Dans cette dernière version, seules les données de température sont disponibles jusqu'en décembre 2010 (grille 5x5°).

La base est développée selon une grille de précision de 5° de longitude/latitude. Cette précision est relativement faible, elle correspond, au niveau de l'Equateur à une donnée estimée tous les 500 km. La méthodologie décrite dans Brohan *et al.* (2006) consiste à assigner chaque station au quadrillage dans lequel elle se situe. La distance entre la station et le centroïde du quadrillage n'est pas prise en compte. La méthode ne tient pas non plus compte de l'altitude. Les auteurs utilisent une méthode d'anomalies des climats : CAM (*Climate Anomalies Method*) pour développer l'interpolation entre les points de pluviométrie et température.

Les auteurs effectuent leur travail d'interpolation à partir des données calculées en terme d'anomalies. Ce travail présente plusieurs avantages. Comme ils utilisent différentes sources d'informations et afin d'éviter les problèmes d'agrégation que peut poser l'hétérogénéité des sources, les auteurs de la base CRU expriment leurs données comme des déviations à une moyenne calculée pour la période où le plus grand nombre de données est disponible : 1961-1990. S'il existe une différence constante entre deux bases de données sources –liée par exemple à une différence de calcul systématique–, cette dernière est ainsi purgée dans l'erreur. De plus, les anomalies sont spatialement plus conservatrices que les données en niveau (Jones et Hulme 1996) ce qui répond mieux au problème engendré par les données manquantes, notamment lorsqu'il s'agit des valeurs extrêmes de la zone. Le travail sur l'anomalie de la série plutôt que sur les valeurs absolues de température permet également de palier au problème d'agrégation des données au niveau mensuel (qui peuvent varier selon les pays) et de ne pas prendre en compte les problèmes liés aux altitudes différentes des stations de la base (dont la différence de niveau systématique passe dans l'erreur).

De plus les auteurs montrent que, la valeur en niveau peut être retrouvée selon un calcul simple à partir des anomalies interpolées telles qu'elles sont présentées dans la base. En effet, si on définit le point estimé Tr comme une moyenne pondérée (avec W_i poids de la station) des valeurs des différentes stations i de la zone R pour l'année k (T_{ik}), on a :

$$T_R = \sum_{i=1}^{N} w_i \, T_{ik} \qquad (5)$$

Alors, on peut effectuer la même interpolation sur l'écart (l'anomalie de la série), calculée à partir d'une moyenne pour la période *i*

$$\Delta T_{ik} = T_{ik} - T_i \qquad (6)$$

Ainsi, on retrouve T_R liée à cette interpolation

$$T_R = \sum_{i=1}^{N} w_i \, T_{ik} + \sum_{i=1}^{N} w_i \, \bar{T}_i \qquad (7)$$

De plus cette méthode permet de prendre en compte une différence de variabilité selon les stations en intégrant l'écart type des séries de stations dans le calcul.

Après avoir sélectionné les stations selon la disponibilité sur la période d'intérêt et calculé les anomalies pour ces données source, les auteurs effectuent une moyenne des données de stations disponibles dans chaque grille. La faible résolution d'analyse leur permet d'avoir dans la plupart des grilles de quadrillage de 5° au moins une station. Ainsi, chaque centroïde est associé à la valeur du point de station dans le quadrillage ou à une moyenne des points de stations dans le quadrillage). Dans les versions antérieures à CRUTEMP3, lorsque des grilles ne contenaient pas de donnée leurs valeurs étaient calculées à partir des valeurs des grilles voisines (Jones *et al.* 2001). La version de CRUTEMP3 décrite par Brohan *et al.* (2006) n'autorise plus cette correction, aussi certaines cases du quadrillage sont vides, cette restriction permet une meilleure prise en compte de l'incertitude attribuée à chaque case. Les valeurs estimées des données climatiques sont très dépendantes du nombre de stations disponibles dans la grille, de la corrélation entre les sites et de la variabilité temporelle de la série estimée (Jones *et al.* 1997). Les auteurs présentent donc toujours les erreurs et la variance de la série (Jones *et al.* 1997 et 2001).

Notons que pour certaines aires géographiques, un quadrillage plus précis a été réalisé grâce à la forte densité de données de stations disponibles (particulièrement dans l'hémisphère Nord).

La méthode d'interpolation proposée est très simple et les données sont peu modifiées. Elle se heurte toutefois à une volonté systématique d'augmenter les bases « source » seul moyen d'améliorer la précision du quadrillage. Le nombre de données « sources » augmentant dans le temps, chaque donnée interpolée est corrigée du nombre de stations utilisées pour la produire (Brohan *et al.* 2006).

Finalement, les grilles de données n'étant pas un quadrillage de superficie égale, les auteurs corrigent leurs données de la superficie du quadrillage (Jones 1994) telles que :

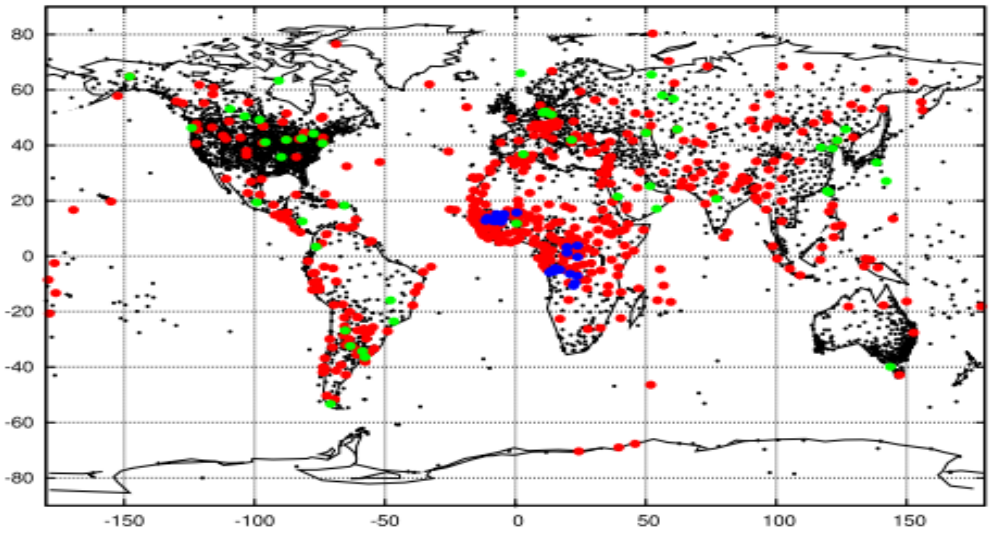
$$\Delta T_k = \frac{\sum_{i=1}^{N} cos(lat\ i)\Delta T_{ik}}{\sum_{i=1}^{N} cos\ (lat\ i)} \qquad (8)$$

Caractéristiques de la base

Les auteurs développent la base CRUTEMP3 à partir de relevés de stations météorologiques disponibles dans le monde entier. La base de données brutes de référence est la même que celle utilisée pour la construction de CRUTEMP2 (Jones et Moberg 2003). Cette dernière a ensuite été complétée notamment avec l'inclusion de stations du Mali, de la République démocratique du Congo, de Suisse, d'Autriche et d'Antarctique. L'ensemble des données traitées est issu principalement, des services de météorologie nationaux (données collectées directement par le CRU), du GHCN (Global Historical Climatology Network), des données du World Weather Records (publication à partir de 1980), des données nationales diffusées par l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM). Ces données sont décrites et classées en cinq catégories selon leur source, leur période et leur aire géographique de couverture dans l'article de Jones et Moberg (2003). Finalement les auteurs retiennent 4 349 stations mais, après suppression des doublons et homogénéisation des données les auteurs utilisent seulement 4 138 stations (Figure 1.3). En effet, les auteurs procèdent à de nombreuses homogénéisations des séries : mise au format mensuel, harmonisation des mesures, détection de séries aberrantes. Avant toute interpolation,

les séries de valeurs dépassant cinq écarts-types par rapport à la moyenne Ti sont exclues des bases sources (Brohan *et al.* 2006).

FIG. 1.3-Répartition des stations météorologiques utilisées pour la construction de CRUTEMP3



Note : La carte présente les stations utilisées dans la base CRU. Les points noirs marquent toutes les stations, les cercles verts indiquent les stations supprimées entre CRUTEMP2 et CRUTEMP3, les points bleus sont les stations ajoutées et les rouges, les stations modifiées. La plupart des stations modifiées n'ont en fait subi que des changements mineurs (correction d'une seule valeur aberrante par exemple).

Source : Brohan *et al.* (2006)

La base CRU s'appuie donc sur un nombre plus limité de stations que la base présentée précédemment (VasClim0) et sa résolution géographique est plus faible. Toutefois elle est beaucoup plus utilisée dans la littérature. Les bases météorologiques construites par CRU sont utilisées dans plusieurs rapports du GIEC Groupe Intergouvernemental d'Experts sur le Changement climatique (Folland *et al.* 2001) et par des modèles agronomiques. De plus, elles bénéficient de l'expertise reconnue de l'Unité CRU dans le domaine (première base krigée en 1994). La base CRU a également été associée aux travaux du centre de recherche Tyndall sur le changement climatique qui fournit un modèle de projection de changement climatique à horizon 2100 à partir des données historiques de la base CRU sur la période 1901-2000 (Mitchell *et al.* 2004). De plus cette base a donné lieu à une publication comparant trois bases mondiales similaires produites par le CRU, le NCDC et le GISS (Jones et Wigley 2010). Ces deux dernières sont des bases de données de température aérienne terrestre et maritime quadrillées. Leurs résultats sont très similaires à ceux de la base CRU.

La base CRU est également l'une des seules bases de grilles mondiales disponible au niveau national grâce au travail de Mitchell *et al.* (2004). Elle peut donc être utilisée au niveau mondial comme au niveau régional ou national comme l'ont déjà fait certains économistes (Burke *et al.* 2009, Barrios *et al.* 2010).

1.2.3. Base de l'université de Delaware : Udel (2.01)

Présentation

La base de l'Université de Delaware offre une grille de données climatiques mondiale pour la période 1900-2008. Les auteurs principaux sont les professeurs Willmott et Matsuura. La base est produite au sein du Centre de recherche sur le climat du département de géographie de l'Université de Delaware aux Etats Unis. Elle regroupe des données de pluviométrie et de température mensuelles, disponibles pour l'ensemble de la surface terrestre du globe. La précision de la grille est de 0.5°lat./lon. Les auteurs fournissent également plusieurs versions de leur base, celle présentée ici est la plus récente : la seconde version : Terrestrial Air Temperature: 1900-2008 Gridded Monthly Time Series (Version 2.01 datant du 22 juin 2009).

La technique d'interpolation de la base de données est triple et décrite dans différents articles (Willmott *et al.* 1985, Willmott et Matsuura 1995, Willmott et Robeson 1995).

Principe d'interpolation

Les auteurs utilisent une combinaison de différentes méthodes d'interpolation spatiale éprouvées dans de précédents articles. Ils utilisent une combinaison du modèle d'élévation numérique (DEM), interpolation assistée présentée par Willmott et Matsuura en 1995, de l'interpolation traditionnelle présentée dans l'article de Willmott *et al.* (1985) et de l'interpolation de climatologie assistée par ordinateur (IAO) décrite par Willmott et Robeson en 1995.

Dans leurs travaux, notamment l'article de 1995, Willmott et Matsuura montrent que la prise en compte de l'élévation (l'altitude du point) peut augmenter la précision de l'interpolation. Cet argument justifie, selon les auteurs, l'utilisation de l'interpolation DEM qui utilise un quadrillage de l'altitude terrestre. De façon simplifiée, chaque station est abaissée au niveau de la mer, selon une règle liant la température à l'altitude. Les auteurs estiment une relation entre l'altitude et la température d'environ +6.5°C par 103 mètres de baisse de l'altitude (Willmott et Matsuura 1995).

Ensuite une interpolation simple des données est effectuée à partir d'un algorithme de Shepard. Finalement chaque point de grille est relevé à son altitude et la température est augmentée selon la même règle que pour l'abaissement (Willmott et Matsuura 1995).

L'interpolation est réalisée avec une version sphérique de l'algorithme de Shepard, qui emploie une méthode améliorée de pondération par l'inverse de la distance en prenant en compte la sphéricité du globe terrestre (Shepard 1968, Willmott *et al.* 1985). L'algorithme de Shepard (1968) est une méthode simple d'interpolation linéaire, utilisant l'inverse de la distance d'un point pour estimer sa valeur. Ainsi la valeur estimée de la température au point i est définie comme suit :

$$\hat{T}_i = \frac{\sum_{j=1}^{n_i} w_{ij}\, T_j}{\sum_{j=1}^{n_i} w_{ij}} \qquad (9)$$

La formule est similaire à celle utilisée pour le krigeage. Dans ce cas, w_{ij} est l'inverse de la distance entre le point à estimer i et la station j, T_j est la valeur de la température[19] à la station la plus proche du point à estimer i et n le nombre de stations influençant l'estimation. Dans l'article de 1985, les auteurs montrent que la prise en compte de la sphéricité du globe pour une interpolation mondiale améliore les résultats d'estimation de l'algorithme. Cette distance sphérique améliore doublement la précision puisqu'elle entre dans l'algorithme d'une part pour interpoler les valeurs de la grille et d'autre part pour déterminer la station la plus proche du point à estimer. Au total, le nombre de stations qui influent sur l'estimation d'un point augmente (20 stations en moyenne, 7 dans les versions précédentes).

Les auteurs utilisent également l'interpolation de la climatologie aidée: CAI (*Climatology aided interpolation*). La méthode est présentée dans l'article de Willmott et Robeson (1995) et s'inspire des travaux de Legates et Willmott (1990a et 1990b).[20]

Les auteurs procèdent à une validation croisée de leurs résultats. Les erreurs d'interpolation sont calculées comme la différence entre la valeur vraie d'une station et l'estimation de la valeur de cette station si cette dernière est enlevée de l'échantillon (Willmott et Matsuura 1995). Les erreurs sont ensuite quadrillées suivant le même processus d'interpolation. Chaque point d'estimation est donc associé à une erreur estimée.

Caractéristiques de la base

Les auteurs utilisent plusieurs sources de données climatiques dont celles du réseau mondial de données climatologiques (*Global Historical Climatology Network*, dans sa version la plus récente GHCN2[21]). Le GHCN2 est à l'heure actuelle la plus importante base de données de stations en libre accès (Peterson et Vose 1997). Les autres sources proviennent du Service de l'environnement du Canada (*Atmospheric Environment Service/Environment Canada*), de l'Institut hydrométéorologique d'Etat de Saint-Pétersbourg (*the State Hydrometeorological Institute*), du réseau de climatologie synoptique GC-Net (*the Global Synoptic Climatology Network*), du projet de la station météorologique automatique (Université de Wisconsin-Madison), et du projet surface du globe résumé du jour (*Global Summary of the Day GSOD*)[22].

[19] Un travail similaire est effectué pour la pluviométrie

[20] Les résultats de l'interpolation sont ainsi confrontés aux « climatologies », notamment celles de Legates et Willmott (1990a et 1990b).

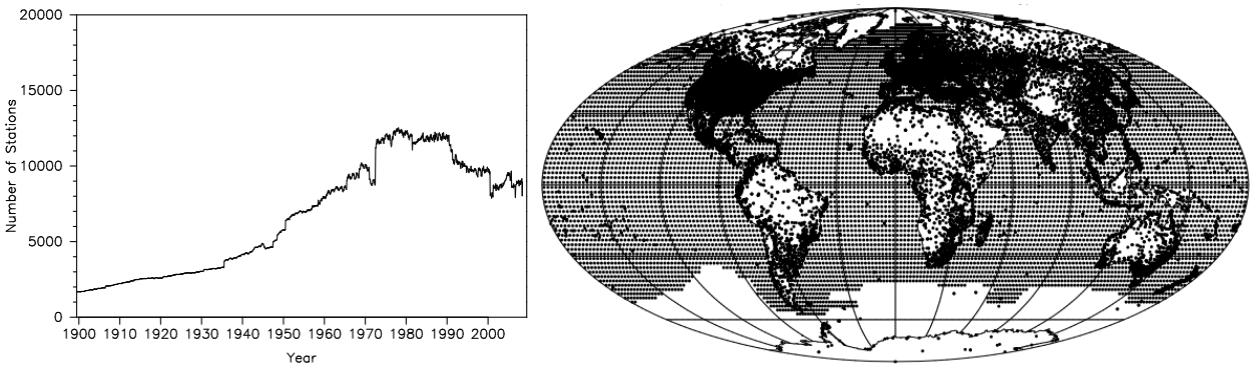
[21] La description de la base GHCN2 est disponible sur le site : http://www.ncdc.noaa.gov/ghcnm/v2.php.

[22] Le projet Global Summary of Day (GSOD) est un projet du National Climatic Data Center (NCDC), de la « *National Oceanic and Atmospheric Administration»* (NOAA) américain et plus particulièrement du service *The National*

La base de référence de la base Udel est celle du GHCN2. Les séries ont été complétées pour plusieurs stations à partir de données issues d'autres sources et les valeurs mensuelles ont parfois été calculées à partir de données journalières ou horaires. Lorsqu'une station présente deux valeurs concurrentes selon la source les auteurs définissent la valeur source comme la médiane des deux valeurs concurrentes. Si les coordonnées des stations ne sont pas exactement identiques, les auteurs considèrent qu'il s'agit de deux stations très proches mais différentes. Ce choix entraine un nombre de stations disponibles au cours de cette période qui varie de 1600 stations à environ 12200 selon les années. Comme le montre la figure 1.4, le nombre de stations disponibles augmente avec les années. Les stations sont réparties sur l'ensemble de la surface terrestre. Les moyennes mensuelles de température et de pluviométrie sont interpolées selon une précision de 0.5°latitude/longitude.

La base Udel est utilisée par Dell *et al.* (2009) qui revisitent les études de croissance grace à cette base.

FIG. 1.4-Localisation et nombre des stations utilisées dans Udel pour la période 1900-2008



Source :http://climate.geog.udel.edu/~climate/

Le Tableau 1.2 résume les caractéristiques principales de ces trois bases mondiales. Nous y joignons une base régionale : le *Climate Change Profile Country*, produite par l'Université d'Oxford et le Programme des Nations Unies pour le Développement (PNUD). Cette base est décrite plus amplement en annexe. Dans le Tableau 1.2, il apparaît que la base VasClim0 est celle disponible sur la période temporelle la plus courte. En revanche la base CRUTEMP3 est disponible sur quasiment la même période que la base Udel, mais sa grille de quadrillage est moins précise que la base Udel Nous décidons donc de produire une nouvelle base de données climatiques pour les aires politiques à partir de la base Udel.

Environmental Satellite, Data, and Information Service (NESDIS). Le site Internet de NCDC permet un accès libre à de nombreuses données historiques de stations climatiques : http://www7.ncdc.noaa.gov/CDO/cdoselect.cmd?datasetabbv=GSOD&countryabbv=&georegionabbv=.

TAB. 1.2-Présentation des différentes bases météorologiques

Bases de données	VASClim0	CRUHad3*	UDel	Climate Change Country Profile**
auteurs	C.Beck et J.Grieser	P.Brohan, J.J.Kennedy, I.Harris, S.F.B.Tett et P.D.Jones	C.J. Willmott et K.Matsuura	M. New, G. Lizcano et C.McSweeney
laboratoires	Global Precipitation Climatology Center (GPCC) and Institute for Atmosphere and Environment-J.W.Goethe University of Frankfort	Climate Research Unit - University of East Anglia	Center for Climatic Research-University of Delaware	Oxford UNDP Climate Change Country Profiles, School of Geography and the Environment
séries disponibles	précipitation	anomalies de température aérienne sur la surface terrestre et maritime	température aérienne, précipitation, *water terrestrial budget, monthly moisture indices*	température/précipitation/4 indices de température journalière extrême/4 indices de précipitation journalière extrême
quadrillage	0.5°lat./lon.	5°lat./lon.	0.5°lat./lon.	2.5°lat./lon.
disponibilité temporelle	1951-2000	1850-2006	1900-2008	selon pays
fréquence	mensuelle	mensuelle	mensuelle	mensuelle
disponibilité géographique	mondiale	mondiale	mondiale	nationale (55 pays)
principales bases de données de stations utilisées	FAO, réseau CRU, GHCN	réseau CLIMAT, GHCN, World Weather Records	GHCN2, GC-Net, Service environnement Canada, Institut hydrométéorologique d'Etat St-Petersburg	CRU, Udel, GPCC ERA40, NCEP, HadEX
nombre de stations	9 343	4 138	1 600 à 12 200	selon pays
sites Internet de référence	http://www.dwd.de/	http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/	http://climate.geog.udel.edu/~climate/	http://country-profiles.geog.ox.ac.uk/
disponibilité de la base	libre accès	libre accès	libre accès	libre accès
article de référence de la base	Beck *et al.* (2005)	Brohan *et al.* (2006)	Willmott et Matsuura (1995)	McSweeney *et al.* (2010)

* comme partie de CRUTS3 à venir sur la même résolution spatiale données de couverture nuageuse, pluviométrie, température diurne, pression atmosphérique, humidité,… sur la période 1901-2008.
**base régionale décrite en annexe.

1.3. Création de la base climatique « pays » à partir de la grille Udel[23].

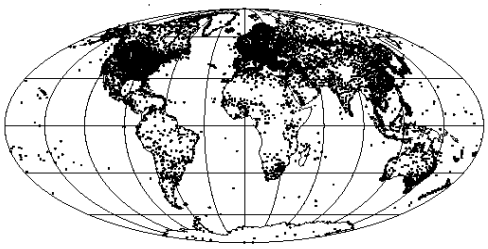
Les bases de données mondiales présentées sont peu utilisées ni utilisables sous la forme de quadrillage par les économistes[24]. Les informations économiques sont généralement disponibles au niveau des aires géopolitiques : états, régions. Il est donc important de disposer de base climatique au niveau de ces aires. En nous inspirant du travail de Mitchell *et al.* (2002) pour la base New *et al.* (1999, 2000)[25], cette partie consiste à créer une base de données climatiques « pays » à partir de la grille de données Udel précédemment décrite. Le but de ce travail est de fournir des données climatiques nationales, calculées comme la moyenne pluviométrique des points situés au sein de l'aire géographique considérée.

Nous choisissons d'exploiter la grille de données Udel décrite dans la partie 1.2. Cette dernière présente deux avantages. Tout d'abord elle fournit le quadrillage le plus précis de 0.5°lat./lon., soit 50km à l'Equateur. Cette précision est beaucoup plus importante que celle de la base CRU (5°lat./lon.). La base Udel possède également les données les plus récentes (jusqu'en 2008) alors que les deux autres bases s'arrêtent en 2000 (VasClim0) et 2006 (CRUTEMP3)[26].

Cette base fait l'objet d'une critique dans l'article de Brückner et Ciconne (2011), les auteurs soulignent le problème du nombre de stations de référence pour les pays d'Afrique Sub-Saharienne. D'après eux, le nombre de stations de référence, alors qu'il est relativement important dans cette zone pour la période 1960-1970 a tendance à diminuer avec le temps, rendant ainsi l'interpolation non conforme au regard des critères de l'OMM. La critique du nombre de stations inégal dans le temps est recevable pour les versions antérieures de la base (Brückner et Ciconne se réfèrent à la version 1.01 de la base dans leur article). Le nombre de stations disponibles avec le temps varie en effet comme l'indique la Figure 1.4 et diminue avec le temps. Cela est vrai en général et plus particulièrement pour les pays d'Afrique subsaharienne. Après les années 1980, la version v.1.01, présentant des données de 1950-1996 est basée sur relativement peu de données de stations sub-sahariennes et leurs distributions spatiales sont variables dans le temps et inégales. La version 1.02, présentant les données climatiques de 1950-1999 repose quant à elle sur plus de stations d'Afrique sub-saharienne à partir des années 1990 et mais surtout, leurs distributions spatiales sont plus représentatives. Finalement la version 2.01 présentée ici (données de 1900 à 2008) est basée sur encore plus d'enregistrement de stations que les bases précédentes et particulièrment pour l'Afrique sub-saharienne. Les animations des distributions mensuelles des stations sont visbles sur le site web de la base. La Figure 1.5 propose une illustration du nombre de stations utilisées pour l'interpolation de la pluviométrie en octobre 2008. Aussi les auteurs de la base, Willmott et Matsuura recommandent d'extraire au sein de la base v.2.01 les années d'intérêts nécessaires pour l'étude.

[23] La base de données est disponible sur demande auprès de l'auteur.
[24] Exception faite de l'exploitation originale proposée par Nordhaus (2006).
[25] Sur le site du Climate research Unit, sont disponibles par pays et selon ce découpage : les données de précipitation et de température par pays pour la période 1901-1998 (Mitchell *et al.* 2002) et pour les périodes 1901-2000 ainsi que des scénarii : 1901-2100 et 2070-2099 (Mitchell *et al.* 2004).
[26] Le choix de cette base Udel a été effectué avant la diffusion des données CRUTEMP4 en avril 2012. Cette nouvelle base rend désormais disponibles des données climatiques à précision de 5°lat./lon. jusqu'en décembre 2010.

FIG. 1.5-Localisation des stations utilisées pour l'interpolation de la température en Octobre 2008



Source : Site http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2_Ts_2009/T2000_2008_loc.html

Notre travail pour la construction de la base climatique des aires politiques consiste à associer les points de quadrillage de la grille Udel aux « pays » dans lesquels ils sont situés. Comme dans l'article de Mitchell *et al.* (2002), le terme pays doit être pris avec précaution. Il s'agit d'une aggregation des données climatiques selon les frontières d'états telles qu'elles sont définies par les membres des Nations Unies[27]. Afin de permettre une exploitation la plus facile possible nous distinguons les territoires de certains pays lorsque ces derniers possèdent des caractéristiques climatiques homogènes différentes de leurs pays. Par exemple, la Polynésie française ou la Guyane sont considérées indépendamment de la France métropolitaine ; de même pour les îles Malouines. Plus généralement les territoires d'outre mer sont considérés séparément.

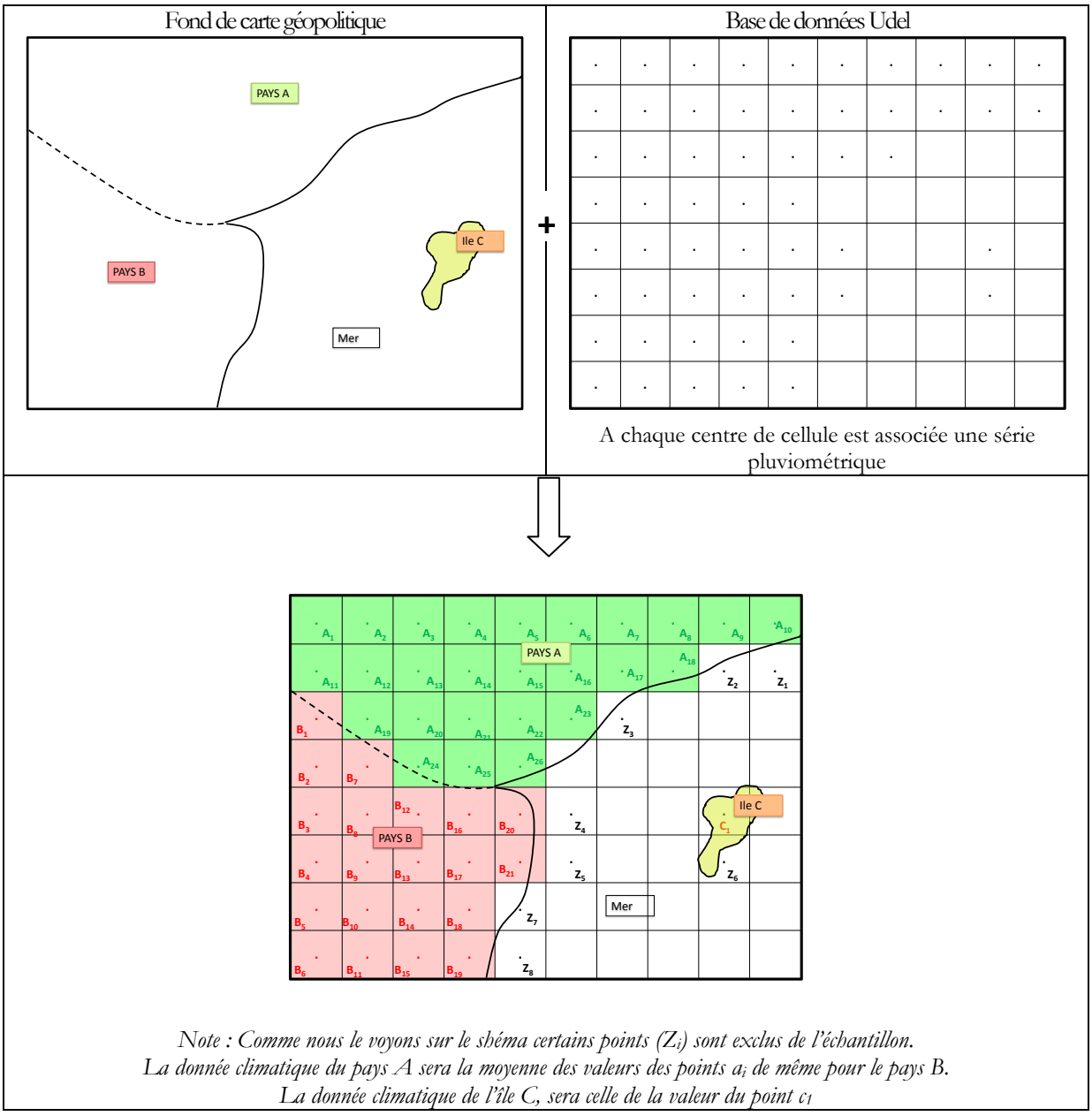
Le travail d'appariement est effectué à partir du logiciel MapInfo. La *grille* mondiale Udel utilise le même système de géo référencement que la carte des frontières géopolitiques sollicitées pour l'appariement : World Geodetic System 1984 (WGS-84).

Chaque point de la grille est associé au pays dans lequel il est situé. Si le pays contient plus d'un point de quadrillage, une moyenne des points est ensuite effectuée pour obtenir une valeur par pays. Sinon c'est le point de quadrillage qui donne la valeur au pays, comme indiqué dans la Figure 1.6.

L'appariement se fait selon la localisation du centre de la cellule du quadrillage. Aussi il peut entraîner une perte d'information. La base Udel présente les variables climatiques sous forme d'une grille. Chaque donnée climatique est associée au centre des cellules de la grille. Le logiciel MapInfo utilise le centre de la cellule (le centroïde) comme repère. Si le centre de la cellule est à l'intérieur de la frontière du pays, la cellule est considérée comme faisant partie du pays, la variable climatique de ce point est donc associée au pays. Dans le cas inverse, elle n'est pas prise en compte pour le pays. Ne disposant pas des coordonnées géographiques des frontières maritimes, les centroïdes qui ne sont pas situés sur le domaine terrestre ne sont pas exploités ; comme le montre la Figure 1.6. Ces données ne sont associées à aucun pays. Le nombre de points de quadrillage considérés pour chaque pays est présenté en annexe (Table A1.2).

[27] Le travail ayant été effectué avant la reconnaissance de l'Etat Sud-Soudan, ce dernier n'apparaît pas dans la base de données.

FIG. 1.6-Mise en correspondance des coordonnées géographiques et des frontières



Note : Comme nous le voyons sur le shéma certains points (Z_i) sont exclus de l'échantillon.
La donnée climatique du pays A sera la moyenne des valeurs des points a_i de même pour le pays B.
La donnée climatique de l'île C, sera celle de la valeur du point c_1

La construction de la base pour les aires politiques fait face à deux problèmes :

- la surface inégale du quadrillage de la base,
- le découpage de la base en quadrillage qui ne permet pas de respecter exactement les lignes de frontières.

Tout d'abord, le système de géoréférencement WGS-84 ne permet pas un quadrillage suivant un découpage homogène de la surface terrestre: les cellules de la grille n'ont pas toutes la même superficie. Chaque point de données est considéré comme le centroïde d'un polygone dont la surface suit la courbure du globe terrestre. Chaque donnée est donc pondérée par la surface de la case à laquelle il est associé, ou au cosinus de la latitude du centroïde (Mitchell *et al.* 2002).

Selon la formule suivante :

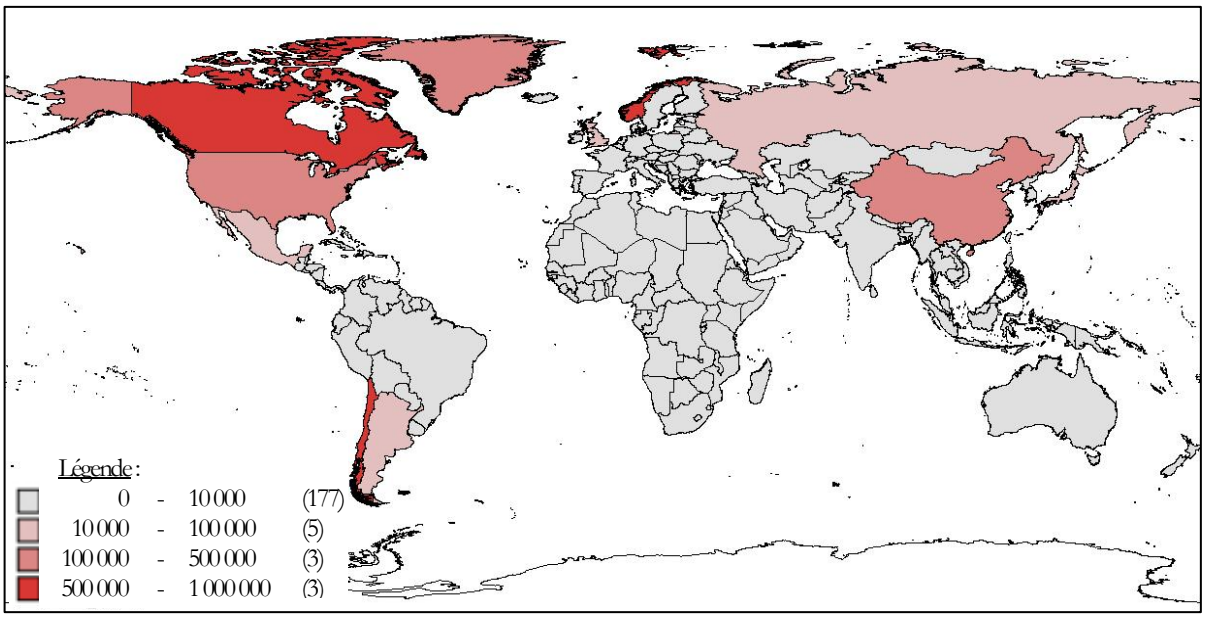
$$\Delta T_k = \frac{\sum_{i=1}^{N} cos(lat\ i)\Delta T_{ik}}{\sum_{i=1}^{N} cos(lat\ i)} \quad (10)$$

Cette manipulation n'a pas entraîné de perte de points. La base est construite à partir de 85 794 points de quadrillage, elle est diponible pour 189 pays et territoires.

Afin de comprendre les différences de résultats avec, et sans pondération de la superficie du quadrillage, nous avons effectué les deux calculs puis comparé les différences sur l'ensemble de la période 1900-2008. Les résultats sont présentés dans la Figure 1.6. Pour chaque pays nous avons calculé la somme des différences entre les deux bases, élevées au carré pour chaque année de la période 1900-2008. La Figure 1.7 présente cette somme. Les différences entre les deux bases apparaissent importantes pour les grands pays septentrionaux. En effet, du fait de la courbure du globe, les quadrillages sont extrêmement « déformés » dans cette zone. De même, les pays situés le long d'un méridien tels que le Chili sont formés de point de quadrillage de superficie très différente. La différence entre une moyenne pondérée et non pondérée est donc plus importante pour ce type de pays.

FIG. 1.7-Somme des écarts moyens entre les deux bases élevés au carré (en km²)

Moyenne pluviométrique nationale avec et sans pondération, suivant la superficie du quadrillage[28]



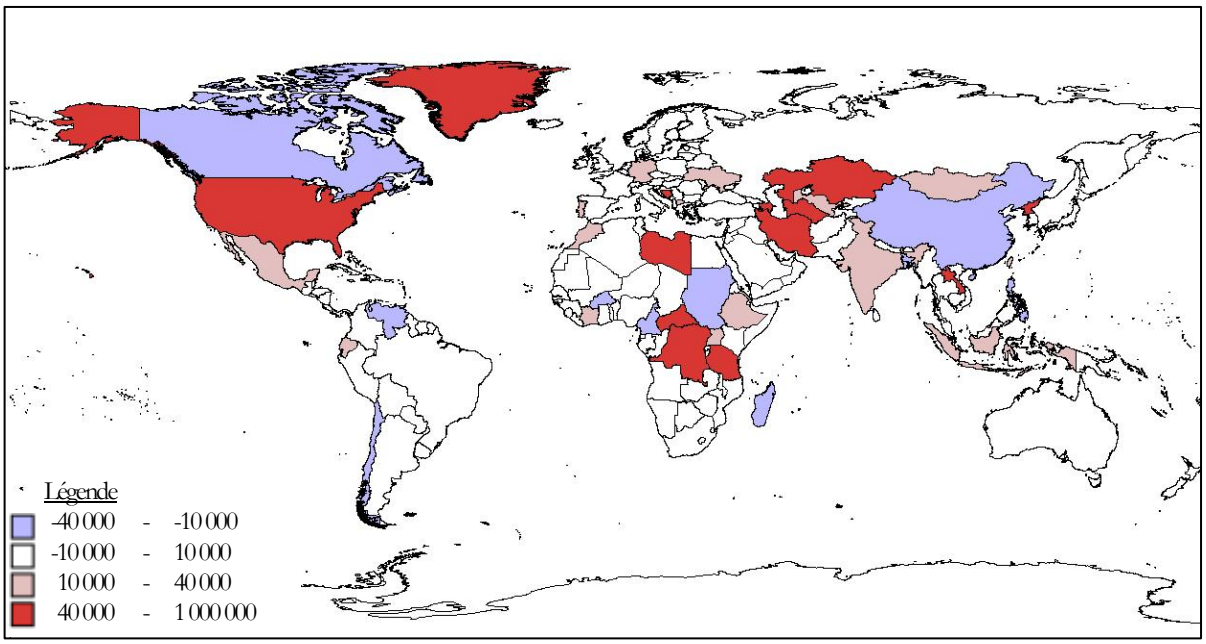
Note : La carte présente la somme des différences élevées au carré entre les deux bases sur la période 1900-2008. Entre parenthèse le nombre de pays dans chaque classe

La méthode choisie est une moyenne pondérée par la superficie du quadrillage lorsque le centroïde de ce dernier est situé au sein du pays. Toutefois, comme le montre la Figure 1.6, ce découpage ne suit pas rigoureusement les frontières du pays. Afin de compléter notre analyse nous comparons les différences de superficie des pays suivant le quadrillage ou selon leur superficie officielle. Les résultats sont présentés par la Figure 1.8. Les différences de superficie apparaissent significatives pour des pays de grande taille ou dont les frontières sont très « découpées » : Chine, Canada, Etats Unis, République Démocratique du

[28] Toutes les cartes qui suivent sont issues des calculs de l'auteur.

Congo. Une solution pour remedier à ce problème serait de suivre exactement les frontières du pays en divisant systématiquement les quadrillages situés sur les frontières. Les pondérations seraient ensuite effectuées uniquement sur la superficie du quadrillage située à l'intérieur du pays. Cette manipulation a été effectuée pour l'année 1900, les résultats sont peu différents de ceux obtenus par la méthode traditionnelle mais ils sont beaucoup moins faciles à gérer puiqu'ils obligent une démultiplication des données à chaque fois qu'un quadrillage est traversé par une frontière. De plus, la courbure du globe terrestre est très complexe à prendre en compte dans ce cas. Au vue du faible apport de cette manipulation nous préférons nous cantonner à l'approche précedemment décrite : chaque donnée de quadrillage est associée au pays dans lequel le centroïde du quadrillage est situé ; les données sont ensuite aggrégées au niveau national par une moyenne pondérée par la superficie de chaque quadrillage concerné.

FIG. 1.8-Comparaison des écarts de superficie suivant la grille ou les frontières des pays (en km²)



La base de données climatiques ainsi construite propose des données de température et de pluviométrie au niveau mensuel pour 189 pays et territoires pour la période 1900-2008, soit 247 212 données par séries climatiques.

1.4. Indicateurs construits à partir de la nouvelle base de données climatiques

Cette partie propose différents indicateurs construits à partir de cette nouvelle base de données climatiques. Afin que la base fournisse de bons indicateurs du climat, des chocs climatiques ou du changement climatique nous définissons d'abord ces thèmes. Puis nous proposons une série d'indicateurs construits à partir de cette base et pouvant être de bonnes approximations de ces éléments.

1.4.1. Temps, climat, choc climatique, changement climatique : quelques définitions

Le **temps** (*weather* en anglais) est une situation météorologique à un moment précis. C'est l'état du système climatique décrit à un instant donné. Il se distingue du **climat (***climate* en anglais) qui est un ensemble de conditions météorologiques moyennes (température, précipitations, etc.) d'une région ou

d'un lieu. D'après le Glossaire du 4ème rapport du Groupement Intergouvernemental d'Experts sur le Changement climatique (IPCC 2007a, Glossaire)[29] le climat désigne le « temps moyen », d'après cette définition, le climat « se réfère à une description statistique fondée sur la moyenne et la variabilité de grandeurs pertinentes sur des périodes allant de quelques mois à des milliers, voire des millions d'années. Ces grandeurs sont le plus souvent des variables de surface telles que la température, la hauteur de précipitation et le vent. Dans un sens plus large, le climat désigne l'état du système climatique, y compris sa description statistique». D'après l'Organisation Météorologique Mondiale (OMM), la période type sur laquelle ces conditions moyennes peuvent être calculées est de 30 ans. Ainsi, le climat est un élément de caractérisation géophysique. On distingue différents climats, parmi les plus connus : tropical, équatorial, tempéré. Il est important de noter que les conditions moyennes mais aussi la variabilité de certaines composantes climatiques, instabilité des pluies par exemple, entrent dans la définition du climat.

L'**instabilité** ou encore **la variabilité du climat** peut être considérée comme un élément de changement climatique ou comme un élément de définition du climat. En effet le rapport du GIEC distingue deux définitions : la variabilité interne et externe. D'après le GIEC, la variabilité du climat est constituée des « Variations de l'état moyen et d'autres statistiques (écarts-types, phénomènes extrêmes, etc.) du climat à toutes les échelles temporelles et spatiales au-delà de la variabilité propre à des phénomènes climatiques isolés ». Cette définition propose deux sortes de variabilité :

- la **variabilité interne** est due à des processus internes naturels au sein du système climatique
- la **variabilité externe** est liée à des forçages externes qu'ils soient naturels ou anthropiques

Le changement climatique est défini comme « Tout changement du climat dû à sa variabilité naturelle ou résultant de l'activité humaine » (IPCC 2007a, Glossaire). La Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques (CCNUCC) définit ceux-ci comme des « changements qui sont attribués directement ou indirectement à une activité humaine altérant la composition de l'atmosphère mondiale et qui viennent s'ajouter à la variabilité naturelle du climat observée au cours de périodes comparables »[30]. Selon cette définition, la variabilité externe entre directement dans la définition du changement climatique.

Un **choc climatique** est un évènement météorologique extrême, un épisode inattendu. C'est un « évènement rare selon les statistiques relatives à sa fréquence en un lieu donné » (IPCC 2007a, Glossaire). La définition de la rareté est fonction de la probabilité d'occurrence de l'évènement, toujours selon le rapport du GIEC : « phénomène météorologique extrême devrait normalement être aussi rare, sinon plus, que les dixième ou quatre-vingt-dixième percentiles. Par définition, les caractéristiques de ce qu'on appelle « conditions météorologiques extrêmes » varient d'un endroit à l'autre.

[29] L'ensemble des définitions présentées dans cette section sont issues de ce rapport.
[30] Définition reprise sur le site du GEF (*Global Environment Facility*), consulté en avril 2012 et disponible sur le site : http://www.thegef.org/gef/node/2518

1.4.2. Indicateurs calculés à partir de la nouvelle base de données

Nous utilisons la nouvelle base de données climatiques des aires politiques construites dans la partie précédente afin de calculer des indicateurs de climat, changement et choc climatique.

La base créée permet différents découpages géographiques et temporels suivants :

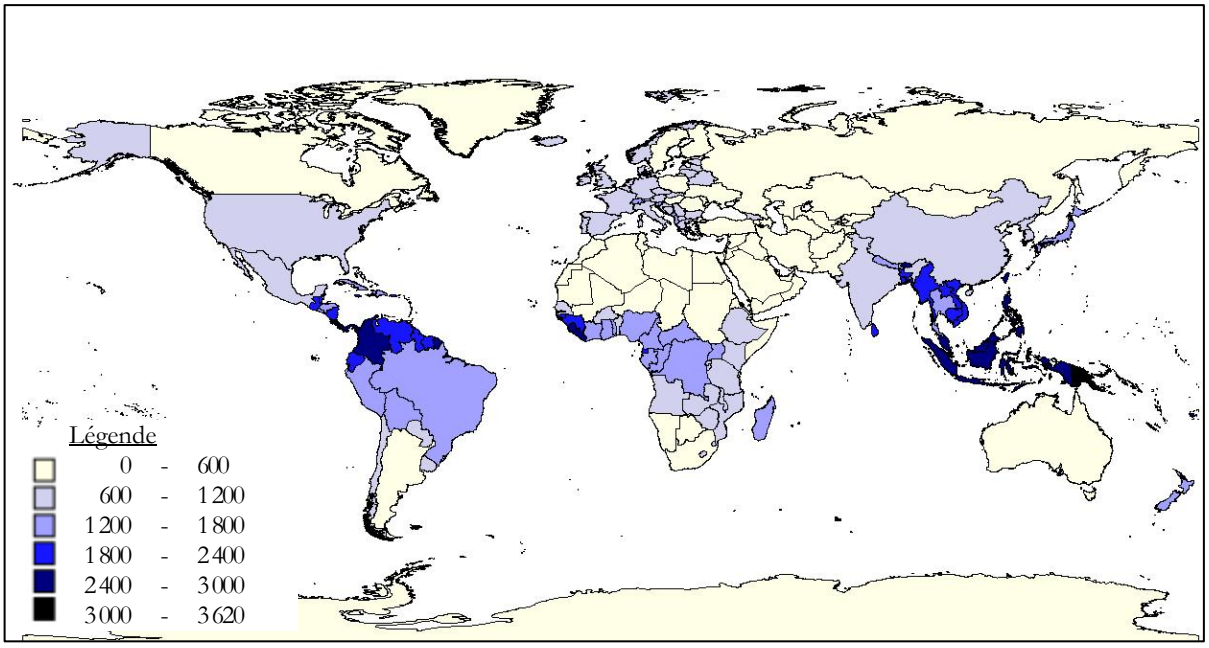
- la période temporelle choisie : depuis 1900, 1950 ou 1970 ;
- au niveau régional ou national c'est-à-dire suivant les moyennes nationales ou pour chaque point du quadrillage ;
- au niveau mensuel ou annuel.

Nous présentons les résultats depuis 1900 (sauf pour les calculs concernant le changement climatique), sur données nationales et au niveau annuel (température journalière moyenne sur l'année et cumul pluviométrique annuel).

Caractérisation du climat

La caractérisation du climat s'effectue à partir de **données moyennes**. Les cumuls annuels pluviométriques moyens et les températures journalières moyennes permettent une première caractérisation. Les Figures 1.9 et 1.10 présentent respectivement les cumuls pluviométriques annuels moyens et les valeurs de température journalières moyennes par pays calculées depuis 1900[31].

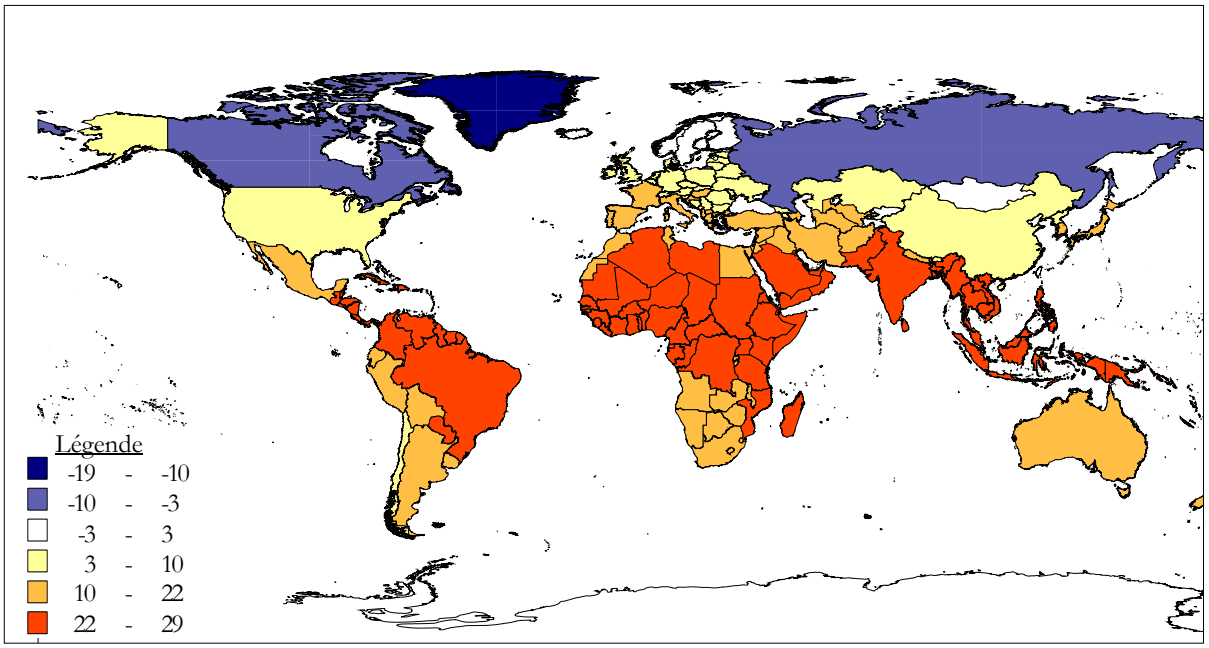
FIG. 1.9-Cumuls pluviométriques annuels moyens calculés sur la période 1900-2008



Les pays équatoriaux sont ceux connaissant le cumul pluviométrique le plus important. La carte 1.9 met en évidence des zones de très faibles précipitations au niveau des grandes zones désertiques : Sahara, Namibie et Australie par exemple.

[31] Puisque le climat peut être défini selon des calculs de moyenne sur une durée minimale de 30 ans, le même exercice peut être effectué à partir de 1970 seulement.

FIG. 1.10-Valeurs de température moyennes journalières calculées sur la période 1900-2008



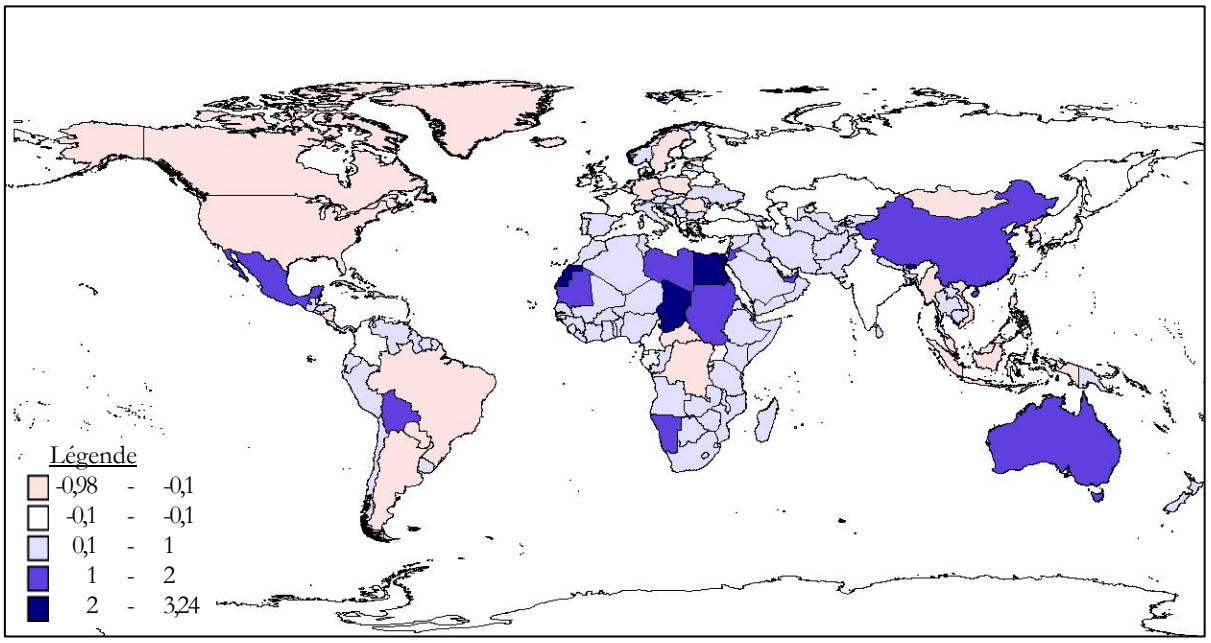
Comme attendu, les niveaux de température journalière moyenne les plus élevés sont situées au niveau de l'Equateur. Les pays septentrionaux sont au contraire les pays présentant les températures les plus basses.

Le coefficient d'asymétrie de la distribution des séries (*skewness*) permet également une caractérisation du climat (Figure 1.11 et 1.12). Le coefficient de *skewness* θ_1 est défini par le moment d'ordre 3 de la série tel que :

$$\theta_1 = E\left[\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^3\right] \quad (11)$$

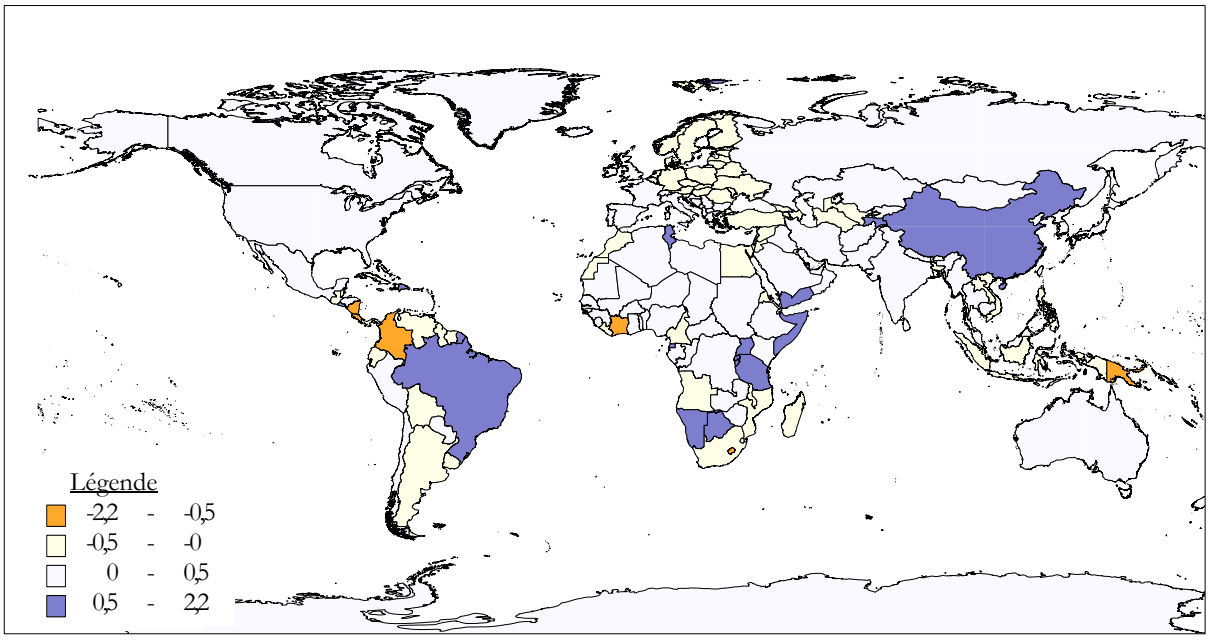
Avec $\bar{x}$ la moyenne de la série et σ l'écart type de la série. Une loi normale possède un coefficient d'asymétrie nul. Si le coefficient d'asymétrie est positif, l'asymétrie est situé à gauche : les fréquences les plus élevées sont à gauche. Au contraire si le coefficient est négatif l'asymétrie est à droite.

FIG. 1.11-Asymétrie de la distribution de la pluviométrie *(skewness)*



Concernant la pluviométrie, la Figure 1.11 montre que les pays présentant un coefficient d'asymétrie négatif sont les pays développés tels que les Etats-Unis, le Canada, l'Allemagne et des pays équatoriaux. Ces pays présentent une asymétrie de distribution vers la droite : la fréquence des distributions de pluviométrie au dessus de la moyenne est plus importante. Inversement les pays situés en zones désertiques présentent plutôt une *skewness* positive, indiquant une fréquence des sécheresses plus importante, ces pays connaissent un déficit structurel de leur pluviométrie et quelques épisodes d'excès de pluviométrie (inondations) plus rares. Les valeurs de *skewness* négatives sont particulièrement élevées pour le Tchad ou l'Egypte. Le coefficient d'asymétrie est beaucoup plus important en valeur absolue lorsqu'il est positif que lorsqu'il est négatif pour l'ensemble des pays du globe.

FIG. 1.12-Asymétrie de la distribution de température *(skewness)*



La distribution du coefficient d'asymétrie de la température est beaucoup plus hétérogène. Les valeurs du coefficient d'asymétrie sont moins importantes que sur les séries de pluviométrie. On remarque que les pays connaissant les fréquences d'épisodes de chaleur les plus élevés sont les pays d'Europe de l'Est et d'Europe Centrale. En revanche les pays en développement et particulièrement les pays africains connaissent un coefficient d'asymétrie positif indiquant une fréquence de distribution des niveaux de température plus importante en dessous de la température moyenne (Figure 1.12).

L'écart-type de la série ainsi que l'écart moyen (en valeur absolue) de la série à une moyenne ou une tendance de long terme peuvent également être considérés comme une bonne approximation de la variabilité climatique du pays. Notons que l'écart-type pondère de façon plus forte les évènements extrêmes par rapport à la moyenne des écarts en valeur absolue (ou écart moyen) puisque l'écart est élevé au carré dans la formule de calcul de l'écart type. Enfin, le coefficient de voussure des évènements extrêmes (chocs) procure également une information sur cette variabilité du climat des pays et particulièrement la fréquence des évènements extrêmes.

FIG. 1.13-Ecart-type de la pluviométrie, répartition par quartile

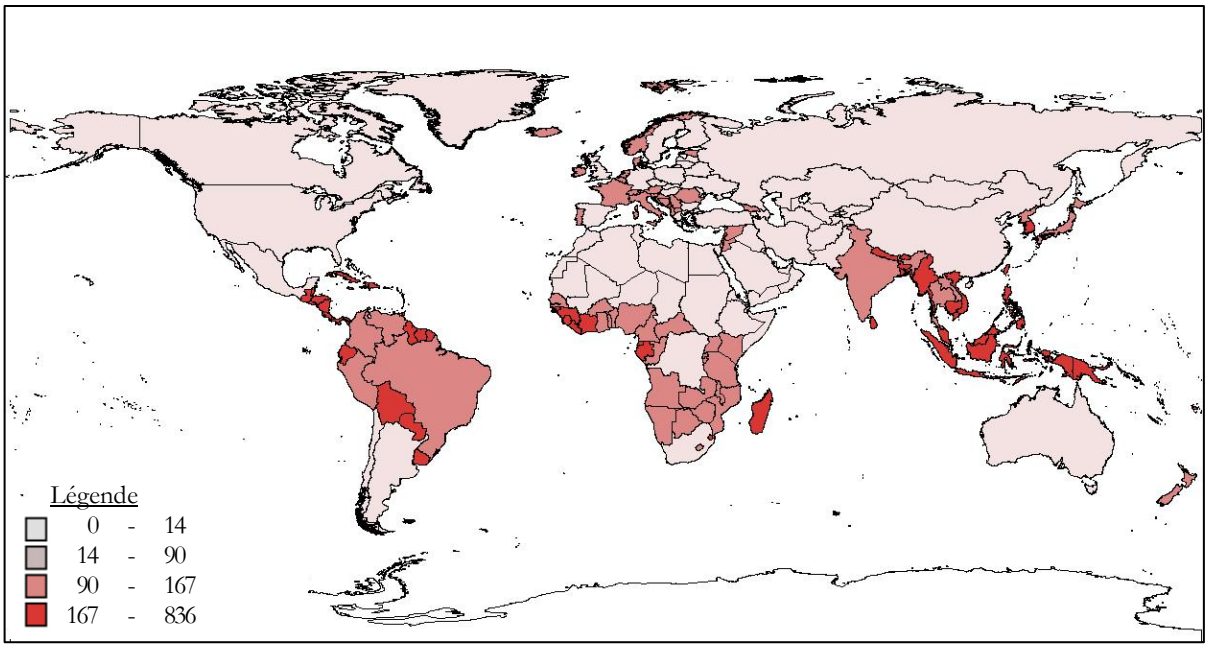
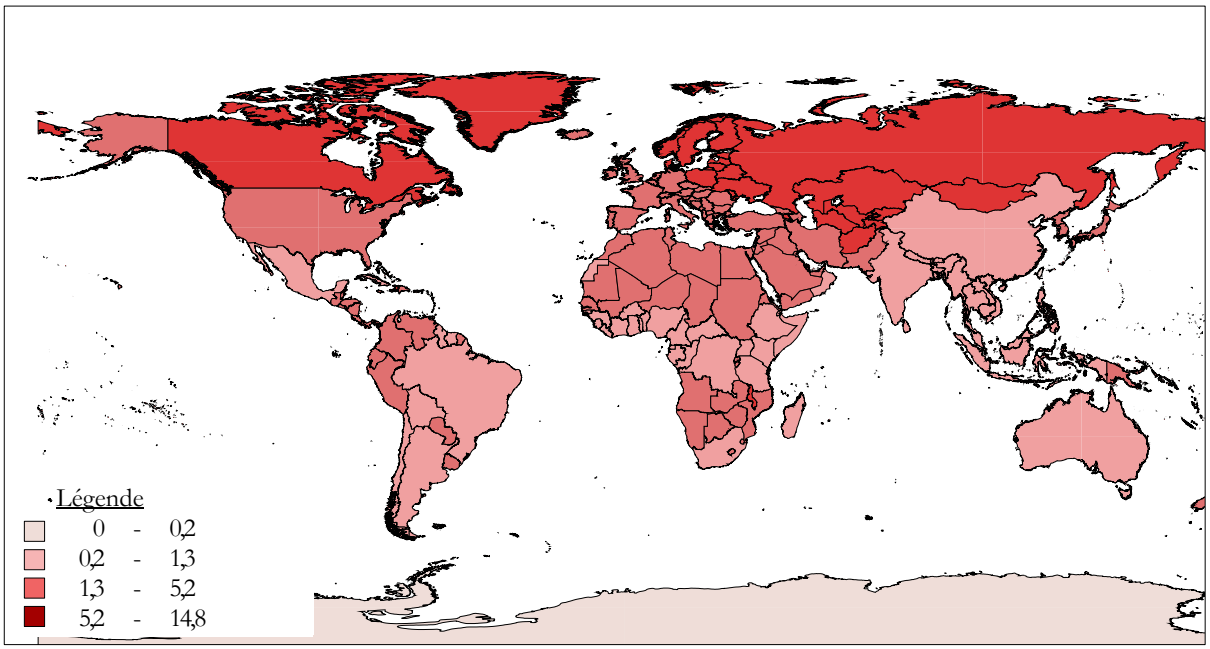


FIG. 1.14-Ecart-type des séries de température, répartition par quartile



Les Figures 1.13 et 1.14 présentent la valeur des écarts types de pluviométrie pour l'ensemble des pays du globe. On remarque que tandis que l'écart-type de pluviométrie est plus important pour les pays équatoriaux celui de la série de température est plus fort pour les pays septentrionaux. Ce résultat souligne l'importance du choix de la série climatique utilisée au niveau macroéconomique. Alors que l'écart type de la pluviométrie semble être un bon indicateur pour caractériser les pays en développement situés en zone équatoriale, les pays septentrionaux et tropicaux connaissent des niveaux d'écart-type plus élevés sur la série de température.

FIG. 1.15-Coefficient de voussure des séries de pluviométrie (*kurtosis*)

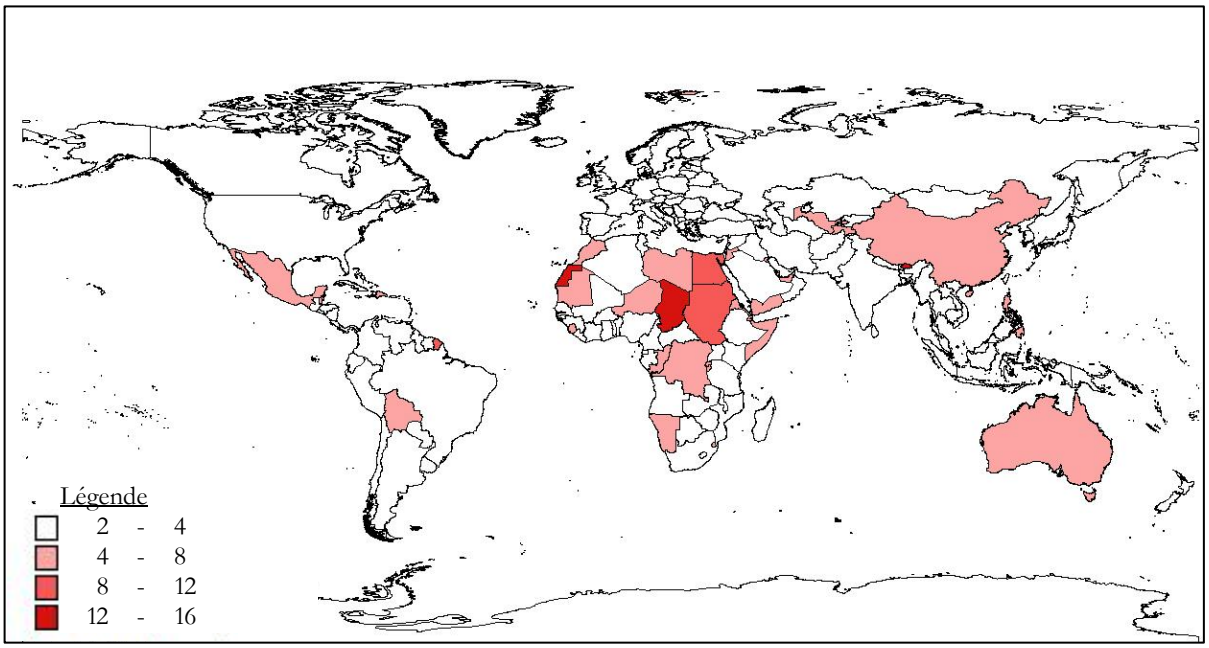
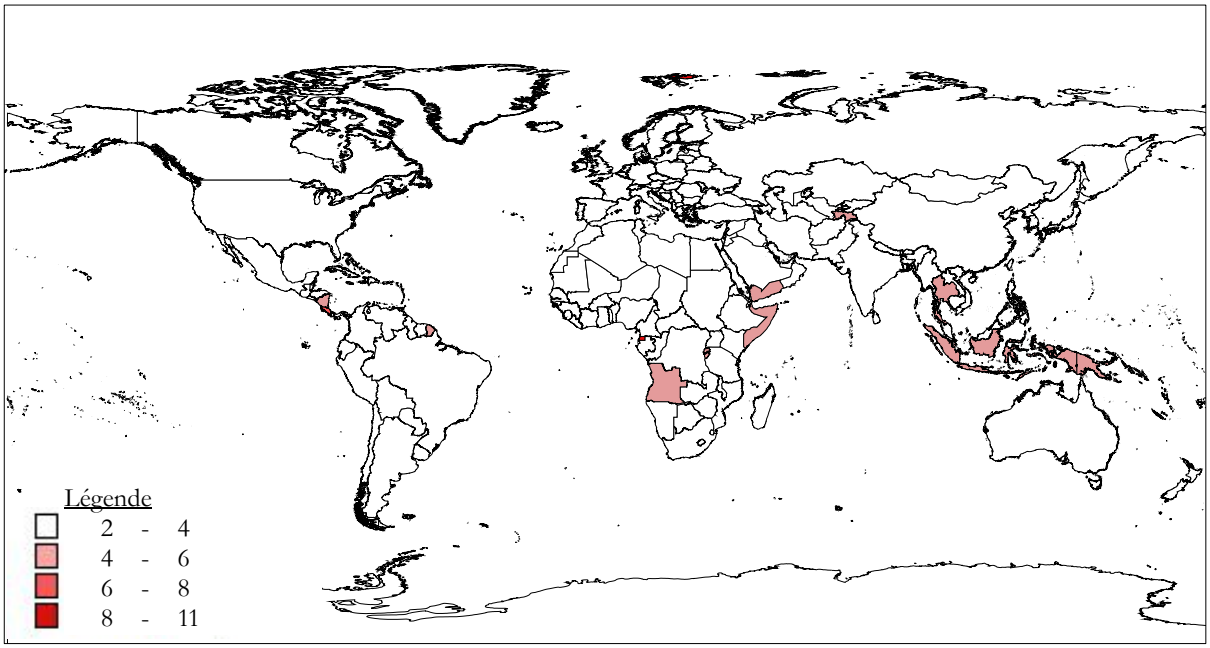


FIG. 1.16-Coefficient de voussure des séries de température journalière moyenne (*kurtosis*)



Le *kurtosis* rend compte de la fréquence des évènements extrêmes. Il est calculé à partir du quatrième moment de la série, tel que :

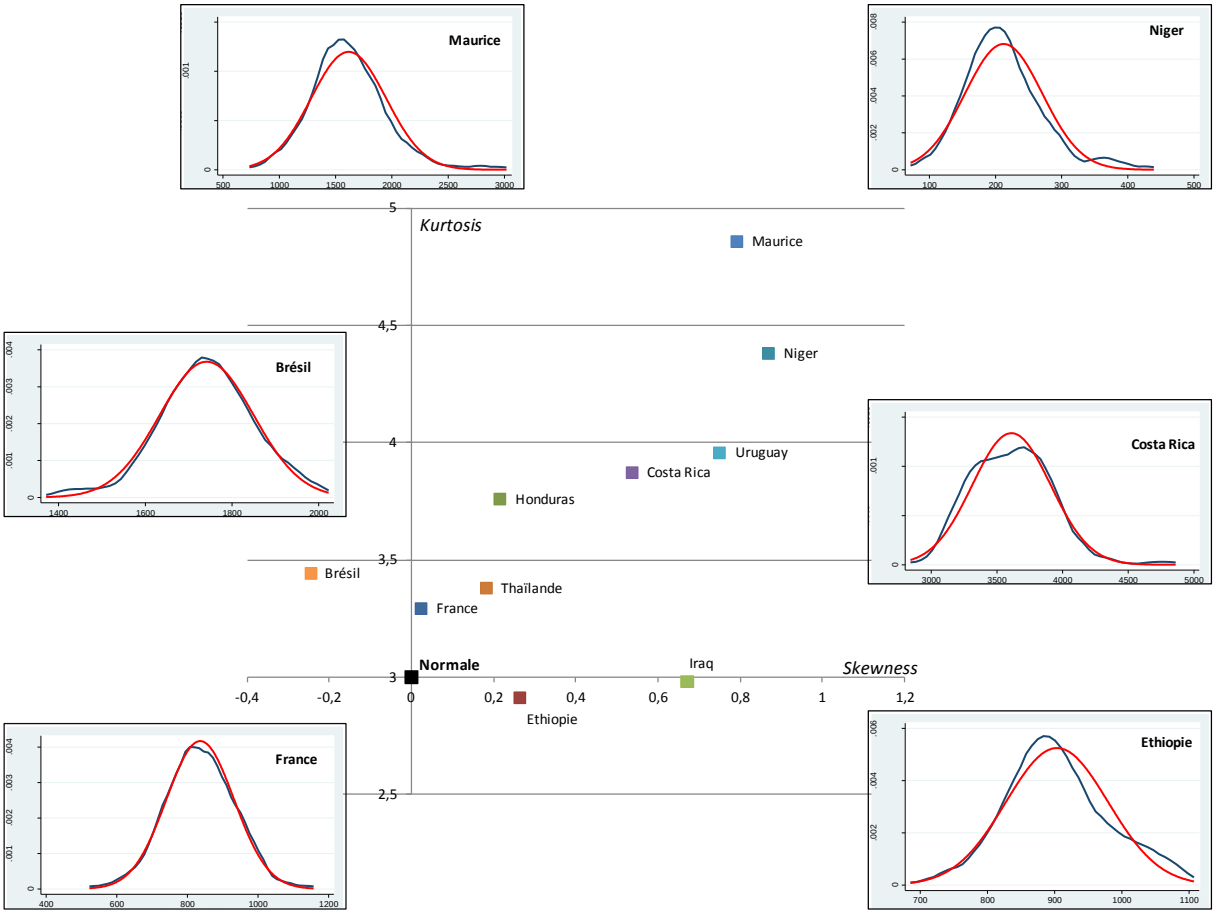
$$\theta_2 = E\left[\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^4\right] \quad (12)$$

La valeur de la *kurtosis* d'une loi normale est 3. Cet élément entre dans la caractérisation du climat. Les Figures 1.15 et 1.16 présentent les valeurs de *kurtosis* par pays respectivement pour la série de pluviométrie et de température. Les pays tropicaux présentent les niveaux de *kurtosis*[32] les plus élevés, c'est-à-dire les évènements extrêmes les plus importants. Les pays équatoriaux semblent présenter l'écart-type le plus important.

Finalement, la combinaison des valeurs de *skewness* et de *kurtosis* permettent une bonne appréhension des caractéristiques climatiques des pays. La Figure 1.17 propose une combinaison de ces deux indicateurs pour rendre compte de la diversité climatique mondiale. Seuls quelques pays sont ici représentés. Sur cette figure le Niger présente une asymétrie de la distribution de la pluviométrie vers la gauche comme l'indique le coefficient positif très élevé pour ce pays. La *kurtosis* indique un niveau supérieur à 3 laissant supposer une fréquence importante d'évènements extrêmes (sécheresses ou inondations). La France, qui possède un climat dit « tempéré » obtient des valeurs de *skewness* et *kurtosis* très proches de la loi normale.

[32] Le *kurtosis* rendant compte du rapport entre les probabilités d'évènements centrés sur les probabilités d'évènements extrêmes il est important de garder à l'esprit qu'un forte *kurtosis* peut à la fois rendre compte d'une forte densité d'évènements extrêmes ou d'une forte concentration des évènements autour de la moyenne de la série puisqu'il s'agit du rapport de fréquence entre ces deux densités.

FIG. 1.17-Coefficient d'asymétrie et d'aplatissement de la pluviométrie par pays



Note :Dans chaque cadre est indiquée en bleu la distribution de la pluviométrie pour le pays et en rouge la distribution Normale associée. L'ordonnée à l'origine du graphique représente une distribution normale

De cette figure il ressort que les pays aux climats tempérés apparaissent comme les pays les plus proches de la distribution normale de pluviométrie (c'est-à-dire, symétrie des chocs, et queues de distributions mesokurtiques). La plupart des distributions de pluviométrie présente une *skewness* positive. Les pays insulaires, d'Afrique Sub-saharienne et d'Amérique centrale sont les pays présentant les queues de distributions les plus larges.

Enfin, le coefficient de variation de la série, défini comme le rapport de l'écart-type sur la moyenne est également une dernière façon de synthétiser le climat d'un pays. Les résultats concernant les coefficients de variation sont présentés dans les Figures 1.18 et 1.19.

FIG. 1.18-Coefficient de variation de la pluviométrie par quartile

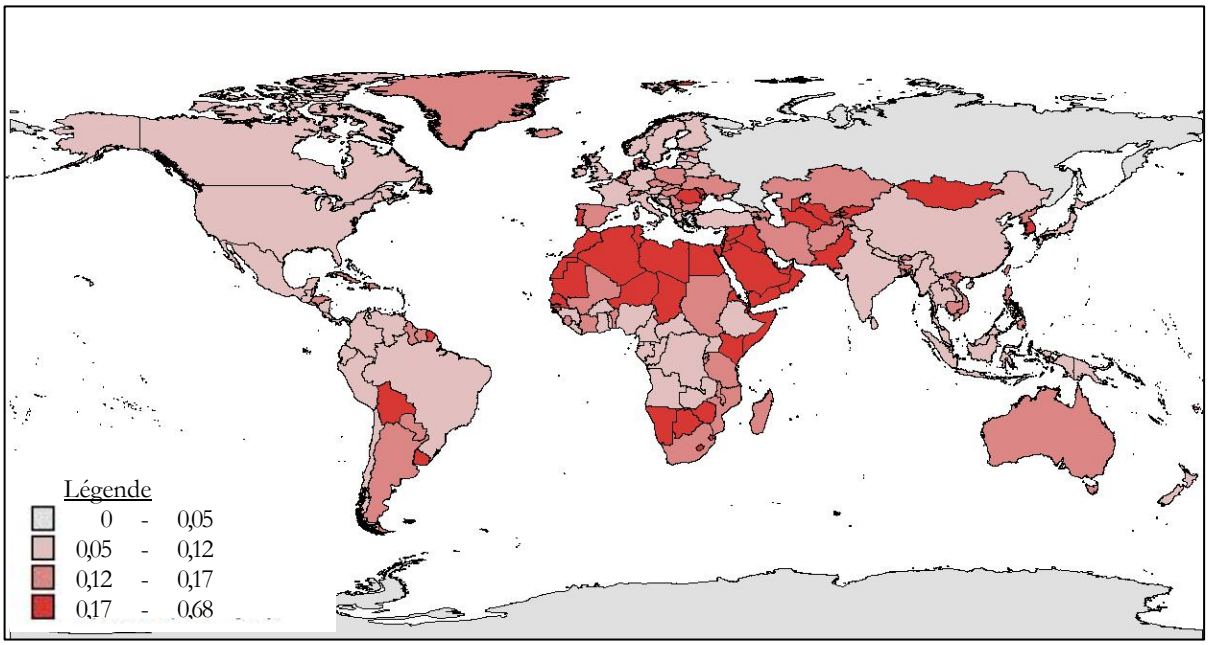
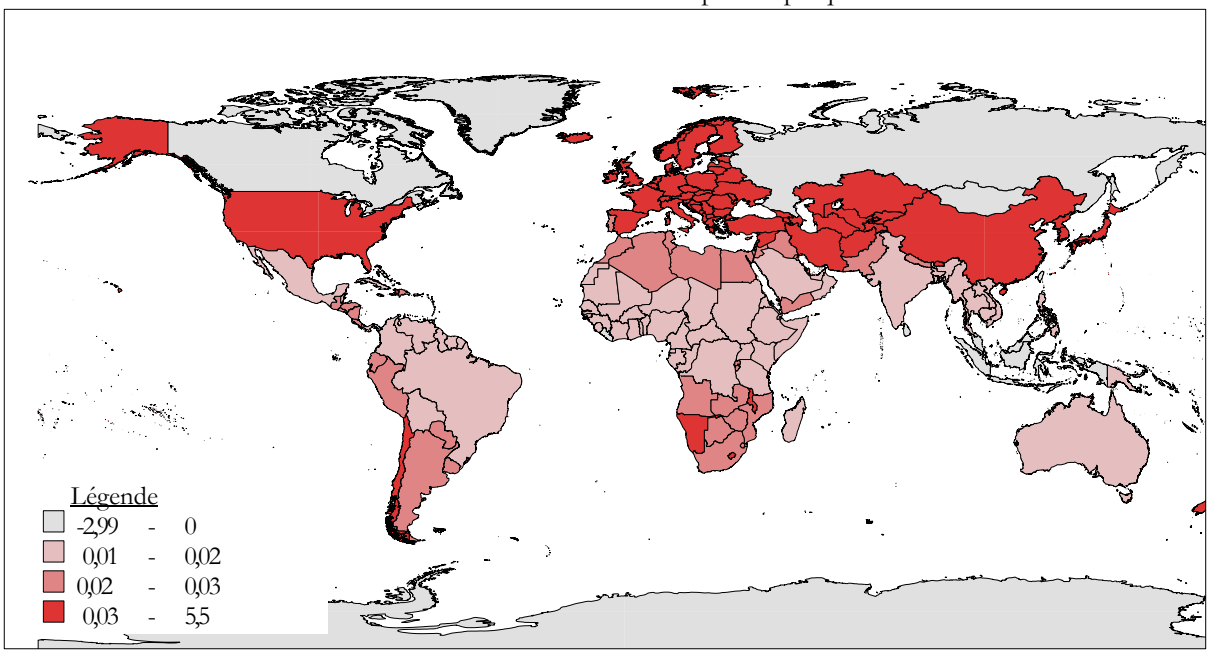


FIG. 1.19-Coefficient de variation de température par quartile



La **variabilité saisonnière** peut être prise en compte dans la caractérisation du climat. L'écart-type ou la *kurtosis* des moyennes mensuelles de long terme, l'écart-type annuel moyen de pluviométrie sont de bons indicateurs de cette variabilité saisonnière.

FIG. 1.20-Variabilité saisonnière de la pluviométrie par quartile

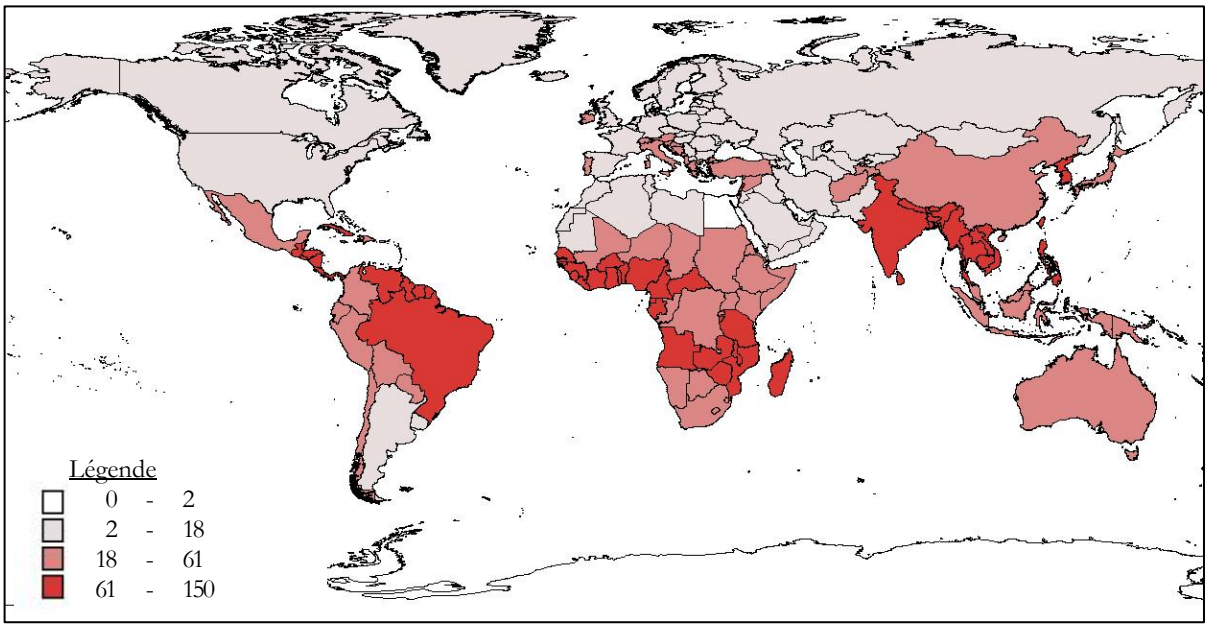
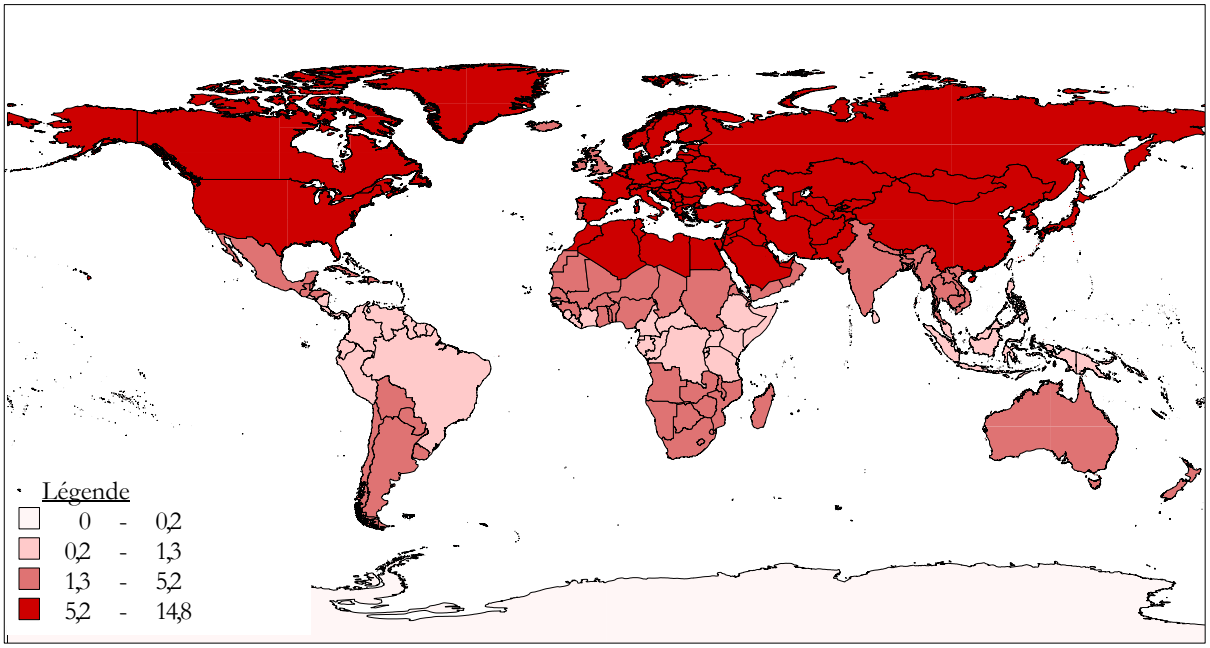


FIG. 1.21-Variabilité saisonnière de température par quartile



Les Figures 1.20 et 1.21 présentent l'écart-type annuel moyen, indicateur de la variabilité saisonnière d'un pays. Cette dernière apparaît plus importante pour la pluviométrie dans les pays tropicaux et intertropicaux, caractérisés par deux saisons distinctes. A l'inverse, les pays situés au nord du tropique du Cancer, présentent une variabilité saisonnière de la température plus importante.

Barrios *et al.* (2010) proposent d'autres façons de caractériser le climat d'un pays : en calculant la corrélation température, pluviométrie. Suivant toutes ces caractéristiques les pays peuvent être groupés à partir d'une ACP (Barrios *et al.* 2010)[33]. Les auteurs mettent alors en évidence une forte variabilité des résultats au sein des pays africains[34]. Leurs résultats sont également très différents suivant le découpage géographique choisi. L'ACP permet de mettre en évidence des caractéristiques climatiques communes entre pays.

Changement climatique[35]

Le changement climatique est usuellement défini à partir de 1950 ou 1970 (Dell *et al.* 2009). Le phénomène peut être identifié à travers la présence d'une tendance dans la moyenne de long terme des variables climatique mais également une tendance dans la variabilité de ces séries. On peut aussi tester la présence d'une tendance dans les cycles saisonniers de la série.

Ces calculs de tendances sont approfondis dans le chapitre 2. La tendance peut-être mise en évidence aussi bien dans la moyenne que dans la variabilité interne du climat. Elle peut être calculée sur les données annuelles ou sur la base de moyenne glissante (sur 5 ans par exemple) comme le font Barrios *et al.* (2010)[36].

La Figure 1.22, présente la valeur des tendances de la température par point de quadrillage à partir de 1950. Elle est calculée avec des muettes mensuelles afin de permettre un ajustement de la saisonnalité avec une constante telle que:

$T_j = a + \beta t + \theta_j + \varepsilon_j$ pour chaque quadrillage i

Avec

T_j: données de température mensuelle

t : tendance

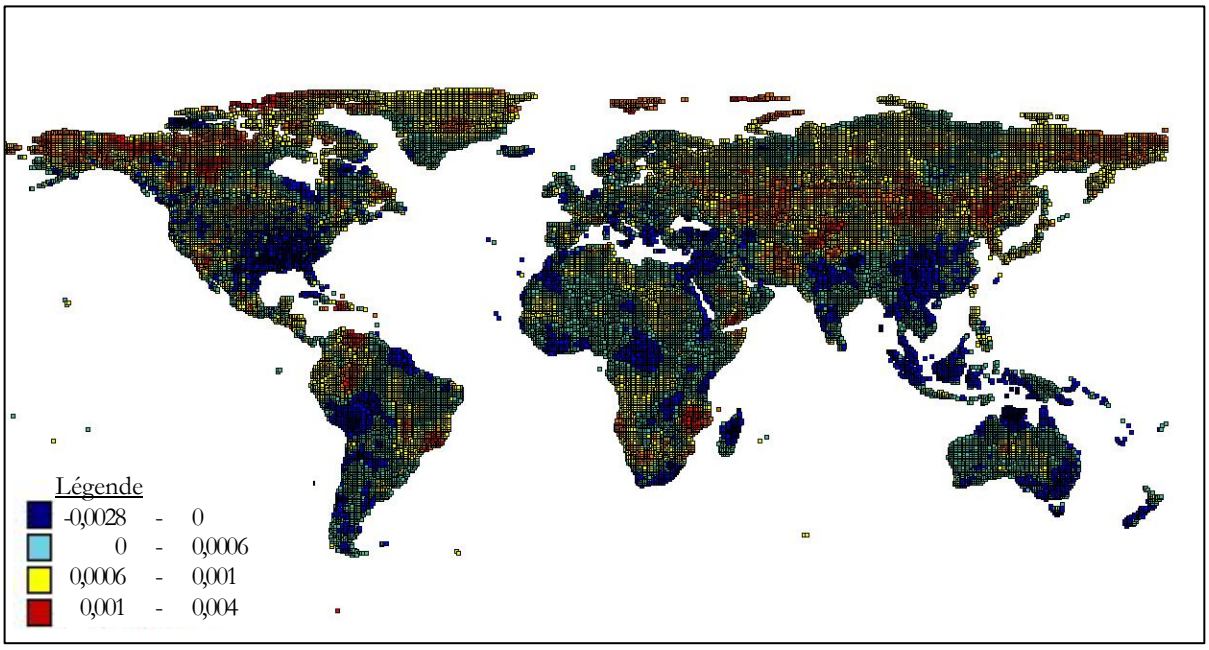
θ_j : muette mensuelle

ε_j: terme d'erreur

L'estimation est faite en utilisant la méthode des moindres carrés ordinaires, pour chaque quadrillage i.

[33] Le travail est effectué à partir de la base CRUTEMP3.
[34] Pays en développement d'Afrique Sub-saharienne.
[35] Cette partie est plus longuement développée dans le second chapitre.
[36] Les auteurs étudient dans cet article les ruptures de tendance.

FIG. 1.22-Tendance dans les séries de température par quadrillage



Comme indiqué dans de nombreuses études (IPCC 2007a, World Bank 2010), le changement climatique est extrêmement inégal au sein même d'un pays. Les tendances ne semblent pas suivre les frontières lorsque l'étude est menée au niveau du quadrillage[37]. Toutefois nous pouvons noter que la Russie, l'Europe et l'Asie Centrale ainsi que le Nord de l'Amérique sont les zones les plus affectées par une hausse de température.

Chocs

Les chocs des séries de pluviométrie et de température sont calculés au niveau annuel et mensuel. Classiquement un choc est identifié lorsque la valeur de la série au moment t est supérieure à deux écarts types par rapport à la moyenne de long terme ou une tendance. La période de définition de la moyenne de long terme, ou le choix d'un calcul par rapport à une tendance dépend des auteurs et de la volonté de ces derniers d'intégrer ou non le phénomène du changement climatique dans leurs calculs. De plus, une définition moins restrictive du choc à partir d'un écart type au dessus ou en dessous de la valeur moyenne peut également être retenue.

Notons que la somme des chocs climatiques peut entrer comme une définition de la variabilité interne du climat. De même une éventuelle tendance dans la fréquence ou l'amplitude de ces chocs peut être une bonne approximation d'un des effets du changement climatique (voir chapitre 2).

Nous calculons un indicateur de choc pluviométrique et de température par pays, au niveau mensuel et annuel à partir d'une tendance. Nous avons tenu compte de la « saisonnalité » en intégrant des muettes mensuelles lors des calculs de chocs annuels. Les résultats sont présentés dans le chapitre 2.

[37] Le chapitre 2 se consacrant plus longuement au changement climatique par pays nous avons préféré ici une représentation plus originale au niveau de la grille.

1.5. Conclusion et perspectives

Après avoir présenté différentes bases de données climatiques quadrillées au niveau mondial, ce chapitre présente les techniques d'interpolation sur lesquelles reposent chacune de ces bases et leurs limites d'utilisation. De plus il propose l'exploitation de l'une de ces bases - la base Udel - en construisant à partir de celle-ci des données au niveau national et en calculant des indicateurs climatiques nationaux. Les différents indicateurs construits à partir de cette nouvelle base illustrent les possibilités d'exploitation de cette dernière. Ainsi, la base de données climatiques produite présente de nombreux indicateurs du climat, du changement climatique ou des chocs climatiques. Il est très important de bien distinguer ces différentes composantes ainsi que les différents indicateurs qui s'y réfèrent tant la confusion est importante au sein de la littérature entre ces éléments et leur approximation. De nombreuses pistes d'exploitation de cette nouvelle base de données sont possibles.

Les chocs climatiques sont souvent intégrés aux études économiques puisqu'ils sont de bonnes approximations des chocs de revenus au niveau microéconomique comme au niveau macroéconomique.

De part sa construction au niveau « pays », la base peut tout à fait être combinée à de nombreuses bases de données d'indicateurs mondiaux de développement par exemple (World Development Indicators). Notons également que l'ensemble de ces données de quadrillage peuvent être couplées à différentes autres bases de quadrillage selon l'objet de l'étude. Les données climatiques peuvent par exemple être pondérées par la densité de population de la zone géographique[38]. Les chocs climatiques ont potentiellement un impact plus important s'ils ont lieu dans des régions peuplées et s'ils touchent une proportion importante de la population. Ce travail peut également être effectué suivant les régions administratives lorsque les frontières de celles-ci sont disponibles. De même la FAO propose une base de données regroupant les cycles des principales cultures agricoles par pays. Certaines périodes de la culture sont beaucoup plus sensibles aux fluctuations climatiques que d'autres. Le choc a également des conséquences différentes selon le stade de développement de la culture. Aussi, il serait fortement intéressant de pondérer les chocs suivant les moments auxquels ils se produisent. Ce travail demande une étude au cas par cas pour construire la base de données mais aurait l'avantage de prendre en compte l'importance relative de chaque choc. Le choc climatique peut également être pondéréselon l'importance économique des régions touchées. Suivant par exemple le travail de Nordhaus (2006) il est possible de donner un poids plus important aux régions dynamiques économiquement ou au contraire aux régions les plus pauvres[39]. Il est également possible de pondérer selon la vulnérabilité économique des zones géographiques considérés. Ce travail permettrait de rendre compte de façon plus précise du fonctionnement d'une économie.

[38] La base ainsi pondérée est également disponible auprès des auteurs.
[39] L'auteur utilise la densité de population comme proxy de la densité d'activité économique pour les pays en développement.

Finalement, le choix de l'indicateur de climat ou de choc climatique reste aux auteurs. Miguel et Satyanath (2011) prouvent la robustesse de leurs résultats avec deux mesures différentes et souvent mises en opposition (Brückner et Ciccone 2007, 2011). Les auteurs soulignent (Miguel et Satyanath 2011) qu'au-delà de la construction d'indicateurs climatiques-dont nous proposons dans ce chapitre plusieurs définition-le choix et la compréhension des bases de données climatiques utilisées apparaissent essentiels :*« Relative to the importance that data construction and coding choices play in driving the results in the empirical conflict literature, issues of the functional form of rainfall measures used as instrumental variables appear to be a side issue »*[40,41].

[40] *« Par rapport à l'importance que peuvent avoir la construction des données et les choix de codage dans les résultats de la littérature empirique des conflits, les questions de la forme fonctionnelle de pluies utilisées comme variables instrumentales semblent être une question secondaire ».*

[41] Les données dont parlent ici les auteurs ne sont pas uniquement climatiques.

Annexes

Base Climate Change Country Profiles

L'école de géographie et d'environnement d'Oxford en collaboration avec le Programme des Nations Unies (PNUD) met à disposition des données climatiques de pluviométrie et de température. Ces données sont disponibles au niveau national pour 52 pays essentiellement en développement. La base fournit des données de pluviométrie et de température ainsi que huit indicateurs d'évènements extrêmes (quatre pour les températures et quatre pour les précipitations).

TAB. A1.1-Liste des pays disponibles pour la base Climate Change Country Profiles

Africa		Asia	Carribean	Central America
Angola	Kenya	Afghanistan	Antigua and	Belize
Benin	Malawi	Armenia	Barbuda	Guyana
Cameroon	Mali	Cambodia	Barbados	Mexico
Cape Verde	Mauritania	Nepal	Cuba	Nicaragua
Chad	Mauritius	Pakistan	Dominica	Suriname
Comoros	Morocco	Vietnam	Dominican	
Equatorial	Mozambique	Yemen	Republic	
Guinea	Sao Tome		Grenada	
Eritrea	and		Jamaica	
Ethiopia	Principe		St Kitts and Nevis	
Liberia	Senegal		St Lucia	
Sierra Leone	Tanzania		St Vincent and the	
Ghana	Togo		Grenadines	
Gambia	Uganda		The Bahamas	
Gabon	Zambia		Trinidad and	
Guinea			Tobago	

Source *:* site Internet http://country-profiles.geog.ox.ac.uk/

Les auteurs croisent des données de différentes sources : la deuxième version de la base CRU décrite dans New *et al.* (2002), la base Udel dans sa première version (Willmott et Matsuura 2005), la base du Centre de Climatologie de Précipitation Globale[42] (Global Precipitation Climatology Center GPCC), les bases NCEP et ERA 40. La base HadEX est également utilisée pour les évènements extrêmes.

[42] Cette base combine des données de stations et des données satellitaires.

TAB. A1.2-Nombre de points de quadrillage par pays.

Pays	Nb	Part[43]
Afghanistan	251	0.29
Albania	12	0.01
Algeria	855	1.00
Angola	418	0.49
Antarctica	24,110	28.43
Argentina	1,116	1.30
Armenia	13	0.02
Australia	2,783	3.24
Austria	39	0.05
Azerbaijan	68	0.08
Bahamas	5	0.01
Bangladesh	44	0.05
Belarus	114	0.13
Belgium	17	0.02
Belize	6	0.01
Benin	37	0.04
Bhutan	13	0.02
Bolivia	365	0.43
Bosnia and Herz	22	0.03
Botswana	205	0.24
Brazil	2,831	3.30
Brunei Darussalam	2	0.00
Bulgaria	47	0.05
Burkina Faso	87	0.10
Burundi	10	0.01
Cambodia	63	0.07
Cameroon	148	0.17
Canada	6,763	7.88
Cape Verde	2	0.00
Cayman Islands	1	0.00
Central African Rep.	205	0.24
Chad	430	0.50
Chile	309	0.36
China	3,787	4.41
Colombia	374	0.44
Comoros	1	0.00
Congo	110	0.13
Congo, The Dem Rep.	764	0.89
Cook Islands	1	0.00
Costa Rica	14	0.02
Croatia	28	0.03
Cuba	40	0.05
Cyprus	4	0.00
Czech Republic	38	0.04
Côte d'Ivoire	111	0.13
Denmark	27	0.03
Djibouti	6	0.01
Dominican Republic	16	0.02
Ecuador	87	0.10
Egypt	357	0.42
El Salvador	8	0.01
Equatorial Guinea	9	0.01
Eritrea	39	0.05
Estonia	26	0.03
Ethiopia	377	0.44
Falkland Islands	5	0.01
Fiji	5	0.01
Finland	251	0.29
France	253	0.29
French Guiana	26	0.03
French Polynesia	1	0.00
French Southern Ter.	2	0.00
Gabon	84	0.10
Gambia	4	0.00
Georgia	31	0.04
Germany	189	0.22
Ghana	77	0.09
Greece	52	0.06
Greenland	2,634	3.07
Guadeloupe	1	0.00
Guatemala	40	0.05
Guinea	79	0.09
Guinea-Bissau	11	0.01
Guyana	67	0.08
Haiti	13	0.02
Honduras	37	0.04
Hungary	43	0.05
Iceland	74	0.09
India	1,166	1.36
Indonesia	627	0.73
Iran, Islamic Republic of	648	0.76
Iraq	170	0.20
Ireland	39	0.05
Israel	9	0.01
Italy	130	0.15
Jamaica	4	0.00
Japan	156	0.18
Jersey	1	0.00
Jordan	33	0.04
Kazakstan	1,377	1.61
Kenya	188	0.22
Korea, Dem. People. Rep.	47	0.05
Korea, Republic of	41	0.05
Kuwait	8	0.01
Kyrgyzstan	85	0.10
Lao People's Dem. Rep.	73	0.09
Latvia	35	0.04
Lebanon	4	0.00
Lesotho	12	0.01
Liberia	31	0.04
Libyan Arab Jamahiriya	592	0.69
Lithuania	38	0.04
Luxembourg	1	0.00
Macedonia,	12	0.01
Madagascar	199	0.23
Malawi	39	0.05
Malaysia	104	0.12
Mali	424	0.49
Mauritania	362	0.42
Mauritius	1	0.00
Mexico	702	0.82
Moldova, Republic of	16	0.02
Mongolia	745	0.87

[43] Nb : nombre de points de quadrillage dans le pays. Part : pourcentage de points de la grille dans le pays.

Pays	Nb	Part[43]
Montenegro	6	0.01
Morocco	160	0.19
Mozambique	267	0.31
Myanmar	234	0.27
Namibia	287	0.33
Nepal	51	0.06
Netherlands	17	0.02
New Caledonia	6	0.01
New Zealand	118	0.14
Nicaragua	45	0.05
Niger	404	0.47
Nigeria	302	0.35
Norway	320	0.37
Oman	110	0.13
Pakistan	293	0.34
Panama	25	0.03
Papua New Guinea	148	0.17
Paraguay	142	0.17
Peru	427	0.50
Philippines	94	0.11
Poland	165	0.19
Portugal	43	0.05
Puerto Rico	3	0.00
Qatar	3	0.00
Romania	110	0.13
Russian Federation	11,711	13.65
Rwanda	10	0.01
Réunion	1	0.00
Saint Vincent and the G.	1	0.00
Samoa	1	0.00
Sao Tome and Principe	1	0.00
Saudi Arabia	695	0.81
Senegal	67	0.08
Serbia	37	0.04
Sierra Leone	25	0.03
Slovakia	27	0.03
Slovenia	9	0.01
Solomon Islands	11	0.01
Somalia	205	0.24
South Africa	449	0.52
S. Georgia Is	2	0.00
Spain	213	0.25
Sri Lanka	23	0.03
Sudan	835	0.97
Suriname	49	0.06
Svalbard	22	0.03
Swaziland	5	0.01
Sweden	311	0.36
Switzerland	17	0.02
Syrian Arab Republic	71	0.08
Taiwan	13	0.02
Tajikistan	59	0.07
Tanzania, United Rep.	307	0.36
Thailand	172	0.20
Togo	18	0.02
Trinidad and Tobago	2	0.00
Tunisia	59	0.07
Turkey	323	0.38
Turkmenistan	230	0.27
Turks and Caicos Islands	2	0.00
Uganda	82	0.10
Ukraine	300	0.35
United Arab Emirates	27	0.03
United Kingdom	133	0.16
United States	4,474	5.21
Uruguay	69	0.08
Uzbekistan	200	0.23
Vanuatu	3	0.00
Venezuela	295	0.34
Viet Nam	114	0.13
Virgin Islands, U.S.	1	0.00
West Bank	2	0.00
Western Sahara	92	0.11
Yemen	140	0.16
Zambia	250	0.29
Zimbabwe	136	0.16
Total	**85,794**	**100.00**

Chapitre 2

Un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique : quels sont les pays en développement les plus vulnérables ?

An Index of Physical Vulnerability to Climate Change: who are the most vulnerable developing countries?[*]

Résumé

Le chapitre examine la vulnérabilité des pays en développement au changement climatique. La définition de cet indice s'appuie à la fois sur les travaux relatifs à l'environnement et sur le cadre d'analyse de la vulnérabilité économique. L'indicateur de vulnérabilité physique au Changement climatique (PVCCI) repose sur des composants reflétant les conséquences physiques du changement climatique qui peuvent directement affecter le bien-être et l'activité des populations, plutôt que sur une évaluation de ses conséquences économiques. Simultanément cet indice de vulnérabilité au changement climatique vise à refléter uniquement la vulnérabilité qui ne dépend pas de la volonté présente des pays, autrement dit la vulnérabilité physique ou structurelle, laissant de côté la résilience. Les composants de l'indice saisissent deux types de risques liés au changement climatique: ceux qui correspondent à une intensification des chocs récurrents (telles les sécheresses) et ceux qui correspondent à des chocs progressifs et irréversibles (comme l'élévation du niveau de la mer).

L'étude fait apparaître une forte hétérogénéité entre les pays quant au niveau de vulnérabilité physique au changement climatique, même à l'intérieur d'une région ou d'un continent. L'indice permet également de caractériser la vulnérabilité au changement climatique des pays en développement, servant ainsi aux politiques d'adaptation. Face à la préoccupation croissante de la communauté internationale pour mobiliser des ressources afin de faire face aux problèmes d'adaptation, l'indice PVCCI peut permettre de mieux comprendre ce que sont les défis du changement climatique pour les pays en développement. Nous suggérons qu'un indice tel que l'indice de vulnérabilité physique au changement climatique soit un des critères pertinents d'allocation géographique des ressources pour l'adaptation.

[*] Ce chapitre est une version d'un article coécrit avec P.Guillaumont.

2.1. Introduction

The recognition of climate change as a dominant issue for the global economy and policy has led to a search for resources for financing mitigation and adaptation. Raising funds for mitigation and for adaptation meets the same problems, but their allocation should be ruled by different criteria. The creation of the Adaptation Fund by the Parties to the Kyoto Protocol of the UN Framework Convention on Climate Change illustrates the awareness of the international community of the need to mobilize human and monetary resources in order to deal with adaptation problems, and the specificity of the adaptation issues. Adaptation is defined by the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) in their 4th Assessment report as the "adjustment in natural or human systems in response to actual or expected climatic stimuli or their effects, which moderates harm or exploits beneficial opportunities" (IPCC 2007a, Glossary). The resources already mobilized to meet the adaptation aim appear to be well below what would be required. This makes it all the more necessary to allocate these resources according to criteria which reflect the countries' adaptation needs, as well as their capacity to effectively use the resources to this end. From that perspective, the country's vulnerability to climate change could be considered as one of the most relevant criteria for the allocation of adaptation resources between developing countries. So an appropriate indicator of vulnerability to climate change available for all countries concerned is required for this purpose.

According to the Adaptation Fund website, resources for the needs of development and adaptation cannot be the same: "Helping the most vulnerable countries and elements of societies is thus an increasing challenge and duty for the international community, especially because adaptation to climate change requires significant resources *in addition* to what is already needed to achieve internationally agreed-on development objectives such as the Millennium Development Goals" (Adaptation Fund website). Even if this separation is sometimes debated, it seems to correspond to an actual trend.

The aim of this chapter is to present an analysis of the vulnerability to climate change likely to lead to a quantitative and comparative assessment. An original assessment of the vulnerability to climate change is proposed, focusing on the vulnerability which depends only on physical factors. Factors considered as physical are those which do not depend on the present will or policies of the countries. As for the vulnerability to climate change, these factors are essentially geo-physical. This "Physical Vulnerability to Climate Change Index" (PVCCI) presents various results for developing countries. Moreover, the study lays out a first step for the design of criteria for the allocation of adaptation resources.

In the recent political debate about the implications of climate change, the need for an index of vulnerability to climate change has been recognized, noticeably in United Nations circles, and at the Adaptation Fund (UNFCCC, 2008a, b, et c). However, no clear recommendation has been made as to what kind of index is required. Tentative indices have been proposed by several international and research institutions (two major examples were given in Adger *et al.* 2004 and by the World Bank in the *World Development Report* 2010, p278) . However, all previous indices raise issues of definition, database, purpose, and use.

The new index presented in this chapter only reflects the physical components of vulnerability to climate change. Moreover, it relies on a few components, both relevant and reliable, which are available for the whole set of developing countries, and which are easily understandable, so that the index can be used in a transparent manner. In the development for such an index, it is useful to refer back to two streams of literature. First, the environmental literature offers various definitions and concepts of vulnerability, on which we draw as far as needed, although we do not include the adaptive capacity and resilience to vulnerability, as generally done in this research stream. Second, the United Nations endeavour to measure the structural economic vulnerability to external and natural shocks for the identification of the Least Developed Countries (LDCs) has led to build a related indicator, called the Economic Vulnerability Index (EVI; United Nations CDP 2008, Guillaumont 2009a et b). The EVI, which does not ignore environmental vulnerability, includes components related to natural shocks (through the "average of homeless due to natural disaster index" and the "instability of agricultural production index"), as well as components reflecting the exposure to these shocks (such a low population size). It is not focused on long term vulnerability to climate change, however, and does capture only the likelihood that they re-occur in a near future through recurrent shocks.

This study shows a high degree of heterogeneity among countries in their level of physical vulnerability to climate change, even within the same regional area or continent. It shows both the high vulnerability of African countries relative to the rest of the world as well as the differences among those countries, mainly due to the risk of drought. The PVCCI index permits the characterization of climate change vulnerability for developing countries, laying foundations for improvements in the design of adaptation policies. With regard to the growing concern of the international community about the ways of mobilizing resources to deal with adaptation, such an index sheds light on the challenges of climate change for African countries. In particular, the PVCCI can be considered as one of the relevant criteria for the geographical allocation of resources devoted to adaptation.

The first part of the chapter presents the various concepts of vulnerability to climate change. It tries to connect development economics and environmental research by building a physical vulnerability to climate change concept and index. The second part discusses the composition of the index and its calculation. The third part presents the results on developing countries.

2.2. What is vulnerability about?

Beginning with the main definitions of vulnerability to climate change, this section tries to define physical vulnerability to climate change. The "vulnerability of systems to climate change" is examined in what is a rapidly growing literature, relying on various fields of research, such as climate science, disaster management and development economics. This part is also a step towards a "necessary greater synergy between ecologists and economics"(Wam 2009).

2.2.1. General economic vulnerability versus structural economic vulnerability

The word 'vulnerability' has been used with various meanings and by many researchers in food security, natural hazards, disaster risk, public health, global environment, climate change or development economics (for a sample of applications of the concept of vulnerability in these various fields, see: Timmerman 1981, Blaikie 1994, Cutter *et al.* 1996, Guillaumont and Chauvet 2001, McCarthy 2001, UNEP 2002 chapitre 3, Prowse 2003, Turner *et al.* 2003). In development economics, the notion of vulnerability has been used mainly at the microeconomic level (see for instance Dercon *et al.* 2005, Yamano *et al.* 2005). It has also been used at the macroeconomic level, with the search for measurable and comparable indices (this literature is reviewed in Guillaumont 2009a, b).

In the macroeconomic context, the vulnerability of a country is taken as "the risk of being harmed by exogenous, generally unforeseen, events or shocks" (Guillaumont 2009a). Based on several decades of research (in particular on export instability), this macro vulnerability is now widely considered to be an impediment to growth. Economic vulnerability can be seen to consist of three main components: *shock, exposure and resilience*. Shocks are exogenous and generally unforeseen events (external e.g. the instability of exports, or natural e.g. typhoons, hurricanes, earthquakes, droughts). Exposure corresponds to factors on which the direct impact of shocks depends. Resilience is the capacity to react to shocks, which can be considered, when weak, a part of general vulnerability (Miller *et al.* 2010).

Assessments of vulnerability retain some or all of these three components. When the three elements are considered, a general or overall vulnerability is assessed. When the size of the exogenous shocks and the extent of exposure to these shocks are the only components considered, the vulnerability considered is essentially a "*structural*" vulnerability. Resilience, even if it may include some structural elements, is mainly related to policy factors. Structural economic vulnerability is the kind of vulnerability captured by the Economic Vulnerability Index (EVI), used by the United Nations to identify the Least Developing Countries (LDCs). This index intends to reflect the likely size of recurrent external natural shocks, and the main structural factors of the exposure to these shocks, using a minimal number of indicators in a transparent manner (seven indicators). It refers mainly to vulnerability in low-income countries (see UN CDP web-site and Guillaumont 2007, 2009a, b). In the same spirit, this chapter tries to define an index of structural vulnerability to climate change, using only a small number of indicators related to the size of climate shocks and to the exposure to these shocks.

2.2.2. Structural or physical vulnerability to climate change: can it be identified?

Vulnerability to climate change is defined here as a vulnerability to environmental shocks resulting from climate change. These shocks are assumed to be the physical expression of climate change. They appear as an increase in the number of droughts, floods, and storms, as well as through the rise in sea level; and they are reflected by the change in the mean values of climatic variables (such as temperature or rainfall), and by related changes in the instability of these variables.

Climate change has always been associated to the vulnerability issue. For instance, Timmerman (1981) considers the thinking on the vulnerability concept to be at the core of climate change research. He defines vulnerability as "the degree to which a system may react adversely to the occurrence of a hazardous event". For the World Meteorological Organization's Climate Program, the announced goal is "determining the characteristics of human societies at different levels of development which make them either especially vulnerable or especially resilient, to climatic variability or change". In 1990, Liverman notes that the concept of vulnerability "has been related or equated to concepts such as resilience, marginality, susceptibility, adaptability, fragility and risk" and proposes a distinction between vulnerability as a biophysical condition, and as a political economy issue.

There has been a fertile recent literature on vulnerability to environmental change and more specifically to climate change, and also on vulnerability to natural hazards, which partly overlaps. Not surprisingly, there is no universally accepted definition of vulnerability to climate change (and there is even a different definition in each IPCC report - Downing and Patwardhan 2005). Beyond the semantic issue, a definition of vulnerability is obviously needed to make the theoretical concept clear. The choice of the definition influences the orientation of the vulnerability analysis (O'Brien *et al.* 2007). The main references to environmental vulnerability include Adger (1999), Kelly and Adger (2000), Olmos (2001), O'Brien *et al.* (2004), Downing and Patwardhan (2005), Yamano *et al.* 2005, Füssel (2007), Ionescu *et al.* (2009); and to vulnerability to natural hazards Cardona (2003), Birkmann (2006), Birkmann and Wisner (2006), or Thywissen (2006).

The definition and the assessment of vulnerability have encountered two difficulties. First, the notions have been used with various meanings, depending on the scientific field (Hinkel 2008, Brückner 2010). Second, within each field, various conceptual frameworks have been defined. As a result, this literature has been qualified as a "Tower of Babel" (Janssen and Ostrom 2006). Facing this "tower" authors have suggested building a formalized common framework (Ionescu *et al.* 2009, Hinkel 2008, 2011). The above mentioned authors agree that the multiplication of frameworks and definitions leads to the blurring of the message drawn from the analyses.

To identify the structural or physical vulnerability to climate change, it is useful to refer to the three usual components of economic vulnerability (size of the shocks, exposure to the shocks, resilience), and to consider that structural vulnerability is mainly captured through the shock and exposure components, while resilience is more related to policy. We now briefly review the literature on vulnerability to climate change with the aim of seeing whether it isolates these structural or physical components of vulnerability to climate change. For the sake of this review, we identify three main approaches in the literature on vulnerability.

2.2.3. Main current approaches to climate change vulnerability

Let us call the *chronological approach (ex-post/ex-ante analysis)* the sequential analysis of a shock that compares the situation before and after the shock. Elements defining the environment before the shock occurs constitute the context. The consequences and impacts of the shock are defined and assessed after

the shock occurs. Kelly and Adger (2000) adopt this approach by defining the end point vulnerability and starting point vulnerability. They define the "starting point vulnerability" as the body of elements in the environment that worsen (*ex-ante*) the consequences of shocks worse (e.g. by an increase in the sensitivity of the environment). This vulnerability is affected by social and economic dynamics, and by political and institutional characteristics. The starting point vulnerability is linked to the human security framework and is related to the context. The "end point vulnerability" results from the consequences of climate change. It is captured by an assessment of the losses from the shock, related to its characteristics and size. The assessment of the end point vulnerability has been the subject of studies; for instance O'Brien *et al.* (2007) who use a similar distinction. The authors deal with an outcome vulnerability and contextual vulnerability whose definitions are close to the end point and starting point vulnerability of Kelly and Adger (2000). To a large extent, the starting point vulnerability corresponds to what is considered in the economic literature as the "exposure" to shocks, but the end point depends both on the size of the shocks and on the resilience, including structural factors, and includes policy factors as well.

What can be called the *matriochkas approach* consists of elaborating a progressively encompassing concept of vulnerability. The aim of this framework is to make the definition of vulnerability gradually more complex following different scales (often geographic scales). This type of analysis is proposed by Birkmann (2007). The author considers the core of the vulnerability definition as intrinsic vulnerability (vulnerability defined as an internal risk factor). He introduces a continuum of definitions of vulnerability spanning from the tightest to the widest definition: "multi dimensional vulnerability encompassing physical, social, economic, environmental and institutional features" (Birkmann 2006). A similar analysis is found in the "onion framework" proposed by Bogardi and Birkmann (2004). It is an enlightening approach, but not adapted to our purpose in as much as policy factors may interfere at each step of the concept's enlargement.

The *social and ecological dichotomic approach* is a framework which finds its roots in the ecological literature. Adger *et al.* (2004) distinguish a biophysical vulnerability from a social vulnerability. This separation is close to that presented by Brooks (2003) who identifies two kinds of vulnerability to climate change in the literature. Biophysical vulnerability is defined by environmental scientists in terms of physical (potential) damage caused to a system by a particular climate-related event or hazard (Nicholls *et al.* 1999, Jones and Boer 2005); vulnerability being analyzed in terms of the likelihood of occurrence and impact of weather and climate related events (Nicholls *et al.* 1999). The second type of vulnerability is defined as the "state that exists within a system before it encounters a hazard event" (Allen 2003). In this sense, it is close to the "starting point vulnerability" of Kelly and Adger (2000). This is also, according to Brooks, the definition of social vulnerability. Social vulnerability depends on biophysical factors, but also includes the set of socio-economic factors that determine peoples' ability to cope with stress or change (Allen 2003). It can be seen as including what has been called exposure and resilience factors, and following both structural and policy factors. The distinction made by Brooks (2003) led him to aggregate social and biophysical vulnerability into a unique system (see also Füssel and Klein 2006). This concept must be distinguished from climate hazard assessments. Moreover, in the conceptual framework of "eco-sociological system", the distinction between social and biophysical vulnerability could be included (see part 2.2.1). Adger (2006) proceeds in the same way: after distinguishing two main streams, entitlements

and natural hazards, he gathers these two streams into a global framework named: "socioecological system".

Finally, most influencial is the *IPCC's approach*. The IPPC has a precise definition of vulnerability which is often used in climate change vulnerability analysis. The IPCC defines vulnerability as "the degree to which a system is susceptible to, and unable to cope with, adverse effects of climate change, including climate variability and extremes. Vulnerability is a function of the character, magnitude, and rate of climate change and variation to which a system is exposed, its sensitivity, and its adaptive capacity" (IPCC 2007a, Glossary). This definition is close to the definition of economic vulnerability, previously presented with the three components of shock, exposure and resilience. The diagram given by Füssel (2010), see Figure 2.1, helps to understand, what in the IPCC definition concerns structural vulnerability and what does not: the sign (+/-) next to a factor indicates the direction of this factor's influence on vulnerability. Here, "social impacts" must be understood as "vulnerability to climate change". This framework with three components is also recognized by the Committee for Development Policy (UN CDP 1994) of the United Nations (Brückner 2010).

FIG. 2.1-Vulnerability to climate change framework, the reading of IPPC definition by Füssel (2010)

<table>
<tr><td>Regional
climate change
(+)</td><td>Biophysical
sensitivity
(+)</td><td>Socio-economic
exposure
(+)</td><td>Socio-economic
capacity
(-)</td></tr>
<tr><td colspan="2">Biophysical impacts
(+)</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">Social impacts</td></tr>
</table>

FIG. 2.2-Vulnerability frameworks in the light of the Shocks, Exposure and Resilience definitions

<table>
<tr><td></td><td colspan="2">Chronological analyses</td><td colspan="2">"Onion" or "Matriochkas" analysis</td><td colspan="3">Dichotomic analyses</td><td colspan="3">The 'IPCC' analysis</td></tr>
<tr><td></td><td>Kelly and Adger (2000)</td><td>O'Brien et al. (2007)</td><td colspan="2">Birkmann (2007)</td><td colspan="2">Brooks (2003)</td><td colspan="2">Adger (2006)</td><td colspan="3">Füssel (2010)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">SHOCKS</td><td rowspan="2">End point vulnerability</td><td rowspan="2">Outcomes vulnerability</td><td>Intrinsic vulnerability</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">Biophysical Vulnerability</td><td rowspan="3">Social and biophysical vulnerability</td><td rowspan="2">Natural disasters</td><td rowspan="3">Socioecological vulnerability</td><td>Regional climate change</td><td rowspan="2">Biophysical Impacts</td><td rowspan="3">Social Impacts (vulnerability to CC)</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Human centred vulnerability</td><td>Biophysical sensitivity</td></tr>
<tr><td rowspan="2">EXPOSURE/ SENSITIVITY</td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2"></td><td rowspan="2">Socio-economic exposure</td></tr>
<tr><td rowspan="2">RESILIENCE</td><td rowspan="2">Starting point vulnerability</td><td rowspan="2">Contextual vulnerability</td><td rowspan="2">Multidimensional vulnerability</td><td rowspan="2">Social Vulnerability</td><td rowspan="2">Entitlements</td><td rowspan="2">Socio economic capacity</td></tr>
</table>

-·- : Continuum of vulnerability concepts
····· : Approximate delimitation
in grey the structural components of vulnerability

Results are summarized in Figure 2.2. In any case, when referring to environmental vulnerability to climate change, the distinction established with reference to macroeconomic vulnerability between shock, exposure and resilience should be kept in mind. This can help to take account of those components of climate change vulnerability that are not structural, in other words those which depend to a large extent on the present policy of countries, which make them more or less resilient to shocks. Useful frameworks of vulnerability to climate change, including the various vulnerability dimensions, have been presented. However, the building of an indicator useful for guiding the allocation of resources involves taking into account the present policy components, mainly captured by the resilience concept. This choice is necessary to produce a "Simple, Measurable, Accurate, Reliable, and Timely" (SMART) indicator.

2.2.4. From analysis to measurement of vulnerability to climate change

Existing indices: not focused only on structural vulnerability

The authors of the existing indices point out the growing need for such an index (a need also expressed by the international community), while often stressing at the same time the confusion resulting from the multiplicity of conceptual frameworks for the analysis of the impact of climate change. As for the indices related to climate change, we first note that some indices only reflect the evolution of climate change, without assessing an impact of vulnerability. These include the Climate Change Index of Baettig *et al.* (2007) and the National Climate Change Indices of Diffenbaugh *et al.* (2007) and of Giorgi (2006). These indicators can be seen as essentially reflecting the size of the shocks without consideration of exposure and resilience. Moreover, these indices do not agree on the areas where the phenomenon is the most severe.

As for the indices more precisely focused on the vulnerability to climate change, their number has recently exploded. The aim of the authors producing those indices is to make available a measure of vulnerability to climate change, and to reveal the differential of impact of climate change between socio-economic units (e.g. nation, states, local governments or collectivities). We can cite, among other indices the Environmental Sustainability Index (Esty *et al.* 2005), the Vulnerability-Resilience Indicators (Moss *et al.* 2001), the Index of Human Insecurity (Lonergan *et al.* 1999), the Predictive Indicators of Vulnerability (first calculated in Brooks *et al.* 2005), the Environmental Vulnerability Index to Climate Change (EVI-CC, Kaly 2004), the Indicator of Vulnerability to Climate Change (IVCC, Barr *et al.* 2010), the Global Distribution of Vulnerability (Yohe *et al.* 2006a, b), the Social Vulnerability Index (SVI, Cutter *et al.* 1996), the indicators of Downing *et al.* (1995) and Buys *et al.* (2007), and the stimulating approach of Wheeler (2011). These indices often present the same strengths and weaknesses as the theoretical frameworks that they refer to and previously presented.They propose a measure of global (or "generic", Füssel 2010) vulnerability to climate change and not just of structural vulnerability, which is what we propose.

These indices of "generic" vulnerability to climate change are the topic of a wide literature about their method of calculation and country ranking. For instance, Füssel (2009) compares the work of Kaly *et al.* (2004), Yohe *et al.* (2006a, b), and Diffenbaugh *et al.* (2007). In these papers, after analyzing the existing vulnerability to climate change indices, Gall (2007) and Füssel (2009) note that most of the indices are unstable and very sensitive to their proxy and to the aggregation method. Also, the indices are not comparable even though they refer to the same framework, as noted by Moss *et al.* (2001), Gall (2007), Füssel (2009), Eriksen and Kelly (2007). Some authors also criticize the choice of a national scale considering it to be irrelevant to assess the effects of a phenomenon which does not follow borders (Eakin and Luers 2006). The substitutability of components in building the index has also been noted (Tol and Yohe 2007). The generic indices of vulnerability to climate change are widely criticized because they present "methodological flaws or severe doubts regarding their validity" (see Füssel 2010 for a good review of the major deficiencies of these indices).

There are two main reasons why the indicator is a physical indicator, which differentiates it from some other recent attempts. The first is that this indicator intends to provide for the allocation of resources for adaptation to climate change. Therefore, it should not include components of vulnerability depending on the policy, or the willingness of countries. On the one hand, this would mean giving more resources to countries vulnerable because of their inadequate policy. On the other hand, since the vulnerability assessed is a vulnerability in the very long run, it is not possible to anticipate what the policy will be in the future. Moreover, the components of an indicator related to policy could be statistically manipulated. The second reason that differentiates our indicator from those presented earlier, is that the focus on physical components does not require estimating a reaction of agricultural production to climate change. These reactions are not known with sufficient certainty even less so as the time horizon increases. A major factor is uncertitude, including change in agricultural production techniques that climate change itself will not fail to arouse.

Concerning the relevance of an index measured at the country level

The impact of climate change does not follow country's borders. Some effects will impact only a certain area in a given country, while others will have the same impact in the neighboring countries of a particular region. Although the choice of a national scale for the index does not follow climate change characteristics, it corresponds to feasibility constraints, important for the construction of the index.

As noted at the beginning of the chapter, the index we propose should be used as a criterion for the allocation of the resources for adaptation between countries, leading to allocation of more resources to countries which are more vulnerable to climate change. Of course, the index does not capture other factors that should be taken into account in the allocation of resources (e.g. population size and poverty level). For this reason, the choice of scale for the analysis is the country[45]. Thus, even if some authors express reservations about this particular framework (Eakin and Luers 2006); others choose the national level for the reasons developed by Brooks *et al.* (2005) and Barr *et al.* (2010).

[45] D.Wheeler's paper pursues a similar goal.

More than the geographic scale, the time frame of the index raises an important issue. To what extent can the indicators rely on past trends and characteristics to forecast vulnerability to future shocks? Components can be calculated as *ex-ante* or *ex-post*. It seems possible to rely on forecasts when data are available and reliable (e.g. likelihood of sea level rises). Other components can be calculated *ex-post* from past trends.

The demand for an index of climate change vulnerability has become bigger and bigger. This growing demand has led international institutions and researchers to provide related frameworks and indices. However, in the large literature on vulnerability to climate change, there seems to be neither a common framework, nor a universally accepted definition. This can be seen as the result of a lack of connections between the design of frameworks and indices and the goal they are entrusted to attain. This is why we have tried to define a vulnerability to climate change index with the aim of guiding the allocation of adaptation funds. Derived from the literature, this design allows us to combine various existing frameworks based on the split of the vulnerability of climate change into three elements: Shocks, Exposure and Resilience. This framework permits the assessment of the part of vulnerability to climate change which can be considered as physical or structural, and essentially relies on shocks and exposure components[46].

2.3. Components of the Physical Vulnerability to Climate Change Index (PVCCI)

The expanding literature on the economic consequences of climate change asks for a distinction between two kinds of consequences and related risks: *risks of progressive shocks* and *risks of increasing recurrent shocks*. These two categories of risk roughly correspond to the second and the first of the three broad categories of hazard identified by Adger *et al.* (2004), namely:

"Category 1: Discrete recurrent hazards, as transient phenomena such as storms, droughts and extreme rainfall events.

Category 2: Continuous hazards, for example increases in mean temperatures or decreases in mean rainfall occurring over many years or decades, desiccation such as that experienced in the Sahel over the final decades of the 20th century (Hulme 1996, Adger and Brooks 2003)."

[46] These elements are often linked to the notions of vulnerability in the literature but they are very difficult to quantify. They partly overlap the notions of resilience, and their role in guiding aid allocation is controversial.
The analysis of vulnerability to climate change undoubtedly faces the usual distinction between adaptation to and mitigation of climate change. Adaptation primarily seeks to moderate the adverse effects of climate change through actions targeted at the vulnerable system by reducing system sensitivity, or by reducing the consequent level of damage. Mitigation consists in limiting the number, and the magnitude, of potential climate hazards due to climate change (e.g. by reducing the emissions of greenhouse gases). Both are likely to lower the vulnerability to climate change, but not in the same way. Mitigation has a direct effect on the size of climatic shocks while adaptation may either consist in lowering the exposure to shocks or in enhancing the resilience. In the search for an index to be used for the allocation of resources devoted to adaptation, it seems useful to focus on the structural need for adaptation, namely the structural components of the exposure to climatic shocks. For more information on the relation between mitigation and adaptation, see Smit and Wandel (2006), Jones *et al.* (2007) and Buob and Stephan (2011).

There is a third and important category identified by this author covering "discrete singular hazards" (e.g. shifts in climatic regimes associated with changes in ocean circulation) - the paleoclimatic record provides many examples of abrupt climate change events associated with the onset of new climatic conditions which then prevailed for centuries or millennia (Cullen *et al.* 2000, Adger and Brooks 2003). But the assessment of such risks is out of the time horizon we consider, and the reach of this work.

Starting from the distinction between the risk of progressive shocks and the risk of increasing the shocks, our aim is to identify reliable indicators that are good candidates to compose an index of physical vulnerability to climate change. Since it is unavoidably uncertain to assess the final impact of climate change, indicators should rely on intermediary and measurable consequences, estimated either directly or by the means of proxies. Differing from other attempts to assess vulnerability to climate change, our assessment only considers the expected impact of climate change on physical variables. These variables are of course likely to have socio-economic consequences, but they are not socio-economic variables. Using physical indicators (e.g. sea level, rainfall, temperature) means using only objective or neutral data. It avoids reference to indicators partly influenced by policy or resilience factors. It does not involve assessing the expected impact of climate change on variables such as health and agriculture, and can be seen as an intermediary step to assess the link between climate change and these economic variables.

In any case, the set of indicators presented below should be considered as tentative. They try to capture the main channels through which climate change is a factor of vulnerability. It should be remembered that a good index should use a limited number of components, transparent and focused on the most relevant issues.

2.3.1. Risk of progressive and durable shocks

The risk of progressive shocks (or continuous hazard) refers to possible persistent consequences of climate change at the country level. The two main types of such risks, as identified in the literature, are rise of the sea level and increasing aridity, which may lead to desertification.

Risk of flooding from the rise of sea level: shock and exposure

The vulnerability of a country to the rise of the sea level is essentially the risk of this country being flooded. Its assessment involves making a distinction between the size of this shock (magnitude of the rise of the sea level) and the exposure to this shock (altitude). An assessment of the vulnerability of zones likely to be flooded then depends on the two following factors:

- the exposure to sea-level rise depends on the relief, since it influences the likelihood of flooding, so that the indicator should take into account the distribution of the heights of arable lands *or* the distribution of the population according to the height of occupied lands;

- the shock could be estimated by the distribution of the likelihood of a sea-level rise in *t* future years.

The combination of the exposure and potential shocks allows for the assessment of the likelihood of flooding resulting from the sea level rise (in t years).

The measurement of the exposure component does not raise insuperable difficulties. Its assessment relies on a good knowledge of the geographical configuration of the country. If the index refers to the distribution of land heights, the matter of possible debate is only, the type of area to be considered (e.g. all areas of the country, or only arable areas or areas with a minimum population density?). If the distribution of the height of population location is referred to, a debate may only arise from the expected change in this distribution over time (although the *structural* vulnerability should not really depend on this change).

It is more difficult to assess the risk of the sea level rise, for two reasons. Firstly, there is still some degree of uncertainty about the rise of the sea level on a given time horizon, the probability distribution being debated among climate specialists. Secondly, this probability distribution is changing over time with rising average sea levels and increasing dispersion. Let us suppose that we know the probability distribution of the sea level rise for each of the next *x* years. The impact on the expected percentage of flooded areas is itself changing, and can be expressed as a present value, using a discount rate. This should be done for two reasons. The uncertainty of estimations is increasing as the time horizon is extending, although this growing uncertainty can be already captured by the increasing dispersion of the probability of sea level rise. When the sea level rise each year is expressed only as an average level, then it is legitimate to discount for this reason alone. A second reason is the "pure time preference": the disadvantage generated by a given sea level can be considered as higher the earlier it occurs; the later it occurs, the higher the capacity of a country to face it. So a logical indicator would be the present value of the likelihood of flooded areas over the next *t* years.

$$SLR_i = \int^{t} \int^{j} \frac{h_{ijt}}{(1+r)^t} \times s_{ij} \qquad (1)$$

With: *SLR*: sea level rise indicator;

i, country indicator and *j*, the meters of sea level rise;

h_{ij}, probability that the sea level rises by *j* meters for the *i* country;

and s_{ij} the part of arable lands below *j* meters in country *i;*

t: number of years from now;

r: discount rate.

A warning is needed about the discount rate. As far as it reflects a pure time preference, it should normally differ across countries, but in this case, differences would reflect differences in the capacity to adapt, a component of vulnerability which is not really "structural".

If it then seems arbitrary to apply a discount rate (r =0), a simplified indicator could be the likely part of flooded areas in x years (the time horizon of x years being also arbitrary):

$$SLR_{ix} = \int_{j} h_{ijx} \times s_{ij} \qquad (2)$$

Risk of increasing aridity: assessment from past trends in temperature and rainfall, and initial conditions

The literature on the consequences of climate change shows the risk of some arid countries (in particular Sahelian countries) being affected by the rise in temperatures, and therefore being threatened by over-aridity, see for instance (IPCC 2007a, chapter 9). To set up a proxy indicator for this risk, we rely on the distinction previously made between the exposure to shocks and the size of shocks.

Proxies for the exposure to the risk of an increasing aridity can be either the actual average level of rainfall in the country, or preferably the actual part of dry lands in the country, which better fits the risk of desertification. The lower the rainfall level or the higher the dry lands percentage in a country, the more exposed the country to a long term decrease of rainfall or increase in temperature.

As for the size of the (future) shocks, it seems relevant to use the past trend in annual average temperature in each country over the past two or three decades. The hypothesis is that the rise of world temperatures will be distributed over countries in the same way as during recent past decades. In other words, taking into account possible non linearities, we supposed that past trends can be extrapolated for each country. The information on this future distribution, constructed in this way, could be then used to assess the risk for the country. A similar and complementary proxy of the shock measurement for the risk of increasing aridity can also be found in the decreasing trend of average rainfall level. It supposes that the past trend in average rainfall is determined by climate change and will continue following the observed trend in each country (possibly a non linear one). At the country level, the progressive shock resulting from climate change, and evidenced in a rising trend in temperature or a decreasing trend in rainfall, is thus assessed by an extrapolation of recent past trends. If and when more relevant and reliable projections of the temperature and rainfall become available at the country level, it would be possible to use them instead of the (non linear) extrapolation used here (see for instance the Climate Research Unit data base).

2.3.2. Risk of increasing recurrent shocks

Climate change can also generate more frequent or more acute natural shocks, such as droughts, typhoons, and floods (World Bank 2008). Here again the only variables to be considered should be unambiguously linked to climate and its change: such as rainfall and temperature variability.

The vulnerability to recurrent rainfall and temperature shocks has two main kinds of components, corresponding to the previous distinction between exposure and shocks. The exposure components are here given by the average frequency of past (rainfall or temperature) shocks, which reflect the climate but not its change: this average frequency during previous years can be taken as a proxy to the exposure. The shock components, more forward-looking, are drawn from the trend in this frequency, assuming this

trend is determined by climate change, and likely to go on in the future. These two kinds of components are considered in the same way for rainfall and temperature.

Average present frequency as an indicator of exposure

When the Economic Vulnerability Index (EVI) was developed at the United Nations by the Committee for Development Policy (CDP) for the identification of the Least Developed Countries, indirect and synthetic indicators used were likely to capture highly heterogeneous natural shocks (floods, typhoons, droughts, hurricanes, and earthquakes) with highly unequal intensity and consequences. Among the components of the Economic Vulnerability Index (EVI), the risks of natural shocks were assessed *ex-post* by a measure of shock incidence over past years. The two related indicators of the EVI were an index of the instability of agricultural production (*IA*), and an index of the percentage of homeless population due to natural disasters[47] (*HL*). The instability of agriculture production was a square deviation of the agricultural production with regard to its trend. These two indicators were averaged in a natural shocks index: *NSI= (IA+HL)/2*.

Within the EVI, this natural shock index, although calculated *ex-post*, is considered as reflecting a risk for the future, due to the recurrent nature of the related shocks: the average past level is taken as a proxy for the risk of future shocks. This index is indeed likely to change over time, but a high past level can simultaneously be considered as generating a handicap to future economic growth.

As for the vulnerability to climate change, the present approach is different. First, the average level of past shocks is related to rainfall and temperature, two variables clearly linked to climate, while the instability of agriculture production or homelessness also depends on natural shocks not all related to climate. Thus, the index of exposure to climate change, relying on past average levels of rainfall or temperature instabilities, is unambiguously physical, and by no way influenced by policy or resilience factors. Our preferred measurement is the year to year instability of rainfall or temperature, for instance calling R_t the index of rainfall in year t:

$$IR = \sum \frac{|R_t - \hat{R}_t|}{\hat{R}_t} \qquad (3)$$

with $\hat{R}_t$ the trend level of R_t.

Second, the past average level of shocks is considered as an indicator of the *exposure to an increase in the frequency and size of these shocks*, which is captured by a specific index of the size of the shocks as explained below.

[47] The latter index comes from the Center of Research on Epidemiogical Diseases which also produces other indicators, such as the percentage of population affected by natural disasters.

Trends in the intensity of past shocks as a proxy of future shocks

The risk of increasing recurrent shocks associated with climate change is here assessed in a forward-looking manner. It is assumed that the more significantly their intensity has been increasing in the past, the more likely is their increase in the future. In other words, if rainfall and temperature shocks have increased due to climate change, they are assumed to keep increasing in the near future. The proxy used will then be the trend in the size of instability.

For instance, the proxy for the risk of increasing rainfall shocks will be the (positive) trend in the absolute (or squared) deviation of the yearly average of rainfall from its own trend. Supposing a linear trend, it will be measured from:

$$\frac{|R_t - \hat{R}_t|}{\hat{R}_t} = \propto . t + \beta \quad (4)$$

with α being the trend in the intensity of rainfall instability.

Assuming a (possibly more appropriate) non-linear trend, the measurement will be

$$\frac{|R_t - \hat{R}_t|}{\hat{R}_t} = \propto_1 . t + \propto_2 . t^2 + \beta \quad (5)$$

The index of the size of future (rainfall) shocks then depends on the time horizon selected, as is the case for the rise of the sea level, since this rise may also correspond to a non linear trend.

In the same way, it is possible to estimate an index of the size of future (temperature) shocks from the trend in the intensity of temperature instability (α').

2.3.3. Aggregation of components in a synthetic index

Each of the previous component indicators gives information which can be used independently from each other. Making available the measure for each component and sub-component will allow researchers to use them separately or to combine them in an aggregated index. A synthetic index may indeed be required, in particular, as we have seen, for aid allocation. The aggregation of the above components, once they have been expressed as indices on a common scale, raises several issues.

Let us begin by noting that the structure of the index can be presented in two ways. The first one, illustrated by the graph below, distinguishes between risks related to progressive shocks and risks related to more intense recurrent shocks, both considered as resulting from climate change. The progressive shocks cover those due to (i) the sea level rise and (ii) the trend in average rainfall and temperature. The intensification of recurrent shocks corresponds to (iii) rainfall shocks and (iv) temperature shocks. For each of these four main components, an exposure index (in italics) and a shocks index have been computed. The second way of presenting the structure of the index, still starting from the distinction between progressive and recurrent shocks, is to split up the recurrent ones into two mains components: (a) the past average level of rainfall and temperature instability, a proxy for exposure, and (b)

the trend in the size of these instabilities, a proxy for the shock itself. This presentation has been used in tables in the appendix.

A traditional aggregation issue is related to the weight given to each component. Since the components are forward-looking (in particular sea level rise), it is not possible to decide on weights from an econometric estimation of the expected respective impact on a socio-economic variable such as economic growth or poverty reduction; a method which is already difficult to apply for the EVI (Guillaumont 2009a). A simple and normal, although arbitrary, solution is to use equal weights: here equal weights would be given to the two main categories of shocks, then to the four main components, then to the eight sub-components.

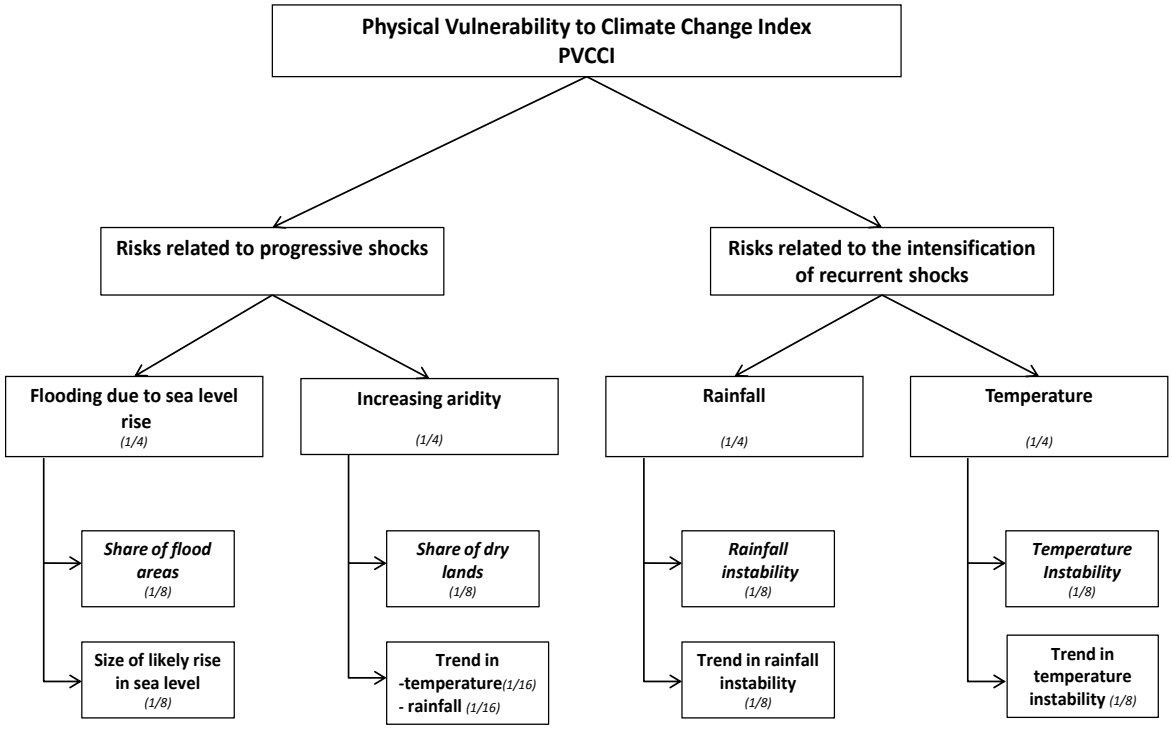
Finally, the way by which the values of the components are averaged is an important issue. The usual averaging practice for the calculation of synthetic indices is the arithmetic one (as it is done for the Human Development Index or for the EVI). However, one should be aware that any of the main components of a vulnerability index may be of crucial importance for a country, more or less independently from the level of the other components. In that case, it can be relevant to use an averaging method reflecting a limited substitutability between components (as already examined for the EVI in Guillaumont, 2009a). It can be obtained either by a quadratic average of the components, or by a reversed geometric average (G'), defined in the following way:

$$G' = 1 - \sqrt[n]{\prod_{k=1}^{n}(1 - A_k)} \qquad (6)$$

with A_k the index value of the k component.

As an example, let us take an island with a very large share of area likely to be flooded, or an arid country suffering from a highly increasing trend in the level of temperatures. Each of these two countries, where a component is close to one, will evidence a high vulnerability to climate change by using this modified geometric average.

FIG. 2.3-Composition of the Physical Vulnerability to Climate Change Index



Note: The boxes corresponding to the two last rows of the diagram refer to exposure components (in italics) and size of the shocks components respectively

In the above presentation, the physical vulnerability to climate change index gathers eight sub-components into four components reflecting two kinds of shocks (progressive ones and increasing recurrent ones), following a unified framework.

2.4. Calculation and robustness of the Index

The physical vulnerability to climate change index has been calculated from data beginning in 1950, covering the last sixty years. The index can be updated and calculated regularly, for instance every three or five years.

2.4.1. Data

The calculation of the risk of flooding due to sea level rise has not been possible due to a lack of agreed data on the evolution of the average level rise, and even more on the probability distribution of this rise. However, Dasgupta and al. (2009) provide data for the calculation of the exposure to sea level rise, supposing a rise up to 1 meter: so, a convenient proxy for the risk of flooding due to sea level rise is the

index of the "part of country affected by a rise of 1 meter of the sea level"[48] (as calculated by Dasgupta *et al.* 2009).

Rainfall and temperature data come from the *Global Air Temperature and Precipitation: Gridded Monthly and Annual Time Series (Version 2.01)* interpolated and documented by Cort J. Willmott and Kenji Matsuura, with support from IGES and NASA, University of Delaware (for more information see Legates *et al.* 1990 a,b, and Willmott and Matsuura 1995). This is the monthly total precipitation for the years 1900-2008 interpolated to a 0.5 by 0.5 degree grid resolution. We associate each kriging point to a country, and then aggregate our data to obtain a mean rainfall for each country. Trends are calculated from average rainfall country data since 1950 (often considered the starting year of climate change)[49]. For this work, we could use the Climate Research Unit (CRU) as used by Burke *et al.* (2009) to assess the role of global warming in futures conflicts in Africa. The results would be similar but could open a discussion about this database.

Trends are calculated on monthly data, before a seasonal adjustment according to:

$$R_j = \alpha + \beta \,.\, t + d_j + \varepsilon_j \qquad (7)$$

For each i country, and with:

R_j: monthly rainfall data ;

t: trend ;

d_j: dummy monthly variable ;

ε_j: term of error ;

[48] We use the database for 72 countries, mainly landlocked (we assign the null value for these elements). For the other countries, we propose an approximation of the index according to the geographic features of the country (altitude, distribution of population). We test the validity of data with some tests of sensitivity (rank correlation).

[49] For countries where kriging points are not exactly in the country (13 countries), we use buffering technique and couple the point closest to the country in the country where data are missing.

For instance, the results of estimation of trend in Benin on rainfall data since 1950 are presented in Table 2.1.

TAB. 2.1-Trend in rainfall in Benin

VARIABLES	**Rainfall**
Trend	-0.0338***
	(0.009)
d2	2.4355
	(1.907)
d3	21.0101***
	(2.525)
d4	68.9388***
	(4.850)
d5	108.6456***
	(5.504)
d6	143.0438***
	(6.051)
d7	198.5777***
	(8.972)
d8	254.7878***
	(9.007)
d9	246.6013***
	(8.841)
d10	100.0894***
	(6.154)
d11	12.1215***
	(3.079)
d12	1.9435
	(1.728)
Constant	34.0590***
	(8.177)
Observations	708
R-squared	0.824

Robust standard errors in parentheses
**** p-value<0.01, ** p-value<0.05, * p-value<0.1*
Note :d_i monthly dummies with January, reference category
If the trend is not significant at the level of 0.1, we assign the null value for this sub-component.

In this version of the index, we have retained a definition of shocks slightly different from that presented in the conceptual framework of the PVCCI, but likely to better reflect the increasing risk of rainfall or temperature shocks. Shocks are identified as the (monthly) events over two standard deviations of the trend in the temperature or rainfall. Then a trend in the number of shocks is calculated, taking into account only the negative shocks for rainfall and only the positive shocks for temperature. In all instances, data are seasonally adjusted. All estimations are done with the method of Ordinary Least Squared (OLS), with heteroskedasticity robust standard error.

Data on the exposure of dry lands come from the United Nations Development Programm/ Office to Combat Desertification and Drought UNDP/UNSO (1999), and from the United Nations Environment Program/Global Resource Information Database (UNEP/GRID 1991).They are available on the World

Resources Institute website[50]. This is the part of dry land, considered to be three of the world's six aridity zones -the arid, semi-arid, and dry sub-humid zones, as a percent of the country's total terrestrial area.

Each component is normalized following the method[51]:

$$CN = \frac{(C - min_C)}{max_C - min_C} * 100 \quad (8)$$

With

CN : normalized component

C: value of component

2.4.2. Sensitivity analysis

Beginning and length of the trend

As there is no consensus on the starting date of climate change, we decide to undertake a robustness check by changing the starting year of the trend to 1970. The date of 1970 is often considered an alternative date for the beginning of climate change (Dell *et al.* 2009). There is no significant differences in the ranking of countries if we choose 1970 as a date of start for calculation of the trend. In fact, the number of significant trends is higher for temperature than for rainfall. Twelve countries obtained both a significant temperature trend when this one is calculated from 1970 but no significant trend from 1950. For rainfall, results are more complicated, because 30 countries who have registered a significant trend from 1950, have no more significant trend since 1970. Results and list of countries concerned are listed in the Table 2.2. It is important to note there is no major change in the ranking of the countries, noticeably due to the fact that countries concerned have a weak trend or a trend with a slope close to zero (if there is a negative trend for temperature or a positive trend for rainfall).

TAB. 2.2-Comparison of results considering the starting date for trend

		Nb countries Rainfall	**Nb countries Temperature**
starting trend 1950	sign. trends	107	186
starting trend 1970	sign. trends	77	174

Test for non linear trend

The previous measure of indicators is based on the assumption of a linear trend. It may not be the case and it is possible to estimate the trend in rainfall and temperature without imposing the linear trend assumption.

[50] World Resources Institute (WRI): http://www.wri.org/project/earthtrends/.

[51] For the component "trend in rainfall", C values are negative. So $CN = 100 * [1 - \frac{(C - min_C)}{max_C - min_C}]$.

We also test for non linear trends following the estimation of :

$$Rj = \alpha + \beta_1 t + \beta_2 t^2 + \theta j + \mathcal{E}j \qquad \text{for each country i} \qquad (9)$$

With *Rj:* monthly rainfall data ;

t : trend ;

θj : dummy monthly variable;

$\mathcal{E}_j$: term of error.

If we only consider countries with a significant and positive β_1 and a significant and negative β_2 for temperature, there is some date for a turning point beyond which interpretation becomes incautious. It is the same when rainfall is considered for countries with a significantly negative β_1 and significantly positive β_2.

What matters is that, in this case, the results make the indicator for shocks depend on the time horizon.If the trend is polynomial, the growth of average temperature or rainfall may cancel or take the opposite direction beyond a certain date. However, tests carried out on a term of 50 years show that the ranking of countries is not significantly modified for one and the other indices (temperature and rainfall), depending on whether one adopts a linear or a polynomial trend. As a consequence, we prefer to retain the linear trend assumption. The estimations present various forms of estimated equations as presented in the Table 2.3.

TAB. 2.3-Test for non linear trend

Temperature				**Rainfall**			
β_2 \ β_1	negative	not significant	positive	β_2 \ β_1	negative	not significant	positive
negative	0	0	34	negative	0	0	25
not significant.	0	76	5	not significant	0	111	2
positive	73	0	0	positive	50	0	0

Measurement of the shocks

The measure of instability around the trend can be done by two ways. The most usual method is to consider the mean absolute value of deviations (or the quadratic mean of deviations) from the trend as a ratio to this trend. We then examine whether these deviations from the trend show themselves a tendency to increase; in other words, we calculate a *trend in the instability (*a trend in the size of the deviations from the trend). Another method is to identify the number of shocks not set upper bounds to +/- two standard deviations and consider whether this number is increasing. The advantage of the second method is to retain only those events as a shock of some magnitude. Its disadvantage is to not consider the size of the shocks themselves.

Components averaging

Different methods of aggregation of the components have been tested: arithmetic, geometric modified (G'), quadratic means. As for weighting the components, a principal component analysis (PCA) was implemented to test the impact of an alternative weighting, compared to the equal weights retained. Finally, the sensitivity of results is tested through some rank correlation tests (Spearman and Kendall tau).

The quadratic and the modified geometric average enhance the value of the index if one of the vulnerability components has an extremely high value (Guillaumont *et al.* 2010). Nevertheless, between these two methods of aggregation the rank differences are not significant. Moreover, the two methods highly correlate with the arithmetic methods.

As for weights, comparing the arithmetic average results obtained with equal weights, and using weights given by the PCA, we observe that there is no significant difference in ranks between the two indices, and their correlation is high (0.70 with level of signification of 0.01%)[52]. It may be seen as validating the choice of equal weights.

Finally, the quadratic average has been retained, instead of the arithmetic average, although the latter is the simplest method. Differences with other methods are very small (see results presented in Table A2.1). We also test the sensitivity of the ranking between three methods of aggregation: arithmetic, geometric and G' aggregation. We calculate the mean of the absolute value of the difference in the ranking. We find a more important difference in the ranking between the arithmetic and the quadratic methods (5.85) than between the arithmetic and G' aggregations (4.60). As we suggested in the explanation of the aggregation formula, countries for which the variation in the ranking is the most important are countries presenting a high degree of vulnerability only for one of the components of the index, mostly islands vulnerable to sea level rise (Vanuatu, Seychelles) but also countries exposed to increasing aridity (Azerbaijan). Moreover, the smallest difference in the ranking is between the G' aggregation and the quadratic average.

2.5. The vulnerability to climate change of developing countries

2.5.1. Why are developing countries considered so vulnerable to climate change?

Let us first recall that global warming due to CO2 emissions has been essentially generated by non developing countries. At the same time, developing countries may be particularly vulnerable to climate change. Referring to an index of physical vulnerability to climate change, we show evidence of a high vulnerability to climate change. The reasons behind this vulnerability are revealed through the lens of the components of the index. In doing so, we do not forget that these countries are also likely to have a lower adaptive capacity, mainly due to a low level of income per capita, which may exacerbate the impact of their physical vulnerability. Four main reasons for a high vulnerability of developing countries to climate change should be taken into consideration.

[52] The same types of comparison of rank are made to test the sensitivity to the proxy.

First, most of these countries, and in particular African and South Asian economies, are very dependent on climate sensitive sectors such as agriculture, forestry and fishery. Agricultural production in many of these countries and regions is likely to be severely affected by climate change. Many African countries are classified as arid or semi-arid, and climate change is likely to reduce the length of the growing season in these regions. Projected reductions of yields could be as much as 50% by 2020 in some countries (IPCC 2007a, chapter 9)[53]. The small-scale poor farmers will probably be the most affected. This effect on agriculture would result both in a lower economic growth, and in a lower food security.

Second, extreme events, such as droughts or floods, have major effects on developing countries. The impact of droughts has been thoroughly documented in numerous studies, which show various economic and social consequences, including on migration (World Bank 2010). During the mid-1980s, the economic losses due to droughts were estimated at several hundred million U.S. dollars (Tarhule and Lamb 2003). Droughts are prevalent in the Sahel, the Horn of Africa and Southern Africa. Some African and Asian countries also experience flood events, which can result in a significant economic deprivation (Mirza 2003).

Third, climate change exacerbates the water stress currently faced by some countries. It also generates water stress in countries where this problem did not previously exist.

Finally, the sea level rise strongly affects small poor islands, often considered as particularly vulnerable. SIDS and most Least Developed Countries islands are those most exposed to the phenomenon.

To sum up, it is particularly interesting to analyse climate vulnerability in developing countries, because these countries, while not responsible for climate change, are the ones who are affected the most by this phenomenon. Because of their low income which impedes their capacity to adapt, these countries are likely to be the first victims of climate change.

2.5.2. What the PVCCI shows

The Physical Vulnerability to Climate Change Index is particularly useful to assess the degree and study the channels of this vulnerability in developing countries. It should cast light on the characteristics of vulnerability to climate change within particular geographical areas or group of countries. The interpretation of the sub-components of the PVCCI give us information about the type of vulnerability that characterizes each country.

Aggregate Results: Broad discrepancies according to country grouping

Results are summarized in the maps below (Figure 2.4 and 2.5). The index is estimated at the country level, not at a regional level. It appears that in a region usually considered as vulnerable or exposed to climate change, there may be significant differences between countries.

By geographical areas. At the regional level, we distinguish different areas. Globally, countries in South America and South East Asia present a low level of vulnerability. Pacific islands, West and Central Asia, Sub Saharan and South Africa countries are regions where vulnerability to climate change is the highest.

[53] In South Asian countries, date of starting mossoon and its duration also determine the agricultural production.

All these consequences affect economies, which are already weak. Out of 54 African countries, 33 are classified as Least Developed Countries. An IPCC report considers that Africa is facing an annual loss of 1 to 2 % of annual GDP because of climate variability (IPCC 2007a, chapter 9). The climate change impact is likely to reinforce existing development challenges, and its consequences are generally expected to be bigger in lower income countries, which many African countries are.

By Categories. Country grouping results are presented in the table 2.4 below. The results show the high physical vulnerability to climate change of Least Developed Countries (LDCs), already found to have a high economic vulnerability (according to Economic Vulnerability Index). LDCs are found to have a high degree of vulnerability to climate change, particularly due to the "recurrent shocks" component of the index. Small Islands Developing States (SIDS) and Landlocked Developping Countries (LLDCs) are characterised by a high level of the progressive shocks component, but the relatively high level of this component does not trace back to the same effect of climate change. SIDS are more vulnerable to the sea level rise risk and LLDCs are more vulnerable to the risk of increasing aridity.

TAB. 2.4-PVCCI quadratic, by group of countries (1/3)

group of countries	PVCCI				PROGRESSIVE SHOCKS				RECURRENT SHOCKS			
	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation
All Developing countries (DCs)	116	42,10	41,62	7,66	116	32,43	28,87	14,83	142	47,38	46,10	7,64
Least Developed Countries (LDCs)	46	44,61	44,17	8,33	46	33,20	26,32	16,84	49	51,82	51,71	7,65
All Developing countries non LDCs	72	40,79	39,34	7,37	72	32,51	29,49	14,33	95	45,14	44,76	6,60
Low and Lower Middle Income countries	84	43,62	43,72	7,81	84	33,98	30,43	15,82	95	49,19	49,21	7,66
Low and LMI countries non LDCs	39	42,21	41,87	7,08	39	34,49	32,18	14,72	47	46,35	45,52	6,61
Small Islands Developing States (SIDS)	29	42	37,14	10,33	29	32	24,93	18,76	31	47	45,92	7,17
SIDS non LDCs	18	38,82	36,86	7,98	18	28,23	24,41	14,70	20	45,60	45,47	4,88
SIDS-LDCs	11	46,60	45,34	12,21	11	38,55	28,85	23,36	11	50,49	49,84	9,59
Landlocked Developing Countries (LLDCs)	27	44,51	45,75	7,33	27	38,07	42,54	16,34	29	47,52	48,97	8,26
LLDCs non LDCs	11	47,30	48,45	6,08	11	49,54	49,96	9,81	13	44,02	42,99	6,43
LLDCs-LDCs	16	42,59	40,31	7,67	16	30,19	23,92	15,36	16	50,35	49,66	8,66
African Developing countries	44	44,74	44,98	6,63	43	33,99	32,66	12,94	47	51,84	51,04	7,17
African LDCs	30	44,97	45,52	6,35	30	32,71	27,66	12,72	32	53,15	53,11	7,24
African Low and LMI countries	37	44,39	44,98	6,09	37	33,05	29,60	12,22	40	51,99	51,38	7,18

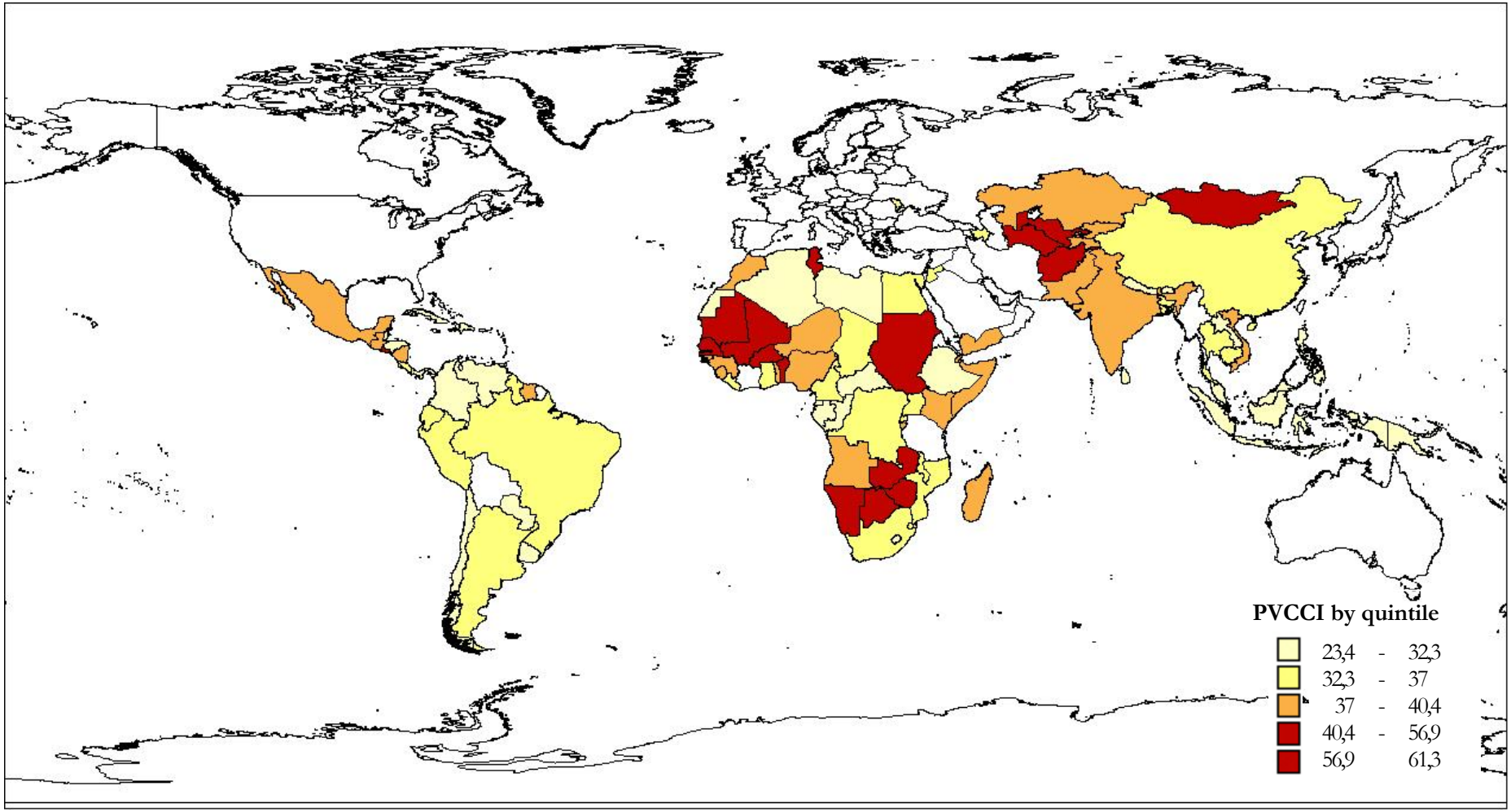
TAB. 2.4-PVCCI quadratic, by group of countries (2/3)

group of countries	PROGRESSIVE SHOCKS				Sea level rise				Over aridity			
	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation
All Developing countries (DCs)	116	32,43	28,87	14,83	122	5,35	0,99	16,79	135	43,63	38,50	18,84
Least Developed Countries (LDCs)	46	33,20	26,32	16,84	48	7,51	0,67	24,19	47	42,50	36,41	18,48
All Developing countries non LDCs	72	32,51	29,49	14,33	76	5,17	1,29	14,32	90	43,93	39,06	19,00
Low and Lower Middle Income countries	84	33,98	30,43	15,82	88	6,70	0,84	21,22	91	45,64	40,70	19,00
Low and LMI countries non LDCs	39	34,49	32,18	14,72	41	5,59	1,00	17,06	45	48,48	45,49	19,28
Small Islands Developing States (SIDS)	29	32	24,93	18,76	29	23	3,80	34,39	31	31	28,14	7,81
SIDS non LDCs	18	28,23	24,41	14,70	18	19,98	5,83	26,36	20	29,32	27,79	7,38
SIDS-LDCs	11	38,55	28,85	23,36	11	29,10	2,84	45,54	11	34,29	33,48	7,87
Landlocked Developing Countries (LLDCs)	27	38,07	42,54	16,34	28	0,12	0,00	0,62	28	54,55	60,33	22,98
LLDCs non LDCs	11	49,54	49,96	9,81	12	0,00	0,00	0,00	12	70,35	72,16	13,27
LLDCs-LDCs	16	30,19	23,92	15,36	16	0,21	0,00	0,82	16	42,69	33,82	21,71
African Developing countries	43	33,99	32,66	12,94	45	1,90	0,26	6,56	44	47,81	44,02	18,64
African LDCs	30	32,71	27,66	12,72	31	1,01	0,36	1,42	31	46,75	40,70	17,91
African Low and LMI countries	37	33,05	29,60	12,22	39	0,94	0,16	1,34	38	47,13	44,02	17,23

TAB. 2.4-PVCCI quadratic, by group of countries (3/3)

group of countries	number of countries	RECURRENT SHOCKS			Rainfall shocks			Temperature shocks		
		Mean	Median	Standard Deviation	Mean	Median	Standard Deviation	Mean	Median	Standard Deviation
All Developing countries (DCs)	142	47,38	46,10	7,64	43,31	43,39	10,77	43,31	43,39	10,77
Least Developed Countries (LDCs)	49	51,82	51,71	7,65	47,74	49,06	11,91	54,32	50,18	10,90
All Developing countries non LDCs	95	45,14	44,76	6,60	41,00	40,62	9,28	48,11	45,09	8,97
Low and Lower Middle Income countries	95	49,19	49,21	7,66	45,71	45,60	10,73	51,37	48,11	10,71
Low and LMI countries non LDCs	47	46,35	45,52	6,61	43,45	43,25	8,86	48,26	45,63	9,55
Small Islands Developing States (SIDS)	31	47	45,92	7,17	40,72	41,18	9,75	52,10	48,50	10,97
SIDS non LDCs	20	45,60	45,47	4,88	40,70	41,18	5,90	49,39	47,15	8,94
SIDS-LDCs	11	50,49	49,84	9,59	40,77	39,62	14,81	57,02	52,47	12,95
Landlocked Developing Countries (LLDCs)	29	47,52	48,97	8,26	44,57	43,53	11,37	49,47	46,05	9,61
LLDCs non LDCs	13	44,02	42,99	6,43	40,95	38,06	10,78	46,33	44,39	4,91
LLDCs-LDCs	16	50,35	49,66	8,66	47,51	49,57	11,31	52,02	46,15	11,73
African Developing countries	47	51,84	51,04	7,17	47,92	49,06	11,49	54,22	51,76	10,59
African LDCs	32	53,15	53,11	7,24	49,36	50,43	10,87	55,52	53,37	11,04
African Low and LMI countries	40	51,99	51,38	7,18	48,26	49,57	11,56	54,25	51,79	10,40

FIG. 2.4-PVCCI for Developing Countries



Heterogenous results even within broad categories as illustrated by African countries

Most African countries frequently deal with risks resulting from climate, such as droughts, a frequent event in semi-arid countries of Sub-Saharan Africa. The impact of climate change is likely to be considerable in tropical regions. Overall, crop yields may fall by 10 to 20% in the period to 2050 because of warming and drying, but there are places where yield losses may be much more severe (Jones and Thornton 2003). The effects of drought are exacerbated in these regions by deep rural poverty, limited government capacity, and exposure to additional shocks (Kazianga and Udry 2006). Such climatic risks particularly affect poor countries, and it is a growing concern that climate change will worsen these events through increased rainfall variability (IPCC 2007a, chapter 9). Among developing countries, many in Africa are seen as being the most vulnerable to climate change (Slingo *et al.* 2005). African countries are generally considered more vulnerable to the effects of climate change because they have a lower capacity of adaptation (Wisner 2004, Thomas and Twyman 2005). High levels of vulnerability as well as limited financial and institutional ability to adapt; low per capita GDP and high poverty tend to exacerbate the consequences of climate change. As a result, there is a considerable and increasing activity by development agencies and governments to support the development of appropriate adaptation strategies. A good knowledge of the vulnerability in climate change faced by each country is necessary to guide the aid for adaptation.

Some previous findings… confirmed by the index. Measurements of the supposed consequences of global warming in Africa: since the 1960s is recognized by scientists. While this trend seems to affect the whole continent, the change is not uniform. For instance, in South Africa and Ethiopia, minimum temperatures have increased (Conway *et al.* 2004, 2005), but Eastern Africa has experienced a trend of decreasing temperature. As for precipitation, the situation is more complicated: rainfall exhibits spatial and temporal variability (e.g., Hulme *et al.* 2005). In Western Africa, a decline in annual rainfall has been observed: 20 to 40% noted between the periods 1930-1960 and 1968-1990 (Dai *et al.* 2004). In the tropical rain-forest zone, the decline is smaller, and some other regions, such as Southern Africa, show no long-term change in rainfall. Increased interannual variability has been observed in the post-1970 period, with higher rainfall anomalies (Richard *et al.* 2001). South Africa has registered a significant increase in rainfall events (Conway *et al.* 2005). This heterogeneous picture is confirmed by the results of our index (summarized in Figure 2.5).

A high average level of vulnerability to climate change in Africa. Sub-Saharan African countries have a higher average quadratic PVCCI than the other developing countries (Table 2.4 and Figure 2.4). This level is higher on average because of the impact of the increasing recurrent shocks (mean for Developing Countries: 47.38 and for African Developing countries 51.84), not of progressive shocks (mean around 33 for the two groups)[54].

[54] Table A2.4, in appendix presents results for arithmetic PVCCI.

As for the level of the index of the risk associated with progressive shocks, this is a result of a rather low impact of the sea level rise in Africa: a difference of 3 points in the mean between DCs and African DCs. Compared to other developing countries, Africa does not include many small islands (which are more threatened by this trend). This difference in the composition of the group explains the high level of standard deviation for sea level rise in the group of developing countries (DCs), and the low level of standard deviation for the African group, which includes more landlocked countries. This lower vulnerability to sea level rise is compensated by a greater vulnerability to increasing aridity. The component "increasing aridity" is in fact more important for African DCs (4 points of difference in the mean) and the trend in temperature increase is more acute in Africa. Finally, the index of the risk of progressive shocks is not significantly different in Africa and in other developing countries, because of these two opposed effects. It should be noted that we are here comparing Africa and other developing countries through simple averages or median levels, consistent with the aim of our index. If the country indices of the risk of progressive shocks were weighted by population, the (weighted) average would probably be higher for Africa because the simple average of other developing countries is affected by the level of numerous small islands threatened by sea level rise (as shown by the simple average for SIDS).

As for the index of increasing recurrent shocks, the higher level in Africa, is due both to the trends of rainfall and of temperature instabilities, from departure levels which are themselves rather high. For these components, the difference between DCs and African DCs is large and non ambiguous.

Country group results presented in the table below also show the high physical vulnerability to climate change of the Least Developed Countries, already found to have a high structural economic vulnerability, as evidenced by EVI, a feature used for their identification (Figure 2.4).

Heterogeneous levels, heterogeneous kinds of vulnerability among countries. Since the index is estimated country by country, it exhibits a large heterogeneity in the levels and the types of vulnerability among countries (Appendix A2.2 and A2.3). Its measurement, while showing a high average vulnerability to climate change in Africa (Figure 2.5), also shows levels very uneven across African countries, and this is so for various reasons.

On a scale including 147 countries in the world, the PVCCI ranking (in increasing order, *i.e.* from the least to the most vulnerable) varies for African countries between 23 (Lesotho) and 144 (Namibia). The ten most vulnerable African countries with regard to the PCCVI are Namibia, Senegal, Botswana, Gambia, Burkina Faso, Mali, Zambia, Sudan, Benin, and Burundi. These countries present a high level of overall physical vulnerability, generally due to a high level of several components of the index. Five main regions can be distinguished: the three most vulnerable sub-regions seem to be Western Africa, a group of Eastern Africa countries and Southern Africa (not including South Africa). North Africa and a group of Central Africa countries present a lower vulnerability than the rest of the continent.

As for vulnerability to progressive shocks, the level of this component (due to two sub-components, sea level rise and intensification of aridity) is for some African countries (Botswana, Chad, Comoros and Mali) at the highest level in the world. This high level of vulnerability to progressive shocks is in Africa generally not mainly due, to sea level rise, except in the case of Seychelles. Some African countries are landlocked and so not exposed to sea level rise, but many of them are highly exposed to increasing aridity.

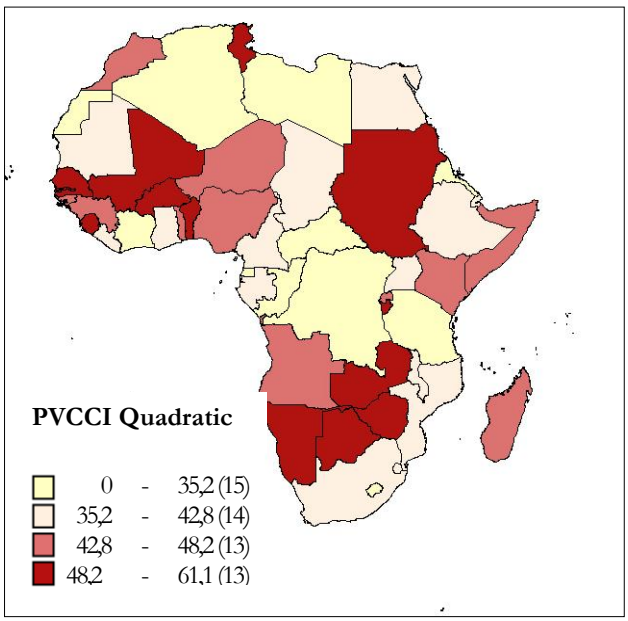
Indeed, most African countries with a high level of vulnerability to progressive shocks are those exposed to an increase of aridity. This vulnerability seems to be high for countries in desert areas Mali, Burkina Faso, Sudan, Namibia and Botswana. The ranking of African countries vulnerable to aridification is the highest in the world, along with some Central Asia countries (e.g. Afghanistan, Turkmenistan). Some African countries also face both types of progressive shocks: Senegal is highly vulnerable to progressive shocks because of a high level of vulnerability to an increase of aridity in the North of the country, but also because of the sea level rise in the Senegal river delta (a similar vulnerability is found in Gambia). It should be noted that the standard deviation of the "increasing aridity" component is bigger in the African group than in the group of other developing countries.

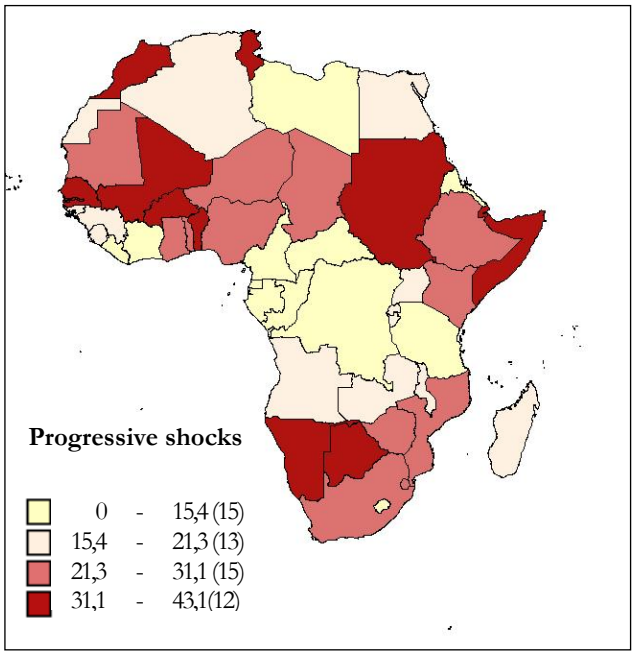
As for the "risk of intensification of recurrent shock", this component, on average high for African countries, also shows significant variation between African countries (ranked from 11 for Chad, the lowest, to 201 for Zambia among 201 countries). After Zambia, the African countries most vulnerable to an intensification of rainfall and/or temperature recurrent shocks are Namibia, Burundi, Sierra Leone, Madagascar, Senegal, Angola, Guinea, Rwanda and Guinea-Bissau (these ten African countries are among the thirteen countries in the world with the highest level of vulnerability to the increase of recurrent risks).These high levels are either due to a very high level of the indices of intensification of both rainfall and temperature shocks (Zambia, Namibia, Madagascar[55], Guinea), mainly due to the intensification of temperature shocks (Burundi, Rwanda, Sierra Leone, Senegal), or mainly due to the intensification of rainfall shocks (Guinea-Bissau, Angola). Of course, those countries among the most vulnerable to the intensification of recurrent shocks are to a large extent vulnerable to both types of shocks. Some other African countries appear to be essentially vulnerable to one kind of shock (Comoros and Sao Tome to temperature, Zimbabwe, Malawi, Eritrea, Mali, and Gambia to rainfall).

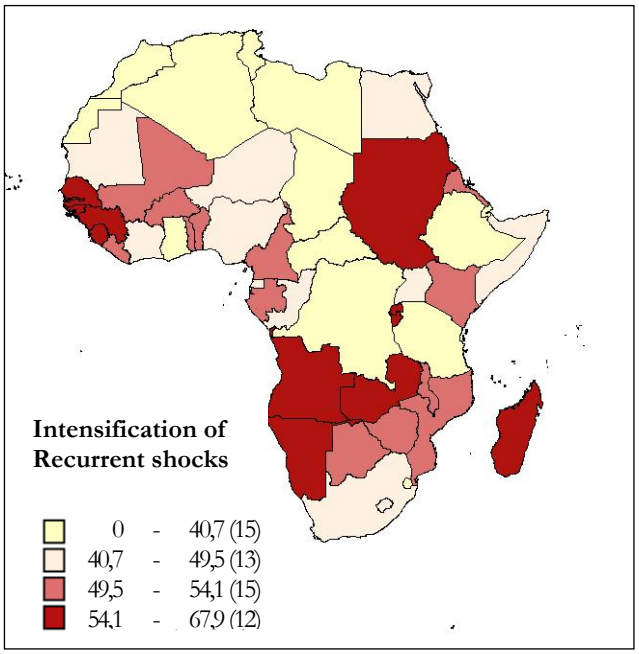
Thus, although many African countries seem to be highly vulnerable to climate change for physical reasons, the precise reason or channel of this (physical) vulnerability may significantly differ from one country to another. These various profiles of vulnerability to climate change may help in the design of appropriate adaptation policies.

[55] The vulnerability of Madagascar is not a surprise due to the large number of typhoons which affect the country.

FIG. 2.5-PVCCI in African Countries and by components







Several types of vulnerability identified : a tentative typology

Countries in the same geographical area present some important differences in their vulnerability. To help understanding these various types of vulnerability, it is useful to classify countries according to the various components of the index (Table 2.5). A tentative typology (presented below) is likely to be refined according to precise thresholds of components.

TAB. 2.5-Tentative typology of the types of vulnerability as drawn in the index

	Name of category	PROGRESSIVE SHOCKS		INCREASING RECURRENT SHOCKS		Example of countries concerned
		Sea level rise	Increasing aridity	Rainfall shocks	Temperature shocks	
	Global High Vulnerability	+++		+++		Senegal, Gambia
	Vulnerability to recurrent shocks			+++		El Salvador, Burundi, Sierra Leone, Zambia
	Vulnerability to progressive shocks	+++				Tunisia, Morocco
Vulnerability for one sub-component	**Vulnerability to sea level rise**	+++				Grenada, Micronesia, Fed. Sts., Seychelles, Kiribati, Maldives, Marshall Islands, Tuvalu
	Vulnerability to increasing aridity		+++			Kazakstan, Botswana , Uzbekistan, Burkina Faso, Turkmenistan Afghanistan, Namibia
	Vulnerability to increasing rainfall shocks			+++		Namibia, Bangladesh, Myanmar , Guinea-Bissau, Angola, Mongolia, Sao Tome and Principe
	Vulnerability to increasing temperature shocks				+++	Timor-Leste, Comoros, Rwanda, Guatemala

This table shows that developing countries are not affected by the same type of vulnerability. This finding legitimate the use of geometrical/quadratic average, in particular if the index is to be used as a criterion for the aid allocation for adaptation. Moreover, the identification of the source of vulnerability to climate change may help for the design of a relevant support to countries willing to implement adaptation policies.

2.6. Conclusion

This chapter presents a first attempt to build a Physical Vulnerability to Climate Change Index (PVCCI) and preliminary results for developing countries. The index differs from the abundant literature on vulnerability to climate change by considering only the part of vulnerability which does not depend on present or future policy. To this aim, it relies only on physical components reflecting the likely impact of climate change, without any use of socioeconomic data. It is an index of physical or geo-

physical vulnerability to climate change, changing only progressively and slowly. It first differs from the more general environmental vulnerability indices, which include resilience and policy components and environmental variables other than climate. It also differs from the Economic Vulnerability Index (EVI) used by the Committee for Development Policy (CDP) for the identification of the Least Developed Countries (LDCs). The PVCCI is related only to structural vulnerability (independent from the present will of countries) but covers all kinds of exogenous shocks likely to affect economic growth, not just those resulting from climate change.

The components of the PVCCI index capture two types of risk related to climate change: the risks of an increase of recurrent shocks (such as droughts), and the risks of progressive and irreversible shocks (such as flooding due to higher sea level). The assessment of these risks relies on components referring both to the likely size of the shocks and to the country's exposure to these shocks.

The calculation of the index of physical vulnerability to climate change shows both a higher average level for developing countries, in particular for African countries, and a significant heterogeneity among them and among African countries. Five main regions have been distinguished: the three most vulnerable sub-regions appear to be Western Africa, a group of Eastern African countries, and Southern Africa (excluding South Africa). On the other hand, North Africa and a group of Central African countries present a lower vulnerability than the rest of continent. The ten most vulnerable African countries with regard to the PCCVI appear to be Namibia, Senegal, Botswana, Gambia, Burkina Faso, Mali, Zambia, Sudan, Benin, and Burundi. These countries present a high level of overall physical vulnerability, generally due to a high level of several components of the index.

The high physical vulnerability to climate change of many African countries is itself the result of various combinations of the components of the index. The higher average level of the African PVCCI is due to a greater intensification of recurrent shocks (rainfall or/and temperature), more than to progressive shocks. In fact, the impact of progressive shocks in Africa is influenced by the fact that many African countries being landlocked are not threatened by the sea level rise, while many of them are concerned by a trend of increasing aridity. The higher level of risk of increasing recurrent shocks appears to result either from rainfall or temperature shocks.

The UN Economic Vulnerability Index (EVI) has been proposed as a possible criterion for the allocation of development assistance between countries (Guillaumont 2008, Guillaumont *et al.* 2010). In the same way, the PVCCI could be used as a criterion for the allocation of the international resources available for the adaptation to climate change. It would be a relevant criterion precisely because it does not depend on present policy, and only gives an indication of the needs for adaptation. The two indices EVI and PVCCI can have a complementary role in the allocation of international resources, as far as these resources are provided from separate sources. The significant differences in rankin between PVCCI and EVI supports the idea of two specific assessments of "needs".

Appendix

TAB. A2.1-Sensitivity of index to components averaging

countries	CCVI arithmetic		CCVI quadratic		CCVI G'		Rank difference	
	value	rank	value	rank	value	rank	(1-2)	(1-3)
Afghanistan	45,25	136	54,05	138	53,88	138	-2	-2
Algeria	28,68	27	33,40	30	30,59	28	-3	-1
Angola	38,69	109	45,70	110	43,08	106	-1	3
Antigua and B.	31,73	56	36,94	58	34,41	58	-2	-2
Argentina	33,05	67	37,89	64	35,24	64	3	3
Austria	24,25	5	28,56	6	25,64	5	-1	0
Azerbaijan	34,93	80	42,79	94	40,06	92	-14	-12
Bahamas	46,48	138	47,05	119	47,02	124	19	14
Bangladesh	33,32	71	40,42	78	37,70	78	-7	-7
Belgium	26,66	18	30,44	14	28,08	15	4	3
Belize	28,39	26	31,44	21	29,60	23	5	3
Benin	43,83	130	50,45	127	48,57	127	3	3
Bhutan	26,19	15	31,50	22	28,19	16	-7	-1
Bosnia and H.	24,88	8	29,48	8	26,47	8	0	0
Botswana	47,60	139	56,69	140	57,76	140	-1	-1
Brazil	35,76	84	42,46	90	39,79	87	-6	-3
Brunei D.	25,42	12	30,58	15	27,30	12	-3	0
Burkina Faso	45,46	137	53,63	137	52,66	135	0	2
Burundi	40,05	118	49,00	126	47,74	125	-8	-7
Cambodia	34,12	77	40,35	76	37,51	77	1	0
Cameroon	32,89	66	38,97	71	35,89	69	-5	-3
Cape Verde	30,50	45	35,19	39	32,54	41	6	4
Central African Rep.	30,18	41	35,45	42	32,42	40	-1	1
Chad	33,15	69	40,58	80	37,33	75	-11	-6
Chile	31,94	57	36,08	50	33,78	53	7	4
China	35,42	81	40,53	79	37,91	79	2	2
Colombia	27,93	24	32,41	26	29,62	24	-2	0
Comoros	36,39	91	45,34	106	43,88	111	-15	-20
Congo	29,03	30	34,94	38	31,56	33	-8	-3
Congo, The Dem Rep.	32,31	62	39,01	72	35,77	68	-10	-6
Costa Rica	33,50	72	41,43	82	38,88	83	-10	-11
Cuba	32,14	60	36,71	54	34,41	59	6	1
Cyprus	36,37	90	42,48	91	40,08	93	-1	-3
Czech Republic	26,04	14	30,15	13	27,41	14	1	0
Denmark	51,80	143	59,12	143	100,00	143	0	0
Djibouti	37,38	100	42,88	95	40,83	95	5	5
Dominican Republic	30,24	42	34,71	36	32,10	37	6	5
Ecuador	36,23	89	41,87	85	39,23	85	4	4
Egypt	30,97	50	35,60	44	33,02	48	6	2
El Salvador	44,96	135	53,17	136	52,75	136	-1	-1
Equatorial Guinea	28,72	28	34,13	33	30,99	31	-5	-3
Ethiopia	32,43	63	37,25	61	34,72	60	2	3
Fiji	29,91	37	34,70	35	31,98	36	2	1

countries	CCVI arithmetic		CCVI quadratic		CCVI G'		Rank difference	
	value	rank	value	rank	value	rank	(1-2)	(1-3)
French Guiana	29,87	36	37,27	62	33,97	54	-26	-18
French Polynesia	34,26	79	42,06	87	39,85	90	-8	-11
Gabon	31,21	53	37,24	60	34,05	55	-7	-2
Gambia	48,98	140	55,99	139	55,84	139	1	1
Ghana	33,54	73	41,95	86	38,39	81	-13	-8
Greece	34,15	78	38,92	70	36,47	70	8	8
Grenada	41,78	126	42,96	96	42,71	102	30	24
Guadeloupe	28,01	25	32,73	28	29,98	26	-3	-1
Guatemala	37,95	105	46,61	115	45,06	119	-10	-14
Guinea	38,32	107	44,98	104	42,40	100	3	7
Guinea-Bissau	37,96	106	44,36	100	42,10	99	6	7
Guyana	26,50	17	31,43	20	28,37	17	-3	0
Haiti	29,24	31	33,49	31	30,95	30	0	1
Honduras	31,37	54	36,35	51	33,61	50	3	4
Hungary	27,77	21	32,28	25	29,43	22	-4	-1
India	39,83	112	45,86	112	43,35	107	0	5
Indonesia	30,73	47	35,70	47	32,98	47	0	0
Iran, Islamic Republic	40,23	122	47,47	122	45,45	120	0	2
Ireland	29,77	35	30,75	16	30,20	27	19	8
Jamaica	33,16	70	37,14	59	35,02	61	11	9
Jordan	35,59	83	41,25	81	38,43	82	2	1
Kazakstan	40,09	119	50,62	128	51,79	134	-9	-15
Kenya	39,34	110	45,52	109	42,87	105	1	5
Kiribati	50,16	141	58,29	141	100,00	143	0	-2
Korea, Dem Peo. Rep.	33,09	68	39,50	74	36,51	71	-6	-3
Korea, Republic of	29,96	39	35,92	48	32,72	45	-9	-6
Kuwait	35,59	82	42,16	88	39,94	91	-6	-9
Kyrgyzstan	37,36	99	45,00	105	42,59	101	-6	-2
Lao Peo. Dem.Rep.	28,89	29	36,04	49	32,15	38	-20	-9
Lesotho	26,38	16	32,23	23	28,64	18	-7	-2
Liberia	33,65	74	40,40	77	37,28	74	-3	0
Libyan Arab J.	31,00	51	35,61	45	33,03	49	6	2
Luxembourg	23,26	1	27,27	2	24,49	1	-1	0
Macedonia	27,67	20	32,24	24	29,36	21	-4	-1
Madagascar	40,18	121	47,28	120	44,87	118	1	3
Malawi	33,89	76	40,03	75	37,10	73	1	3
Malaysia	24,95	9	30,06	12	26,81	10	-3	-1
Maldives	56,91	145	62,77	145	100,00	143	0	2
Mali	44,45	133	51,74	133	49,73	130	0	3
Marshall Islands	61,28	146	66,05	146	100,00	143	0	3
Mauritania	36,80	95	41,80	83	39,40	86	12	9
Mayotte	36,63	93	45,36	107	44,01	112	-14	-19
Mexico	37,61	102	42,64	93	40,42	94	9	8
Micronesia, Fed. Sts.	36,23	88	36,77	55	36,54	72	33	16
Moldova, Republic of	36,87	96	45,45	108	43,47	108	-12	-12
Mongolia	44,02	131	51,80	134	49,92	131	-3	0
Morocco	37,28	98	44,92	103	42,84	104	-5	-6
Mozambique	36,45	92	42,51	92	39,81	89	0	3

countries	CCVI arithmetic		CCVI quadratic		CCVI G'		Rank difference	
	value	rank	value	rank	value	rank	(1-2)	(1-3)
Namibia	52,59	144	61,07	144	60,89	142	0	2
Nepal	31,05	52	37,72	63	34,32	57	-11	-5
New Caledonia	25,27	11	29,65	9	26,88	11	2	0
New Zealand	24,32	6	28,49	5	25,73	6	1	0
Nicaragua	38,33	108	44,82	102	42,71	103	6	5
Niger	39,84	113	46,30	113	43,72	109	0	4
Nigeria	37,65	104	43,87	98	41,14	97	6	7
Oman	23,78	3	27,30	3	24,85	3	0	0
Pakistan	39,86	114	46,36	114	44,13	115	0	-1
Palau	32,16	61	38,05	65	35,31	65	-4	-4
Panama	29,98	40	35,64	46	32,58	42	-6	-2
Papua New Guinea	29,37	32	34,69	34	31,62	34	-2	-2
Paraguay	31,57	55	36,58	53	33,71	52	2	3
Peru	35,95	86	42,44	89	39,79	88	-3	-2
Philippines	29,57	34	34,79	37	31,85	35	-3	-1
Puerto Rico	27,87	23	31,19	18	29,18	20	5	3
Qatar	29,93	38	32,61	27	31,11	32	11	6
Réunion	39,87	115	47,38	121	45,92	121	-6	-6
Rwanda	36,64	94	45,75	111	44,11	113	-17	-19
St Vincent and the G.	30,40	43	31,16	17	30,73	29	26	14
Samoa	25,75	13	29,98	11	27,31	13	2	0
Sao Tome and P.	40,82	123	46,74	118	44,59	117	5	6
Saudi Arabia	30,78	49	35,43	41	32,69	44	8	5
Senegal	50,71	142	58,75	142	58,81	141	0	1
Seychelles	37,27	97	39,34	73	38,39	80	24	17
Sierra Leone	40,04	117	48,22	123	46,83	123	-6	-6
Slovakia	25,16	10	29,72	10	26,72	9	0	1
Solomon Islands	30,46	44	35,55	43	32,81	46	1	-2
Somalia	39,35	111	46,62	116	44,12	114	-5	-3
South Africa	35,85	85	41,85	84	39,04	84	1	1
Sri Lanka	30,69	46	35,25	40	32,63	43	6	3
St. Kitts and Nevis	35,95	87	38,32	66	37,49	76	21	11
Sudan	44,08	132	51,10	130	48,90	128	2	4
Suriname	27,83	22	32,82	29	29,89	25	-7	-3
Swaziland	32,54	64	38,54	68	35,48	66	-4	-2
Switzerland	24,55	7	28,94	7	26,01	7	0	0
Taiwan, Prov. of China	30,74	48	34,08	32	32,16	39	16	9
Tajikistan	39,94	116	46,72	117	44,14	116	-1	0
Thailand	32,11	59	38,34	67	35,20	62	-8	-3
Timor-Leste	44,85	134	53,17	135	53,03	137	-1	-3
Togo	37,63	103	43,57	97	40,93	96	6	7
Tonga	41,45	124	44,38	101	43,81	110	23	14
Tunisia	40,15	120	48,44	124	48,13	126	-4	-6
Turkmenistan	41,97	127	51,01	129	50,77	132	-2	-5
Tuvalu	61,28	146	66,05	146	100,00	143	0	3
Uganda	32,59	65	38,75	69	35,73	67	-4	-2
United Arab Emirates	27,38	19	31,30	19	28,87	19	0	0
Uruguay	24,17	4	27,89	4	25,41	4	0	0

countries	CCVI arithmetic		CCVI quadratic		CCVI G'		Rank difference	
	value	rank	value	rank	value	rank	(1-2)	(1-3)
Uzbekistan	42,54	128	51,63	132	51,61	133	-4	-5
Vanuatu	29,41	33	36,87	57	33,66	51	-24	-18
Venezuela	32,02	58	36,78	56	34,14	56	2	2
Viet Nam	33,69	75	36,38	52	35,21	63	23	12
Western Sahara	23,57	2	26,95	1	24,57	2	1	0
Yemen	37,39	101	43,99	99	41,44	98	2	3
Zambia	43,26	129	51,48	131	49,55	129	-2	0
Zimbabwe	41,69	125	48,45	125	45,98	122	0	3

TAB. A2.2-Elementary components of the PVCCI for African Countries[56]

countries	1. Size of sea level	2. Share of flood areas	3. Share of drylands	4a. Trend in temperature	4b. Trend in rainfall	5. Rainfall instability	6. Temperature instability	7.Trend in rainfall instability	8.Trend in temperature instability
Algeria	1,00	0,37	20,90	45,73	67,18	23,44	39,67	31,97	54,08
Angola	1,00	0,02	19,30	35,41	71,62	87,50	40,50	39,22	69,32
Benin	1,00	0,53	87,50	27,16	72,03	73,44	45,45	32,37	58,06
Botswana	1,00	0,00	100,00	73,34	70,91	64,06	53,72	36,82	54,08
Burkina Faso	1,00	0,00	100,00	38,75	75,13	65,63	46,28	40,77	54,08
Burundi	1,00	0,00	0,00	61,98	70,04	62,50	72,73	35,62	83,57
Cameroon	1,00	0,02	13,00	14,73	77,81	67,19	28,93	39,28	68,30
Cape Verde	1,00	0,69	15,40	14,82	66,42	56,25	37,19	34,94	54,08
Central Af. Rep.	1,00	0,00	20,10	4,30	74,32	57,81	28,93	36,17	59,10
Chad	1,00	0,00	68,20	42,69	69,42	9,38	47,11	39,11	45,39
Comoros	1,00	0,71	0,00	74,86	87,93	50,00	100,00	0,00	54,08
Congo	1,00	0,01	0,10	15,30	74,58	56,25	33,88	35,78	61,16
Congo, Dem.Rep. of	1,00	0,00	0,40	31,05	71,98	54,69	58,68	35,76	57,39
Côte d'Ivoire	1,00	0,20		14,63	79,20	70,31	35,54	32,37	54,08
Djibouti	1,00	1,47	73,40	36,12	66,42	29,69	34,71	35,58	62,63
Egypt	1,00	0,67	7,80	42,16	65,79	50,00	43,80	32,81	54,08
Equatorial Guinea	1,00	0,10	0,00	17,35	84,68	37,50	28,10	41,43	70,92
Eritrea	1,00		83,00	17,15	66,42	79,69	23,14	35,99	62,04
Ethiopia	1,00	0,82	57,70	23,28	66,42	29,69	43,80	32,37	44,44
Gabon	1,00	0,19	0,00	19,94	79,01	60,94	32,23	40,17	65,32
Gambia	1,00	1,33	97,30	38,23	86,37	53,13	57,85	56,59	54,08
Ghana	1,00	0,40	66,20	31,30	73,02	0,00	60,33	32,37	54,08
Guinea	1,00	0,20	14,10	32,46	85,61	59,38	64,46	47,83	60,14
Guinea-Bissau	1,00	0,77	5,90	35,38	88,40	71,88	34,71	58,27	64,85
Kenya	1,00	0,04	68,00	26,10	66,42	62,50	51,24	32,37	54,08
Lesotho	1,00	0,00	0,00	0,00	71,77	54,69	26,45	32,37	61,61
Liberia	1,00	0,10	0,00	24,80	82,47	65,63	59,50	32,37	57,25
Libyan Arab Jam.	1,00	0,69	22,70	63,14	66,42	28,13	40,50	32,37	54,08
Madagascar	1,00	0,20	23,10	35,32	66,42	85,94	73,55	32,37	54,08

[56] In grey, countries not usually classified as Sub-Saharan Africa.

countries	1. Size of sea level	2. Share of flood areas	3. Share of drylands	4a. Trend in temperature	4b. Trend in rainfall	5. Rainfall instability	6. Temperature instability	7.Trend in rainfall instability	8.Trend in temperature instability
Malawi	1,00	0,00	0,00	63,77	74,79	75,00	31,40	41,35	54,08
Mali	1,00	0,00	80,20	47,04	71,09	75,00	49,59	37,70	54,08
Mauritania	1,00	0,69	45,60	46,90	69,56	54,69	42,15	34,12	54,08
Mauritius	1,00		0,00	22,03	66,42	59,38	39,67	32,37	50,51
Mayotte	1,00	0,95	0,00	74,86	87,93	50,00	100,00	0,00	54,08
Morocco	1,00	0,25	92,30	33,22	69,41	42,19	23,97	32,37	54,08
Mozambique	1,00	0,14	37,60	35,35	74,20	81,25	25,62	37,21	54,08
Namibia	1,00	0,07	90,80	75,02	70,04	90,63	69,42	36,57	60,25
Niger	1,00	0,00	62,10	52,60	69,08	64,06	52,07	36,12	43,57
Nigeria	1,00	0,07	58,20	34,42	71,49	46,88	48,76	32,37	61,49
Rwanda	1,00	0,00	0,00	58,01	66,42	40,63	73,55	36,30	80,42
Sao Tome and P.	1,00	0,69	54,90	7,98	81,31	65,63	32,23	60,83	62,77
Senegal	1,00	0,84	94,10	53,66	79,04	53,13	81,82	44,01	59,60
Seychelles	1,00	11,00	0,00	0,00	62,80	67,19	30,58	26,95	54,08
Sierra Leone	1,00	0,35	0,00	42,05	97,36	23,44	93,39	71,95	59,04
Somalia	1,00	0,09	79,90	35,26	66,42	35,94	42,15	34,99	70,31
South Africa	1,00	0,02	66,20	26,45	70,12	46,88	38,84	32,37	54,08
Sudan	1,00	0,02	66,80	63,83	66,42	68,75	61,98	35,71	54,08
Swaziland	1,00	0,00	49,00	49,38	72,61	32,81	34,71	28,71	54,08
Tanzania, Un. Rep.	1,00	0,02		24,37	66,42	73,44	42,15	32,37	54,08
Togo	1,00	0,19	33,60	27,77	72,46	75,00	55,37	26,53	58,91
Tunisia	1,00	1,08	93,70	65,12	68,16	34,38	31,40	32,37	54,08
Uganda	1,00	0,00	16,20	32,37	66,42	46,88	51,24	32,37	64,68
Zambia	1,00	0,00	16,30	46,42	70,74	95,31	66,94	42,63	66,34
Zimbabwe	1,00	0,00	67,30	34,36	71,68	81,25	31,40	38,52	62,07

TAB. A2.3-Aggregated components and overall level of PVCCI for African countries[57] [58]

countries	Risks related to: progressive shocks due to – Sea level rise		Risks related to: progressive shocks due to – Intensification of aridity		Risks related to: intensification of recurrent shocks due to – Rainfall shocks		Risks related to: intensification of recurrent shocks due to – Temperature shocks		Index of the risk of progressive shocks		Index of the risk intensification of recurrent shocks		PVCCI quadratic average	
	Value	Rank/ 155	Value	Rank/ 188	Value	Rank/ 201	Value	Rank/ 201	Value	Rank/ 146	Value	Rank/ 201	Value[59]	Rank/ 147
Algeria	1,46	82	38,68	112	27,70	16	46,87	116	20,07	77	37,29	32	33,40	30
Angola	0,08	44	36,41	104	63,36	196	54,91	158	18,24	64	59,13	192	45,70	110
Benin	2,11	92	68,55	168	52,90	170	51,76	149	35,33	126	52,33	168	50,45	127
Botswana	0,00	1	86,06	187	50,44	159	53,90	156	43,03	140	52,17	167	56,69	140
Burkina Faso	0,00	1	78,47	179	53,20	175	50,18	145	39,23	131	51,69	165	53,63	137
Burundi	0,00	1	33,00	81	49,06	155	78,15	199	16,50	52	63,60	197	49,00	126
Cameroon	0,09	46	29,63	67	53,23	176	48,61	133	14,86	37	50,92	159	38,97	71
Cape Verde	2,76	106	28,01	55	45,60	136	45,63	100	15,38	42	45,61	118	35,19	39
Central African Republic	0,00	1	29,70	68	46,99	143	44,01	76	14,85	36	45,50	117	35,45	42
Chad	0,00	1	62,13	157	24,24	5	46,25	110	31,06	115	35,25	11	40,58	80
Comoros	2,84	109	40,70	119	25,00	7	77,04	197	21,77	83	51,02	160	45,34	106
Congo	0,05	41	22,52	17	46,01	139	47,52	122	11,29	9	46,77	128	34,94	38
Congo, The Dem. Rep. of	0,01	40	25,96	37	45,22	135	58,03	172	12,98	22	51,63	164	39,01	72
Côte d'Ivoire	0,80	63			51,34	163	44,81	86			48,07	135		
Djibouti	5,87	135	62,34	158	32,63	44	48,67	134	34,11	120	40,65	64	42,88	95
Egypt	2,66	103	30,89	73	41,40	112	48,94	137	16,78	54	45,17	112	35,60	44
Equatorial Guinea	0,38	52	25,51	34	39,47	92	49,51	140	12,95	21	44,49	103	34,13	33
Eritrea			62,39	159	57,84	187	42,59	50			50,21	153		
Ethiopia	3,29	119	51,28	139	31,03	30	44,12	78	27,28	100	37,57	34	37,25	61
Gabon	0,76	61	24,74	29	50,55	160	48,77	136	12,75	17	49,66	147	37,24	60
Gambia	5,31	133	79,80	180	54,86	181	55,96	160	42,56	139	55,41	184	55,99	139

[57] In grey, countries not usually classified as Sub-Saharan Africa.

[58]The ranking presented are based on all the countries in the world but are differing according to the index components due to data availability. The number of ranked countries is indicated in the rank column of each component.

[59] The mean value of the PVCCI considering all the countries in the world (147) is 40.76.

countries	Risks related to: progressive shocks due to: Sea level rise		Intensification of aridity		intensification of recurrent shocks due to: Rainfall shocks		Temperature shocks		Index of the risk of progressive shocks		Index of the risk intensification of recurrent shocks		PVCCI quadratic average	
	Value	Rank/ 155	Value	Rank/ 188	Value	Rank/ 201	Value	Rank/ 201	Value	Rank/ 146	Value	Rank/ 201	Value[59]	Rank/ 147
Ghana	1,60	87	59,18	152	16,18	1	57,20	168	30,39	113	36,69	25	41,95	86
Guinea	0,82	65	36,57	105	53,60	178	62,30	177	18,69	66	57,95	191	44,98	104
Guinea-Bissau	3,08	118	33,90	88	65,07	199	49,78	143	18,49	65	57,43	189	44,36	100
Kenya	0,16	48	57,13	150	47,43	145	52,66	152	28,64	107	50,05	151	45,52	109
Lesotho	0,00	1	17,94	4	43,53	120	44,03	77	8,97	2	43,78	94	32,23	23
Liberia	0,42	53	26,82	46	49,00	153	58,38	174	13,62	26	53,69	175	40,40	77
Libyan Arab Jamahiriya	2,74	105	43,74	127	30,25	27	47,29	119	23,24	90	38,77	43	35,61	45
Madagascar	0,78	62	36,99	106	59,15	190	63,82	180	18,89	69	61,48	195	47,28	120
Malawi	0,00	1	34,64	91	58,17	188	42,74	51	17,32	56	50,46	156	40,03	75
Mali	0,00	1	69,63	170	56,35	184	51,83	150	34,82	122	54,09	177	51,74	133
Mauritania	2,77	107	51,92	141	44,41	132	48,11	126	27,34	101	46,26	125	41,80	83
Mauritius			22,11	14	45,87	137	45,09	93			45,48	116		
Mayotte	3,80	123	40,70	119	25,00	7	77,04	197	22,25	85	51,02	160	45,36	107
Morocco	1,00	70	71,81	174	37,28	73	39,02	18	36,40	128	38,15	40	44,92	103
Mozambique	0,54	55	46,19	135	59,23	192	39,85	23	23,37	91	49,54	145	42,51	92
Namibia	0,26	49	81,67	183	63,60	197	64,84	187	40,97	133	64,22	198	61,07	144
Niger	0,00	1	61,47	156	50,09	158	47,82	125	30,73	114	48,95	142	46,30	113
Nigeria	0,29	50	55,58	147	39,62	94	55,12	159	27,93	105	47,37	132	43,87	98
Rwanda	0,00	1	31,11	74	38,46	87	76,99	196	15,55	43	57,73	190	45,75	111
Sao Tome and Principe	2,78	108	49,77	138	63,23	195	47,50	121	26,28	98	55,37	183	46,74	118
Senegal	3,34	121	80,22	182	48,57	152	70,71	191	41,78	137	59,64	193	58,75	142
Seychelles	44,00	147	15,70	1	47,07	144	42,33	47	29,85	109	44,70	106	39,34	73
Sierra Leone	1,39	80	34,85	92	47,70	149	76,22	194	18,12	63	61,96	196	48,22	123
Somalia	0,36	51	65,37	163	35,46	61	56,23	162	32,86	116	45,85	122	46,62	116
South Africa	0,08	43	57,24	151	39,62	94	46,46	112	28,66	108	43,04	89	41,85	84
Sudan	0,08	45	65,96	165	52,23	168	58,03	171	33,02	118	55,13	182	51,10	130
Swaziland	0,00	1	55,00	145	30,76	29	44,39	79	27,50	102	37,58	35	38,54	68

countries	Risks related to: progressive shocks due to: Sea level rise: Value	Sea level rise: Rank/ 155	Intensification of aridity: Value	Intensification of aridity: Rank/ 188	intensification of recurrent shocks due to: Rainfall shocks: Value	Rainfall shocks: Rank/ 201	Temperature shocks: Value	Temperature shocks: Rank/ 201	Index of the risk of progressive shocks: Value	Index of the risk of progressive shocks: Rank/ 146	Index of the risk intensification of recurrent shocks: Value	Index of the risk intensification of recurrent shocks: Rank/ 201	PVCCI quadratic average: Value[59]	PVCCI quadratic average: Rank/ 147
Tanzania, United Rep. of	0,07	42			52,90	170	48,11	126			50,51	157		
Togo	0,75	60	41,86	123	50,77	162	57,14	167	21,30	81	53,95	176	43,57	97
Tunisia	4,33	132	80,17	181	33,37	45	42,74	51	42,25	138	38,06	38	48,44	124
Uganda	0,00	1	32,80	80	39,62	94	57,96	170	16,40	50	48,79	140	38,75	69
Zambia	0,00	1	37,44	108	68,97	200	66,64	188	18,72	67	67,81	201	51,48	131
Zimbabwe	0,00	1	60,16	154	59,88	193	46,74	114	30,08	110	53,31	171	48,45	125

TAB. A2.4-PVCCI arithmetic by group of countries

group of countries	PVCCI				PROGRESSIVE SHOCKS				RECURRENT SHOCKS			
	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation	number of countries	Mean	Median	Standard Deviation
All Developing countries (DCs)	116	35,96	35,81	6,74	116	24,33	21,53	11,60	142	46,72	45,75	7,48
Least Developed Countries (LDCs)	46	37,93	37,38	7,83	46	24,92	18,80	14,22	49	51,03	51,02	7,58
All Developing countries non LDCs	72	34,95	33,61	6,39	72	24,41	22,70	10,87	95	44,56	44,60	6,40
Low and Lower Middle Income countries	84	37,25	36,84	7,16	84	25,53	22,37	13,00	95	48,92	48,92	7,50
Low and LMI countries non LDCs	39	36,22	36,23	6,29	39	25,92	26,22	11,54	47	45,85	45,40	6,42
Small Islands Developing States (SIDS)	29	37	33,16	10,00	29	27	19,42	17,74	31	46	44,86	6,85
SIDS non LDCs	18	35,13	32,15	8,46	18	24,93	18,61	14,70	20	45,04	44,56	4,73
SIDS-LDCs	11	40,29	37,96	11,85	11	31,69	21,77	21,97	11	48,89	49,75	9,37
Landlocked Developing Countries (LLDCs)	27	37,17	36,87	6,22	27	26,98	30,08	11,55	29	47,02	48,79	8,12
LLDCs non LDCs	11	39,43	40,09	4,96	11	35,03	35,33	6,94	13	43,64	42,97	6,41
LLDCs-LDCs	16	35,61	33,52	6,65	16	21,45	16,91	10,91	16	49,76	49,45	8,50
African Developing countries	44	37,76	37,45	5,97	43	24,64	23,37	9,32	47	50,60	50,45	6,87
African LDCs	30	38,11	38,14	5,72	30	23,63	20,09	9,29	32	52,44	52,01	7,14
African Low and LMI countries	37	37,61	37,65	5,49	37	23,84	21,77	8,86	40	51,25	50,97	7,27

PARTIE 2

Evaluer l'impact des chocs pluviométriques sur la sécurité alimentaire

Evaluer l'impact des chocs pluviométriques sur la sécurité alimentaire

En juin 2009, la FAO (Food and Agriculture Organization) annonçait que pour la première fois, le nombre d'individus souffrant de la faim dans le monde dépassait le milliard. Pourtant, la sécurité alimentaire est au cœur des préoccupations internationales depuis plusieurs années. En 2000, lors du Sommet du Millénaire au siège des Nations Unies, le premier des Objectifs du Millénaire pour le Développement (OMD) établi par la communauté internationale est « la réduction de l'extrême pauvreté et de la faim »[60]. L'atteinte de ce but est néanmoins mise à mal par les différentes crises alimentaires et économiques subies par les pays en développement au cours de ces dix dernières années (au Niger en 2005 par exemple) et la crise alimentaire mondiale de 2006-2008 (FAO 2011).

Pourtant, en théorie, pour faire face au risque, les agents économiques peuvent mettre en place différents mécanismes de protection: assurance, épargne, transferts, diversification des cultures. Si le risque est parfaitement assuré, les conséquences du choc sont quasi nulles. Mais, ces processus sont coûteux et l'assurance au sein des ménages pauvres est, en réalité, très partielle de sorte que de nombreux risques ne sont pas assurés totalement (Morduch 1995, Towsend 1995, Christiaensen *et al.* 2007).

Ces chocs non assurés peuvent alors être à l'origine d'une pauvreté transitoire. Pour faire face à un choc, les ménages sont, par exemple, contraints de réduire de façon temporaire leur consommation courante. Cette pauvreté transitoire implique un retour à la « normale » à terme (Lokshin et Ravallion 2000). Cependant, lors de chocs plus sévères, les ménages vulnérables peuvent être forcés de vendre leurs actifs de production comme le bétail, pour compenser la perte de revenu. Dans ce cas, le choc, même s'il est temporaire, affecte négativement les capacités de production du ménage. Il peut avoir un impact chronique, persistant, voire permanent sur les revenus futurs (Rosenzweig et Binswanger 1993, Rosenzweig et Wolpin 1993a, b, Jalan et Ravallion 1998 Morduch 1999, Jalan et Ravallion 2001, Dercon et Christiaenen 2011). Ainsi, les chocs associés à des risques non assurés sont souvent à l'origine du basculement des ménages les plus vulnérables dans des pièges à pauvreté, sièges de cercles vicieux irréversibles (Lokshin et Ravallion 2000, Sarris et Karfakis 2006). Ces cercles vicieux enferment le ménage dans un équilibre de bas niveau, liant pauvreté économique et faible investissement humain se traduisant en particulier par une diminution de l'investissement dans l'éducation (Duryea *et al.* 2007) et une détérioration de la santé (Jacoby et Skoufias 1997). Par exemple, Beegle et ses coauteurs (2006) montrent qu'en Tanzanie, un choc de revenu subi par les ménages tend à favoriser la déscolarisation et le travail des enfants. De Janvry *et al.* (2006) observent également un phénomène de forte persistance voire d'irréversibilité des chocs économiques sur la scolarisation des enfants au Brésil. En analysant les effets de la sécheresse au Brésil, Hodinott et Kinsey (2001) confirment l'impact des chocs de revenu sur la santé des enfants. Or, un mauvais état de santé et/ou une faible éducation de l'enfant ont des conséquences importantes sur sa productivité future et son bien-être à l'âge adulte (Barker 1998). Les répercussions sur le long terme d'un état de santé fragile de l'enfant ne sauraient être sous-estimées (Dercon et Hoddinott 2003, Strauss et Thomas 2008, Ferreira et Schady 2009, Alderman 2011). Les chocs auxquels sont soumis les ménages contribuent donc à la persistance de la pauvreté et d'un état précaire (Morduch 1995).

[60] Plus précisément la cible numéro 3 de cet Objectif est la réduction de moitié, entre 1990 et 2015, de la proportion de la population qui souffre de la faim.

Consciente des conséquences désastreuses à long terme que peut avoir la malnutrition, la communauté internationale et scientifique se consacre largement à la définition des conditions de la sécurité alimentaire. Dans son Rapport sur le Développement dans le Monde paru en 2008 et intitulé « Agriculture for development », la Banque Mondiale réaffirme le rôle de la production agricole dans la sécurité alimentaire. La définition de cette dernière est centrée sur deux caractéristiques essentielles : la disponibilité et l'accessibilité des ressources alimentaires. La production agricole définit en grande partie la disponibilité[61]. L'accessibilité est une notion plus complexe, elle comprend un accès physique, mais aussi économique et social aux denrées alimentaires. Ainsi, le revenu des ménages, les transferts et le prix des denrées alimentaires entrent dans la définition de l'accessibilité. Cette distinction entre disponibilité et accessibilité est le résultat d'une évolution dans l'appréhension des causes des crises alimentaires. Pendant de nombreuses années, les crises alimentaires ont été essentiellement envisagées comme le résultat d'un déficit de l'offre. L'analyse de Sen (1981) introduit une dimension supplémentaire : le manque d'accessibilité des ménages vulnérables aux denrées. Ainsi, l'auteur place le concept microéconomique de vulnérabilité des ménages comme facteur explicatif central des situations de malnutrition: « *starvation is a matter of some people not having enough food to eat, and not a matter of there being not enough food to eat* »[62]. Ces travaux identifient de nouvelles origines possibles des crises alimentaires. De nouvelles causes dues aux faibles capacités des ménages à accéder à l'alimentation sont examinées en plus du problème d'insuffisance de l'offre traditionnellement reconnu. Ainsi, l'analyse change de point de vue : elle passe d'une défaillance de l'offre vers une satisfaction plus générale de la demande. Ces causes couvrent une myriade d'aspects : défaillances des marchés, manque d'accès à l'information, ou au crédit, etc. ; dont l'étude est encore partielle.

Cette partie de la thèse vise à augmenter la littérature existante sur les origines des crises alimentaires (Sen 1981, Ravallion 1985), en s'appuyant sur des données de pluviométrie afin d'approximer la production céréalière. Les chapitres qui suivent visent à comprendre comment deux entités économiques distinctes : les ménages (1) et les marchés (2) réagissent face à un choc de production.

Lorsque la récolte est mauvaise, les ménages font face à un choc de quantité, impactant directement leur revenu. Le quatrième chapitre sera dédié à l'étude de la réaction des ménages ruraux à un choc de revenu. Ces ménages sont parmi les premiers concernés par la malnutrition « 80% des personnes qui ont faim vivent de l'agriculture ou de la pêche » (De Schutter 2010). Ainsi, le chapitre 4 examine les conséquences d'un choc de revenu des ménages ruraux agricoles sur le lissage de leur consommation. Plus particulièrement il s'intéresse aux conséquences d'un tel choc sur la situation nutritionnelle des jeunes enfants au Burkina Faso.

[61] La disponibilité comprend la présence en quantité suffisante et d'une qualité appropriée d'aliments, dont l'approvisionnement est assuré par la production nationale ou les importations (aide alimentaire comprise).
[62] « La famine n'est pas la question de la présence d'assez de nourriture pour manger, mais plutôt celle de l'accès des populations à assez de nourriture pour manger ».

Les écrits de Sen décrivant une offre alimentaire sur les marchés relativement abondante et des prix alimentaires démesurément élevés sont des travaux de référence sur le rôle des défaillances de marchés dans les crises alimentaires (Ravallion 1985). L'objet du chapitre 3 est de montrer qu'une surréaction des marchés céréaliers aux chocs climatiques peut être à l'origine de flambées des prix déconnectés de leur valeur fondamentale. À partir de séries de prix des céréales du Niger, nous montrons que la présence de bulle spéculative rationnelle sur les marchés peut expliquer ces hausses de prix spectaculaires. Après avoir utilisé les données pluviométriques comme facteur explicatif de la valeur fondamentale des prix, ce chapitre s'attache à détecter les propriétés statistiques des écarts de prix par rapport à leur valeur fondamentale. Dans cette étude, il ressort que les marchés surréagissent à des chocs climatiques entraînant des hausses de prix importantes, déconnectées des chocs de quantités.

Chapitre 3

Impact des chocs climatiques sur la santé des enfants au Burkina Faso

Impact of climate related shocks on child's health in Burkina Faso[*]

Résumé

Le but de ce chapitre est d'estimer l'impact des chocs de revenus sur la santé des enfants dans les ménages ruraux du Burkina-Faso. Les ménages burkinabés pratiquent majoritairement une agriculture pluviale fortement dépendante des conditions climatiques. Le travail associe des données de santé issues d'une enquête ménage réalisée 2008 avec des données météorologiques. Nous identifions un âge critique auquel l'enfant est particulièrement vulnérable, en comparant l'impact marginal de chocs pluviométrique connus à différents âges. Nous observons également un impact différent des chocs sur les filles et les garçons qui pourrait refléter un éventuel biais de genre dans l'allocation des ressources au sein du ménage. Afin d'estimer la capacité des ménages à lisser leur consommation nous testons d'une part l'effet asymétrique des chocs de pluie selon leur ampleur et d'autre part l'impact relatif des chocs selon les dotations des ménages. Les résultats montrent une forte relation entre les chocs pluviométriques connus durant la période prénatale ou la première année de vie de l'enfant et son état de santé. Les ménages ne semblent pas capables de se prémunir contre l'effet de ces chocs même lorsqu'ils sont de faible ampleur. De façon plus inattendue les filles apparaissent moins affectées que les garçons. Les résultats sont renforcés par des estimations en double-différences et en *sibling*, ainsi qu'avec des régressions placebo.

[*] Ce chapitre est une version d'un article coécrit avec C. Araujo-Bonjean et S.Brunelin.

3.1. Introduction

Burkina Faso is a low income and a landlocked country located in the Sahel part of West Africa and ranging among "agricultural-based countries" (World Bank, 2008). Indeed, agriculture is the major source of growth, accounting for about a third of GDP growth. Most of the poor live in rural areas (70%).

Like in many other developing countries, rural households who depend on agricultural activity for subsistence face large income fluctuations originating from weather shocks. In the absence of a formal insurance market, households can hardly protect themselves against these shocks. As evidenced by a large literature, informal risk mitigating and risk coping strategies set up by farmers only afford a partial protection against income risk (Deaton 1992, Morduch 1995, Townsend 1995, Alderman and Haque 2007). Income diversification is a source of inefficiency while savings, credit and informal safety nets cannot protect against large or covariate shocks. As a consequence, income risk translates into consumption fluctuations.

Uninsured risk may have dramatic consequences on household welfare in the short and long run. Households may be forced to reduce their current consumption, including health and schooling expenditures, as well as investment in their farm. In the most severe cases, agricultural households are forced to sell productive assets such as cattle to compensate for income loss. By negatively affecting the productive capacity of the household, a temporary income shock may have a persistent impact on future income (Rosenzweig and Binswanger, 1993; Rosenzweig and Wolpin, 1993, Morduch 1995, 1999). Uninsured risk is therefore widely considered a cause of chronic poverty (Jalan and Ravallion 2000, Lokshin and Ravallion 2000, Dercon 2004, Dercon and Christiaenen 2011).

The empirical literature has paid a particular attention to the consequences of uninsured risk on investments in human capital. Numerous studies have shown that negative income shocks lead to lower investment in child health and education. Jacoby and Skoufias (1997) showed that income fluctuations in India have a negative impact on children's education. Foster (1995) concludes that the impact of flooding on child's weight in Bangladesh depends on credit market failures. Other studies drawing on Barker's works (1998) have shown that deprivation experienced in infancy and early childhood has long-run consequences on adult future welfare. According to Barker's "foetal origin hypothesis", individuals who have suffered from nutritional deprivation in utero or from stunting and underweight during their first couple of years of life have poorer performance at school, a lower income level, a lower social status and a lower life expectancy (see for instance, Dercon and Hoddinott 2003, Strauss and Thomas 2008, Ferreira and Schady 2009, Alderman 2011).

Most authors agree to recognize that young children are vulnerable to economic shocks but empirical studies diverge as to the critical period of life during which a shock has irreversible effects. This critical period can be the foetal period (Barker, 1998), the first six months of life (Dobbing 1976), the 6 to 24 months period (Martorell and Habicht, 1986 and Martorell *et al.* 1994) or more generally the post weaning period until age 24-36 months (e.g. Alderman *et al.* 2001, Hoddinott and Kinsey 2001, Alderman *et al.* 2001, 2006). As a general rule, nutritionists consider that stunting in the first two years of life cannot be offset later so that the size at three years is a good indicator of the size in adulthood (Martorell 1995, 1997, 1999).

To identify the impact of economic shocks occurring during childhood on adult health outcomes, recent studies exploit naturally random events such as pandemics or violent conflicts (e.g. Alderman *et al.* 2006, Almond 2006, Banerjee *et al.* 2007, Akresh *et al.* 2009, 2010, Gorgens *et al.* 2012). A few studies aim at assessing the impact of climate shocks on health by exploiting the spatial and temporal heterogeneity of these exogenous shocks. Among this natural experiment literature, Maccini and Yang (2009) working on Indonesia, evidenced a strong relationship between birth year rainfall and adult height, suggesting that nutrition in infancy varies with early-life rainfall. Jensen (2000) shows that children living in regions of Cote d'Ivoire that experienced an adverse weather shock invest less in their children's education and health. Alderman and al. (2006) established a causal relationship between child and adult height and schooling by exploiting exogenous events such as the civil war and droughts in Zimbabwe. Gajigo and Schwab (2012) contribute to the debate on the ability of households to offset income shocks by showing how seasonal variations in child health relate to seasonal fluctuations in agricultural income and maternal nutrition in Gambia. Other authors who question the impact of the climate change, such as Skoufias and Vinha (2012), find indirect evidence of a causal relationship between climate variability, agricultural income and child height in rural Mexico.

Drawing on this literature, the main objective of the chapter is to explore the consequences of weather shocks on child's health in rural Burkina Faso. A special attention is paid to the time path of shocks which is generally not clearly taken into account in the empirical literature. Weather shocks translate into an income and nutritional shocks with a delay that depends on the crop calendar. With the high degree of precision of the survey data, we are able to accurately characterize the nutritional conditions prevailing during the first months of the child's life. We thus carefully design the shocks calendar and conduct an in-depth analysis of households' response to weather shocks. To this extend, this work contributes to the literature on economics of risk and insurance, health economics and gender issues by providing valuable information on the household's behaviour in a risky environment, the determinant of child's heath, intra-household resource allocation, and the factors affecting resiliency.

Health data is drawn from a nationally representative survey conducted in June, 2008. Those data are combined with rainfall data produced by the meteorological office of Burkina Faso, used to define rainfall shocks at the child level. We first estimate the marginal effect of rainfall at various ages on the child's health in order to identify the critical period in the child life during which deprivation has the most severe consequences. Then we look for a different impact of shocks on girls' and boys' health that would reflect a gender bias in intra household resource allocation. We also assess the household ability to smooth consumption by testing for an asymmetric effect of rainfall shocks according to their size and identify more resilient households by testing the impact of shocks relative to household endowments.

Results show the importance of weather conditions on child nutritional status. Rainfall in the prenatal period is positively correlated with height-for-age z-score of children under five while rainfall in the first and second year of life does not have any significant effect. More surprisingly, boys appear to be more vulnerable than girls to weather fluctuations. Children living in better-off households with access to safe water are less impacted by negative rainfall shocks. However, households usually not able to compensate for even small negative shocks. Results are robust to different specifications of the test equation, in particular to the introduction of maternal fixed effects that control for genetic and socioeconomic factors

specific to the child. A causal relationship between rainfall shocks and child stunting can be established by exploiting the spatial variability of rainfall during the 2006 climatic year and the heterogeneity in the time of birth. Robustness tests, including placebo regressions, confirm our results.

The remainder of the chapter is organised as follows. The second part provides information on the relationships between climate and nutrition in Burkina Faso. The third part provides descriptive statistics for child health and rainfall. Part 3.4 describes the conceptual and empirical framework. Part 3.5 exposes the main econometric results and Part 3.6 details various robustness tests. Part 3.7 concludes.

3.2. The relationships between climate and nutrition in Burkina Faso

Rainfed agriculture is the dominant production system for food and cash crops with the result that food production, farm income and health environment are highly dependent on weather conditions.

3.2.1. Climate and agricultural cycle

The inter-tropical climate of Burkina Faso defines two seasons which determine the crop calendar and the agricultural year. The wet season runs from May to October and the dry season runs from November to May. The agricultural year runs from September to August. Planting typically takes place from May to July at the beginning of the rainy season. The main harvest occurs from September to December. A second harvest of lesser importance, the "off-season harvest", takes place from January to March (Figure 3.1).

In this tropical country, agricultural production is highly dependent on the rainfall level as well as on the distribution of rainfall during the rainy season. The occurrence of dry spells during the rainy season and a delayed onset of the rainy season negatively affect crop yields (Sultan *et al.* 2005). Precipitations being the main determinant of the agricultural production in Burkina Faso, we will consider rainfall as the main indicator of weather conditions.

Rainfall is the main element determining agro-ecological zones. It explains both the agricultural land use intensity and the farming specialisation in different crops and livestock. The northern part of the country, namely the regions of Nord, Centre-Nord, and Sahel, is characterized by a shorter growing season, higher rainfall variability, and a less diversified agriculture. Millet, the main local food crop, is predominant in the dry north because of its nature of low water consuming crop. Crops mixes are more diversified in the South considering the greater flexibility offered by a more generous climate and soils. Cash crops are commonly cultivated in the south. Cotton, the main cash crop is mainly produced in the Hauts Bassins region and in the neighbouring regions, where climatic conditions are favourable. Cattle's breeding is more developed in the north.

3.2.2. From weather shocks to child heath

Climate shocks can lead to increased malnutrition through two main channels: the development of weather related diseases and an insufficient food intake resulting from reduced agricultural income (e.g. Skoufias and Vinha 2012).

Weather has a direct and immediate impact on health by conditioning the development and propagation of vector borne and waterborne diseases (e.g. McMichael *et al.* 2006, Githeko 2007). The prevalence of some parasitic and infectious diseases such as such as malaria and cholera expands during the rainy season. By contrast, respiratory illnesses are more widespread during the dry season. As a consequence, there are seasonal fluctuations in morbidity and its causes correlated with weather conditions. In turn, infectious diseases affect human's ability to absorb nutrients, leading to under-nutrition. In particular, repeated exposure to diarrheal infections may have dramatic consequences on the motor and cognitive development of the child.

Climate has also lagged effects on the nutritional status of children through its impact on the future harvest and the farm income. First, a rainfall shock has a direct impact on the "production-based entitlement" of households who cultivate food crops (Sen 1981). A rainfall deficit may entail a decrease in food production and food intake of the household's members. In turn, babies whose mothers suffered from malnutrition during pregnancy or lactation period will exhibit poor growth rate and lower weight. Poor nutrition provided during early childhood has also adverse health effects on weaned children.

Second, a rainfall shock translates into an income shock which in turns affects the living standards of the household. However, the relationship between rainfall and income may be ambiguous. Farmers' income is generally assumed to be positively related to the rainfall level. This is the case when the crop affected by the rainfall shock is a tradable good which price is given by the international market. In Burkina Faso, a negative (positive) rainfall shock will generate a decrease (increase) in the income of cotton and rice producers the main exported and imported crops.

By contrast, the correlation between rainfall and income may be weak for non tradable goods. A rainfall shock may result in an inverse variation of the price of local goods that dampens the impact of the shock on farmers' income. Millet and sorghum which are the main staple diet of rural populations are not traded on international markets. Their prices fluctuate according to domestic supply and demand conditions. In case of a negative rainfall shock, net sellers of grains may therefore benefit from the price increase if it compensates for their production loss. Conversely, a positive rainfall shock will have a limited positive impact on farmers' income due to the price effect.

Most studies have shown that grain markets within the sub-region are spatially integrated (Araujo *et al.* 2012). Trade flows should therefore prevent large local price variations in response to local production shocks. As a consequence, the compensating effect of price variations on income should be of little importance when rainfall shocks are spatially limited. In case of a widespread drought, surplus farmers benefiting from the price increase should be very few. The income of the vast majority of farmers is expected to be negatively affected by the rainfall deficit and consumers negatively affected by the price increase. We thus consider in this chapter that a rainfall deficit has a negative impact on households' income which in turn undermines access to food and health care.

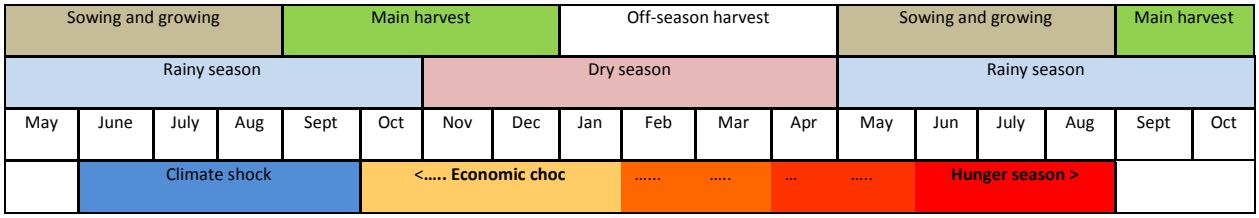
3.2.3. The time path of climate shocks

While the impact of a climate shock on the prevalence of diseases may be immediate, its impact on food availability, income and nutrition occurs with a delay and last over several months in relation with the agricultural calendar.

Generally, farmers sell part of their grain at the time of the harvest (*i.e.* during September to December) to meet their financial needs. The rest of the harvest, intended for family consumption and seed production, is stored on the farm until the next harvest or beyond.

The amount of grain stored depends directly on the production level which itself is conditioned by the rainfall distribution during the rainy season. Insufficient precipitations result in a poor harvest, low stocks and a food shortage during the period preceding the next harvest which occurs 12 months later. The situation is most critical during the lean season[64] *i.e.* the period which precedes the new harvest and during which farmers' stocks are depleted (Araujo *et al.* 2012). The length of the lean season varies across years, regions and households according to the importance of households' stocks as well as their non-agricultural income but generally runs from June to August (see Figure 3.1).

FIG. 3.1-The crop calendar



Source: The authors

In this chapter, we consider that a rainfall shock translates into an income and nutrition shock with a delay varying from 1 to 12 months. Therefore, a rainfall shock not only affect children alive during the shock but also children born within a year after the shock. In the case of a deficit rainy season, children are at risk of under nutrition during the following twelve months. Therefore, a rainfall deficit occurring during the 2004 rainy season – June to September 2004 – will affect the nutritional status of children alive during the shock period as well as the children born during the following crop year running from September 2004 to August 2005.

It is very important to take this delay into account in order to measure with precision the impact of a climate shock on child health and to identify the critical period of life during which children are more vulnerable to deprivations.

[64] also referred to as the hunger season.

3.3. Data

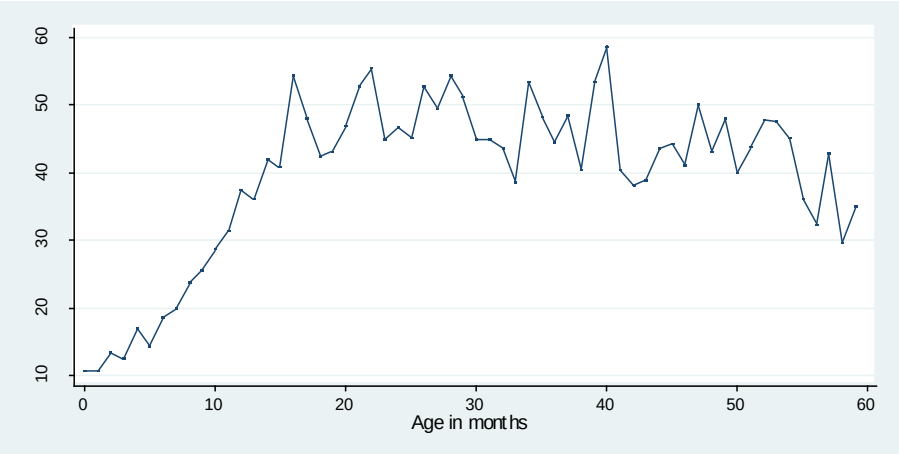
3.3.1. Child heath

Data on children's nutritional status are drawn from the ENIAM survey conducted in June and July 2008. This survey covers the whole country and is representative at the regional level. Anthropometric data - weight, height and arm circumference - were collected on 15.669 children below 60 months. We restrict our analysis to children living in rural areas as the main impact of rainfall shocks is likely to be felt by households involved in rural activities. Our sample is made up with 12.571 children living in 273 municipalities located in 45 provinces (see on Figure 3.4 the location of the 273 municipalities represented by black dots).

To measure child health, we focus on the height-for-age indicator that measures long-term nutritional status. The height-for-age indicator is preferred to the weight-for-age indicator which mainly reflects short-term scarcities or illness episodes experienced by children shortly before the survey. In contrast, height-for-age is associated with chronic malnutrition also referred to as stunting. This is a stock variable reflecting current and past health investments (Martorell and Habicht 1986, Linnemayr *et al.* 2008).

The height-for-age indicator is expressed as z-scores (*haz*). Z-score is given by the difference between the child's height-for-age and the median height-for-age for the same aged reference population divided by the standard deviation of the reference population. The z-scores have been calculated using the ANTHRO 2005 software program and the 2005 World Health Organization reference.

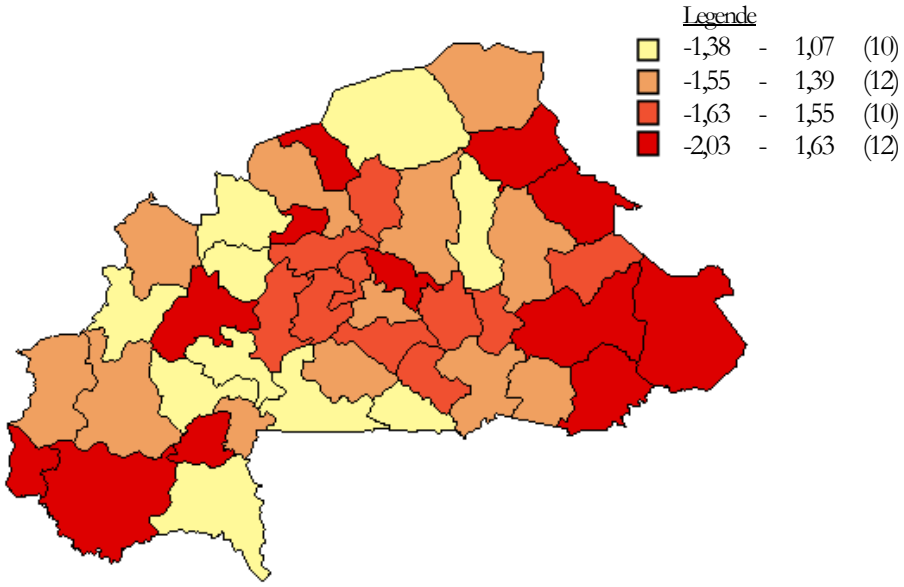
FIG. 3.2-Prevalence of moderate stunting (*haz* < -2) by age in months



Source: The authors based on the ENIAM database

Burkina Faso experiences high rates of malnutrition chronically. The average height for age z-score is 1.53 (see Table A3.2 in the appendix). 39% of children can be considered stunted (with a *haz* below - 2), and 16.3% of children are severely stunted (with a *haz* below - 3).

FIG. 3.3-Average height-for-age z-scores by province and quartiles



Source: The authors' calculation based on the ENIAM database

Chronic malnutrition increases rapidly during the first year of life (Figure 3.2). The prevalence of moderate stunting is on average 14% in the first 6 months. It increases to 28% between 6 to 12 months and reaches approximately 40% after 12 months of life. Prevalence of moderate stunting remains at a high level, between 30 to 60%, until 5 years old. Malnutrition exhibits great regional heterogeneity (Figure 3.3). Chronic malnutrition appears to be more severe in the East and the South West parts of Burkina Faso. The regions with the highest rate of moderate stunting are the Cascades (46.5%) and the East (42.5%) whereas the rate of chronic malnutrition is about 31% in the Centre.

3.3.2. Rainfall data

Our data set includes decadal rainfall data originating from 138 weather stations distributed throughout Burkina Faso and covers the 1995-2008 period. We follow a four-step methodology developed by Maccini and Yang (2009) to calculate a rainfall variable at the child level.

First, we calculate a decadal rainfall index for each municipality represented in the household survey. For each decade, each municipality is matched to the closest weather station. In case of missing data, the rainfall data of the second closest station are used. As a consequence, the rainfall index for a given municipality may come from varying weather stations. On average the distance between the municipality centroid and the closest informed weather station is 15.6 km[65]. Only 5% of the municipalities in the sample are distant of more than 40 km. The median of the mean distance is 12.7 km (see Table 3.1).

[65] Two municipalities whose distance to the closest informed weather station was greater than 100 km have been dropped from the sample.

For 40.5 % of the municipalities, the rainfall indicator has been computed using data from only one station; for 48.5% of the municipalities, data come from two stations and for 10.1% of the municipalities data come from three stations. Only one municipality (Bagré) uses rainfall data originating from 5 different stations[66]. On average, slightly less than two weather stations (1.92) are used to compute the municipality rainfall indicator. Therefore, we can confidently say that the municipality rainfall index mostly reflects the precipitation level measured at the closest weather station.

TAB. 3.1-Distance between the municipality centroid and reference weather stations (km)

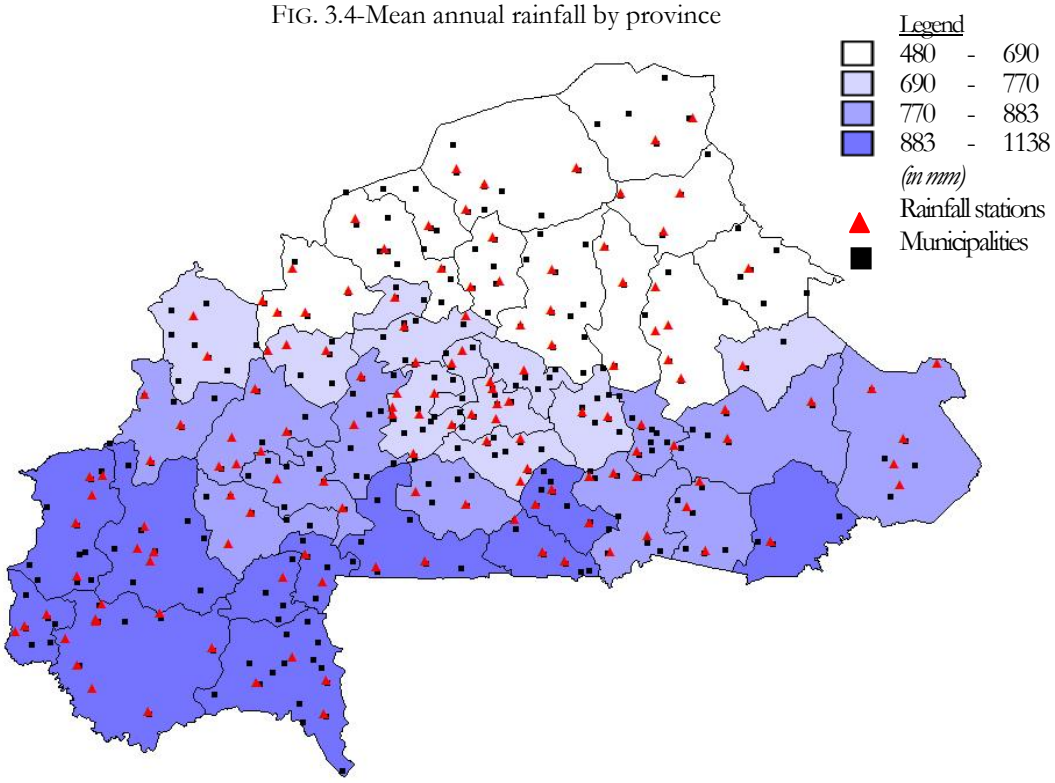
	1st station	2nd station	3rd station	4th station	5th station	Mean	Min	Max
mean	14.3	33.4	37.1	37.8	41.39	15.6	0.4	60.1
max	59.1	96.2	64.1	37.8	41.39	35.2	0.5	96.2
min	0	1.5	21.9	37.8	41.39	13.4	0	59.8

Second, an annual rainfall index is calculated by municipality. This index is set equal to the cumulated rainfall level during the crop growing season that runs from June 1st to September 30th. Figure 3.4 shows the mean rainfall index aggregated at the province level calculated over the period 2003-2008[67]. This map illustrates the important discrepancies in the average rainfall that ranges from 400mm in the North to 1200 mm in the south of Comoé. The annual rainfall level is higher in the South West region. The North-East provinces (Oudalan, Seno, Yagha) features a low level and a large variability of precipitations, two phenomena that are common to Sahelian areas.

[66] The 4th and 5th stations are respectively 37.8 and 41km away from this municipality. Estimations have been conducted with and without the Bagre municipality which includes only 37 children. Results are not significantly affected.

[67] This period corresponds to the date of birth of the children in the sample.

FIG. 3.4-Mean annual rainfall by province



Source: The authors

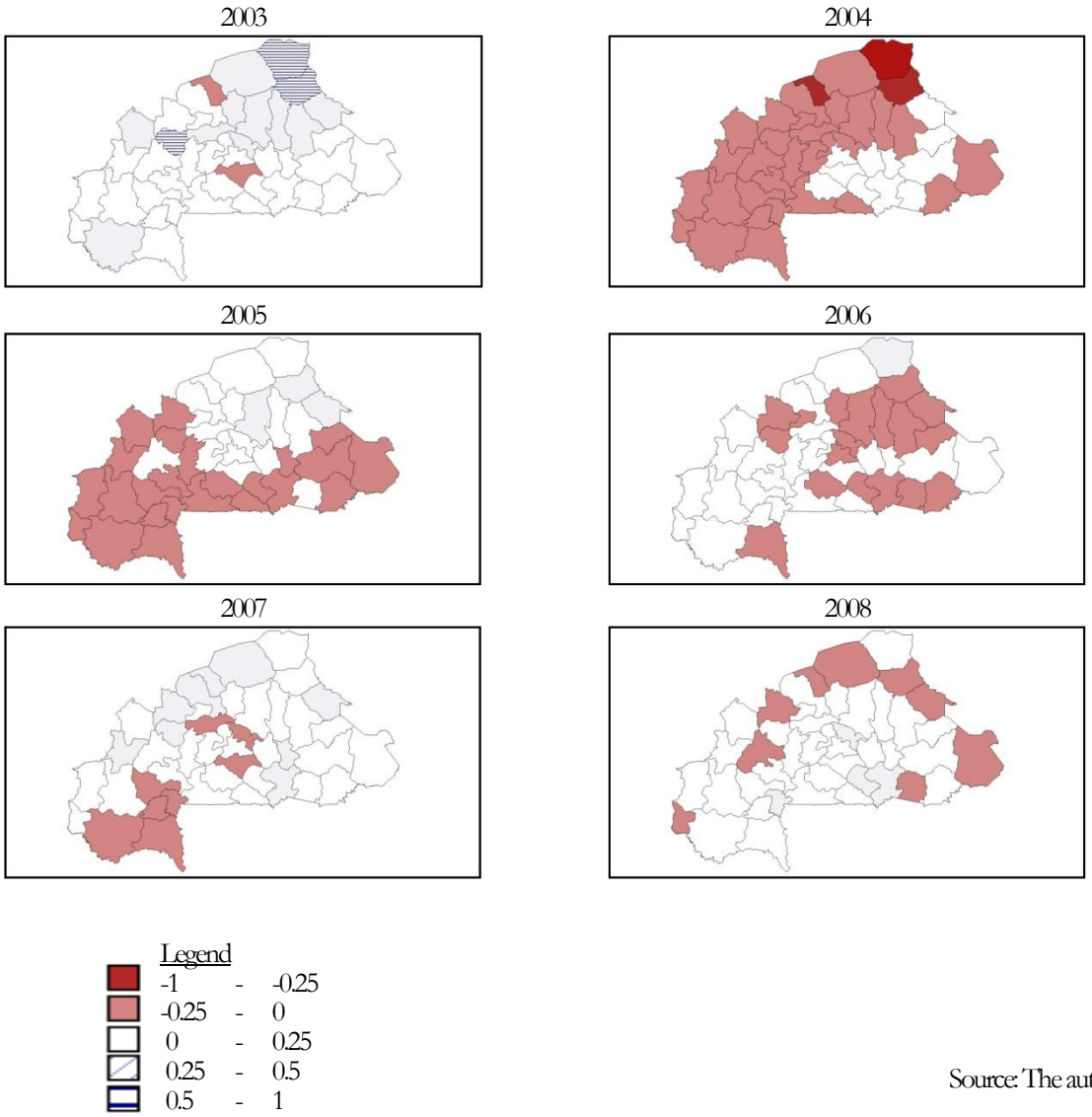
Third, annual rainfall shocks are calculated as the cumulated rainfall deviation from the norm of the municipality which is calculated annually. Norm at year *t* is given by the mean rainfall over the 1995-2008 period excluding year *t*. Shocks are expressed in terms of percentage of the norm[68].

Figure 3.5 displays the rainfall shocks aggregated at the province level. Blue areas correspond to positive shocks (positive rainfall deviation over the long term mean), while red areas represent negative shocks. 2003 was a good year in terms of rainfall while 2004 marked the most severe drought in the period.

Fourth, we use the date and place of birth reported in the database, to define a rainfall shock variable at the child level. Shocks are calculated at different ages. In what follow, we focus on rainfall shocks in prenatal period which are given by the rainfall shock registered in the rainy season of year $_t$ in the municipality of birth of a child born after the shock, between September $_t$ and August $_{t+1}$. This variable is calculated for each child born between January 2003 and July 2008. It captures the child's exposure to a nutritional deficiency while in utero and during the first months of life.

[68] Rainfall shock at year t is given by: $S_t = \frac{R_t - \bar{R}}{\bar{R}}$ with $\bar{R} = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n} R_t$ for i ≠ t.

FIG. 3.5-Rainfall Shocks by province and year[69]



Source: The authors

3.4. Conceptual and empirical framework

The conceptual framework for the empirical approach is a static model for child health demand originating to Becker's work on time allocation within the household (Becker 1965, 1981). Following a well-established literature (see for instance Sahn and Alderman 1997, Hoddinott and Kinsey 2001, Behrman and Skoufias 2004, Linnemayr *et al.* 2008), we consider that household utility depends on child health H, consumption of goods C, leisure L, and is affected by household characteristics X_h. The utility function of households can be written as:

$$U = U(H, L, C, X_h) \quad (1)$$

[69] Data by province are calculated as the average value of the municipality shocks.

Households are assumed to maximise utility under two constraints namely the health production function and the budget constraint.

The production function of child health is given by:

$$H = F(N, X_c, X_h, X_v, \mu) \quad (2)$$

N are health inputs including nutrient intake, health care practices and time spent by parents taking care of children, among others; X_c are child characteristics such as age and gender; X_v refers to environmental factors that are assumed to influence health, and μ captures unobserved characteristics of the child, parents, household and the community that affect child's health.

The household faces a full income constraint given by:

$$P_c C + wL + P_n N = FI \quad (3)$$

P_c, w, and P_n are the price vectors of consumption goods, leisure and health inputs. The full income, *FI*, is given by the value of the time endowment of the household and non-labour income.

Maximisation of (1) subject to (2) and (3) yields the reduced form demand equation for child health that takes the form:

$$H = \Phi(P_c, P_n, w, FI, X_c, X_h, X_v, \mu) \quad (4)$$

Full income is an exogenous variable that does not depend on the allocation of time by the household members, while the wage rate is given in the labour market. Consequently, reduced form demand equation (4) can be estimated by OLS since all right-hand side variables are exogenous (Kassouf and Senauer 1996).

For agricultural households, the full income includes the farm profit (π), the value of the time endowment (*E*) of the household and non-labour income (*Tr*):

$$FI = \pi + wE + Tr \quad (5)$$

Unfortunately, our data set does not include income or expenditure data. So we cannot directly test the impact of income fluctuations of child health. Following Jensen (2000), we introduce rainfall shocks in the health demand equations assuming that rainfall shocks influence the level of household income.

The estimated health demand equation is given by (6):

$$H = \gamma T + \boldsymbol{\beta}_c . X_c + \boldsymbol{\beta}_M . X_M + \boldsymbol{\beta}_H . X_H + \boldsymbol{\beta}_V . X_V + \varepsilon \quad (6)$$

H is the height-for-age z-score (*haz*).

T is the rainfall shock variable. We consider successively rainfall shocks in the prenatal period (T_0), in the first year (T_1) and in the second year of life (T_2). Children are aged [in utero – 12 months], [2 to 24 months] and [14 to 36 months] during the economic shock that follows a rainfall shock in the prenatal period, in the first year and in the second year of life, respectively.

X_C is a vector of child characteristics including: age in months, sex and being a twin.
X_M is a vector of maternal characteristics including: age, education, mother's body mass index.
X_H is a vector of household characteristics including: the household size, a household wealth index, the age and education level of the head of household.
X_v is a vector of municipality dummies.

ε is a stochastic term including unobserved characteristics of the child ε_C, her mother ε_M, the household ε_H and unobserved random shocks ν.

$\boldsymbol{\beta}_C$, $\boldsymbol{\beta}_M$, $\boldsymbol{\beta}_H$, $\boldsymbol{\beta}_V$ are vectors of parameters to be estimated along with the parameter γ.

γ measures the impact of a rainfall shock in the considered year (t, t+1 or t+2) on the nutritional status of birth cohorts [$Sept_t$ – Aug_{t+1}].

3.5. Main results

We first estimate the impact of a rainfall shock in the prenatal period and first years of life. In a second stage, we look for gender and asymmetric effects of shocks according to their sign and size. Lastly, we test for the ability of households to cope with shocks by introducing cross variables in the test equation.

3.5.1. Impact of rainfall shocks in prenatal period

Table 3.2 reports the estimation results of equation (6). They show the positive impact of a rainfall shock in the rainy season preceding the child birth on her nutritional status. The height for age z-score of children under five increases by 0.442 when rainfall in the prenatal period is one percent higher than normal. These children are aged [in utero – 12 months] during the economic shock period that follows the rainfall shock.

Results also give several interesting insights on the determinants of malnutrition. Boys are systematically more stunted than girls; this finding is consistent with other studies conducted in Africa (e.g. Svedberg 1990, Marcoux 2002, Wamani and al 2007). The child's standardized height deteriorates with age; it is a common finding that chronic malnutrition increases rapidly during the first years of life. Twins have a higher risk of being stunted while children with older mother have a lower risk. The Body Mass Index (BMI) of the mother which offers a simple measure of short-run health appears to be a significant determinant of children's nutritional status. Finally, the education (both primary and secondary) of the mother has a positive impact on child nutritional status. In contrast, only secondary schooling of the household head (98.7% of the head of households are male) is positively and significantly associated with height-for-age. The age of the household head does not appear to be a significant determinant of children's nutritional status. Regarding the households characteristics, the household size is negatively

correlated with height-for-age z-scores but non-significant. The wealth index (based on a principal component analysis, see Appendix A3.1) enters positively and significantly.

TAB. 3.2-Estimation results with child, mother and household's characteristics

Dependent variable : Children's Height for age z-score	
Rainfall shock in birth year	0.442***
	(0.090)
Sexe (1 = male)	-0.264***
	(0.028)
Age (in months)	-0.024***
	(0.001)
Household size	-0.003
	(0.003)
Twin	-0.510***
	(0.125)
Mother's age	0.040***
	(0.013)
Mother's age^2	-0.0005**
	(0.000)
Body Mass Index of the mother	0.042***
	(0.007)
Mother's literacy	0.084
	(0.060)
Mother's primary education	0.163**
	(0.071)
Mother's secondary/higher education	0.274*
	(0.146)
Mother's other education	0.239
	(0.213)
Age of the household head	0.002
	(0.001)
Household head literacy	0.036
	(0.055)
Household head primary education	0.018
	(0.055)
Household head secondary/higher education	0.186*
	(0.097)
Household head other education	-0.113
	(0.094)
Wealth index	0.038*
	(0.019)
Observations	12,572
R-squared	0.124

Absolute value of standard errors in parentheses.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significant at 1% level of confidence.*
The estimation includes municipality dummies. The standard errors are corrected for clustering at the municipality level.

The positive impact of rainfall shocks in prenatal period on child health is robust to controlling for the introduction of various time trend specifications: a municipality-year of birth specific time trend as well as a municipality-month of birth specific time trend (Table 3.3). These cross variables capture the temporal variation in the outcome variable that is specific to each municipality and date of birth.

Results are also robust to controlling for household fixed effects or for maternal fixed effects (sibling estimators). The household (maternal) fixed effect regressions control for all observable and unobservable household (maternal) characteristics that are constant across siblings such as biological and socioeconomic factors. The impact of rainfall shocks on child height for age z-score is higher (0.536 to 0.601) when using the sibling estimator. This means that children without brothers and sisters are less impacted compared to those with siblings. We can make this assertion based on the fact that household (or maternal) fixed effect regressions exclude households with only one child[70]. A possible interpretation is that only those children whose parents invest more in their health are protected from external fluctuations.

TAB. 3.3-Impact of a rainfall shock in the child's birth year

Dependent variable : Children's Height for age z-score					
	OLS	OLS with trend	OLS with trend	Household FE	Mother FE
Rainfall shock in prenatal period (T_0) [in utero - 12 months]	0.442*** (0.0904)	0.466*** (0.088)	0.444*** (0.0876)	0.536*** (0.108)	0.601*** (0.148)
Child characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Mother characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes	No
Household characteristics	Yes	Yes	Yes	No	No
Municipality fixed effects	Yes	No	No	No	No
Year of birth - municipality trend	No	Yes	No	No	No
Month of birth-municipality trend	No	No	Yes	No	No
Observations	12,572	12,571	12,571	9,769	6 262
R-squared	0.124	0.123	0.122	0.098	0.114

The children age during the 12 months following the rainfall shock (i.e. the economic shock period) in brackets
Robust standard errors are in parentheses. Standard errors are corrected for clustering at the municipality level.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significant at 1% level of confidence.*

3.5.2. The critical period of life

To identify the critical period during which an economic shock has the most severe impact on the child's health, we test the impact of a rainfall shock in the first and second year of life. The children are aged, [2 to 24 months] and [14 to 36 months], respectively during the economic shock period that follows the rainfall shock. Results are given in Table 3.4. They show that rainfall shocks occurring in the first and second year of life do not have any significant impact on the child long term nutritional status.

[70] The sibling dataset reduces to 6,262 children when restricting the sample to children with at least one sibling under five years (table 3.3).

TAB. 3.4-Impact of a rainfall shock at first and second year of life

Dependent variable : Height for age z-score								
	OLS	OLS with trend	OLS with trend	Mother FE	OLS	OLS with trend	OLS with trend	Mother FE
Rainfall shock in 1st year (T1) [2 - 24 months]	0.001 (0.113)	-0.016 (0.112)	-0.024 (0.113)	0.157 (0.204)				
Rainfall shock in 2nd year (T2) [14 - 36 months]					0.153 (0.109)	0.127 (0.110)	0.094 (0.110)	0.492 (0.356)
Municipality fixed effects	Yes	No	No	No	Yes	No	No	No
Year of birth - municipality trend	No	Yes	No	No	No	Yes	No	No
Month of birth-municipality trend	No	No	Yes	No	No	No	Yes	No
Observations	10164	10164	10164	4,869	7370	7370	7370	3,659
R-squared	0.080	0.080	0.075	0.012	0.095	0.098	0.093	0.071

In brackets the children age at the time of the economic shock that follows the rainfall shock.
Robust standard errors are in parentheses. The standard errors are corrected for clustering at the municipality level.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significance at 1% level of confidence.*
All regressions include child, mother and household characteristics.

We thus conclude that children are more vulnerable to a weather related shock during their in utero life and the first months of their early life. During this period, the vast majority of children are breastfed (91% of the mothers in the sample declare to have breastfed their children), weaning generally occurring between 18 and 24 months.

These results are in line with a large medical and economic literature showing a strong relationship between maternal nutrition, foetal growth and after birth weight and size (see for instance Gajigo and Schwab 2012). They confirm that the nutrition of mothers during pregnancy and breastfeeding play a critical role.

3.5.3. Gender effect

Table 3.5 shows that the impact of a rainfall shock is significantly lower for girls. Girls do not benefit as much as boys from an increase in income following a good harvest but they are less affected by a negative shock. This result supports the idea that there is no intra-household gender discrimination detrimental to girls in Burkina Faso. In contrast, boys appear to be more sensitive to the quality and quantity of nutrition during the foetal and lactation periods than girls.

TAB. 3.5-Impact of a rainfall shock in the child's birth year by gender

Dependent variable: Height for age z-score				
	(1)	(2)	(3)	(4)
Rainfall shock in prenatal period (T_0)	0.442***	0.565***	0.583***	0.548***
	(0.0902)	(0.110)	(0.111)	(0.111)
T_0 * Girls		-0.256**	-0.235*	-0.209
		(0.126)	(0.130)	(0.130)
Child characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes
Mother characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes
Household characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes
Municipality fixed effects	Yes	Yes	No	No
Year of birth - municipality trend	No	No	Yes	No
Month of birth-municipality trend	No	No	No	Yes
Observations	12572	12572	12,572	12,572
R-squared	0.124	0.124	0.123	0.122

*Robust standard errors are in parentheses. Standard errors are corrected for clustering at the municipality level. * indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significance at 1% level of confidence.*

The greater vulnerability of boys to climatic shocks during their first year may be due to biological factors. It is a common finding that boys under 5 years are structurally less healthy than girls in Africa. In poor health environments, the male to female sex ratio at birth tend to decrease and the rate of mortality of boys to increase relative to girls (Garenne 2002). More generally, there is some medical evidence that human males are more fragile than females (Kraemer 2000).

3.5.3. An asymmetric impact of rainfall shocks

An interesting feature emerges when studying the asymmetric impact of rainfall shocks according to their magnitude and sign (Table 3.6). We distinguish large positive and negative shocks from small positive and negative shocks. Large shocks are above one standard deviation. Small shocks are above a percentage α of the standard deviation. The reference category in the regressions presented in Table 3.6 is constituted by children who experienced a rainfall level at birth year close to the long term average.

Results show that large positive and negative shocks have a symmetric impact on the child nutritional status while the impact of small positive and negative shocks differs significantly. Children do not benefit from small positive shocks but they are significantly and negatively affected by small negative shocks. In other words, all negative shocks matter while only large positive shocks impact child health. Children's vulnerability to small negative shocks suggests that households are not able to smooth consumption even when negative shocks are of low magnitude[71].

These results may reflect the precarious nutritional situation of most children. A small reduction in food supply has adverse effects on health while a large improvement in a child diet is needed to significantly alter her nutritional status.

[71] According to Wald tests, the impact of small and large negative shocks is not statistically different in all regressions.

TAB. 3.6-Impact of severe rainfall shocks in prenatal period

	Dependent variable : Height for age z-score					
	OLS	Mother FE	OLS	Mother FE	OLS	Mother FE
	$\alpha = 10\%$	$\alpha = 10\%$	$\alpha = 25\%$	$\alpha = 25\%$	$\alpha = 50\%$	$\alpha = 50\%$
Large positive rainfall shock	0.145*	0.143	0.174***	0.1877**	0.208***	0.267***
	(0.077)	(0.109)	(0.059)	(0.088)	(0.048)	(0.079)
	[2997]		[2997]		[2997]	
Small positive rainfall shock	-0.104	-0.128	-0.063	-0.0778	-0.057	-0.059
	(0.075)	(0.114)	(0.060)	(0.094)	(0.057)	(0.091)
	[4113]		[3447]		[1839]	
Small negative rainfall shock	-0.132*	-0.242*	-0.140**	-0.2526**	-0.126**	-0.123
	(0.075)	(0.124)	(0.059)	(0.101)	(0.062)	(0.106)
	[3737]		[3127]		[1839]	
Large negative rainfall shock	-0.231***	-0.295**	-0.200***	-0.2530**	-0.168***	-0.167
	(0.086)	(0.141)	(0.072)	(0.117)	(0.061)	(0.108)
	[1545]		[1545]		[1545]	
Municipality fixed effects	Yes	No	Yes	No	Yes	No
Observations	12572	6266	12572	6266	12572	6266
R-squared	0.126	0.117	0.127	0.118	0.126	0.116

Robust standard errors are in parentheses. The standard errors are corrected for clustering at the municipality level.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significant at 1% level of confidence.*
All regressions include child, mother and household characteristics.
In brackets the number of children in each class of shocks.

Large positive (negative) shocks =1 if the shock variable is above (below) the mean + one standard deviation; = 0 otherwise
Small positive shocks =1 if the shock variable belongs to the interval [mean; mean + α SD]; = 0 otherwise
Small negative shocks =1 if the shock variable belongs to the interval [mean; mean - α SD]; = 0 otherwise

3.5.4. Shocks mitigation

The ENIAM survey provides information about household expenditures during the month and the year preceding the survey. We use this information to calculate an expenditure variable for the 2007/2008 agricultural year which may be considered as a proxy for the permanent income of households. We then test whether children living in wealthier households are less impacted by negative rainfall shocks.

According to our estimations, income has no direct impact on the nutritional status of children. These results are in line with previous studies showing that sanitary conditions, access to health care and food are more important than income to predict a child's nutritional status. When interacted with the rainfall shock variable, income becomes a significant determinant of the child nutritional status. This shows that wealthier households are able to partly compensate for income drops (Column 1 of Table 3.7). Better-off households are able to partly compensate for an income loss following a deficit rainy season but this offsetting effect is of minor importance.

TAB. 3.7-Factors of shocks mitigation

Dependent variable : Height for age z-score		
	(1)	(2)
Positive rainfall shock in prenatal period (PT_0)	0.439***	0.448***
	(0.149)	(0.150)
Negative rainfall shock in prenatal period (NT_0)	-0.815***	-0.911***
	(0.276)	(0.307)
Expenditure	-6.20e-07	
	(6.04e-07)	
NT_0 * Expenditure	7.48e-06**	
	(3.74e-06)	
Access to safe drinking water		-0.0756
		(0.0485)
NT_0 * access to safe drinking water		0.703**
		(0.313)
Municipality fixed effects	Yes	Yes
Observations	12,572	12,572
R-squared	0.124	0.124

Robust standard errors are in parentheses. The standard errors are corrected for clustering at the municipality level.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significant at 1% level of confidence.*
All regressions include child, mother and household characteristics.

(1) Annual per capita expenditure including food, health, educational expenditures, agricultural inputs, livestock purchase, household goods, ceremonies, housing, debts repayment and remittances
(2) Improved water access refer to tap water, drinking fountain and piped water

Access to safe drinking water, through communal standpipes or private tap water, has more important mitigating effects. Children living in household having access to safe water are less impacted by negative rainfall shocks. The safe water access variable is only significant in interaction with the negative rainfall shock variable. Having access to an improved water source appears to be of most importance in a drought period when the wells and rivers run dry. An interpretation is that pregnant women and children whose bodies are weakened by poor nutrition after a drought are more vulnerable to water borne diseases.

3.6. Robustness tests and discussion

Results from the previous part suggest that rainfall shocks in the prenatal period have a significant impact on the nutritional status of the child. In this section, we test the robustness of these results by using the difference-in-differences estimator, conducting placebo regressions and sensitivity tests to measurement errors in some exogenous variables.

3.6.1. The difference in differences estimator

There are several potential sources of bias in estimating the impact of climate shocks on child health. First, rainfall shocks may be correlated with the mean rainfall level resulting in a selection bias: children living in poor arid regions are more vulnerable to shocks than children living in wealthier regions with better weather conditions. Second, children's exposure to rainfall shocks partly depends on household's crop decisions. In both cases, the rainfall shock variable is correlated with the error term. To control for these potential endogeneity biases, we focus on the impact of the negative rainfall shocks recorded during a specific year in order to use the difference-in-differences estimator (Akresh *et al.* 2009, 2011).

The 2006 climatic year appears to be a good candidate for this identification strategy. The rainfall shocks are fairly well spatially distributed in 2006 and a rather large population have been affected by drought (42 % of children aged 0-12 months). However, shocks had no significant impact on grain prices which stayed at a low level in 2006 on the main markets of Burkina Faso. As a consequence, the production loss induced by rainfall deficits clearly resulted in an income loss for farmers affected by shocks.

In contrast, the number of children born in 2003 is too low to work on the 2002 rainfall shock (Table 3.8). In 2004, all urban and rural households have been affected by the general food price increase that followed the 2004 drought - the most severe rainfall shock of the last two decades. The 2004 shock therefore violates the stable unit treatment value assumption (SUTVA) condition. 2007 is also not a good candidate for a difference in differences analysis because there is no counterfactual sample. As the database includes children born until July 2008, all the children were born at the time of the rainfall shocks of 2007.

TAB. 3.8-Number of children according to their year of birth

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
Birth cohort size	671	2573	2676	2768	3112	1480
Male	335	1383	1331	1423	1554	734
Female	336	1190	1345	1345	1558	746
Ratio Male/Female	1,00	1,16	0,99	1,06	1,00	0,98

The estimated equation is given by (7):

$$H = \gamma T.\delta_t + \boldsymbol{\beta}_c.X_c + \boldsymbol{\beta}_M.X_M + \boldsymbol{\beta}_H.X_H + \boldsymbol{\beta}_V.X_V + \boldsymbol{\beta}_Y.X_Y + \varepsilon \quad (7)$$

X_C is a vector of child characteristics; X_M is a vector of maternal characteristics; X_H is a vector of household characteristics; X_v is a vector of municipality dummies; X_y is a vector of month and year of birth dummies

T is the treatment variable. T is equal to 1 if the 2006 rainfall shock in the child's municipality is lower than minus one standard deviation; T is equal to 0 otherwise.

δ_t is a dummy variable that takes on a value of 1 if the child was alive during the shock or born in the following 12 month; equal to 0 otherwise.

γ measures the impact of the 2006 drought on children born until August 2007 and living in regions affected by the rainfall shock, the so called "treated" children. These children were aged 0 to 51 months during the economic shock period that follows the 2006 drought.

TAB. 3.9-Estimation results from the DD estimator

Dependent variable : Height for age z-score			
	(1)	(2)	(3)
Born before the shock * shock region	-0.0539		
[In utero - 51 months]	(0.122)		
Cohort Sept 2006 to Aug 2007 * shock region		-0.283**	
[In utero - 12 months]		(0.128)	
Cohort Sept 2005 to Aug 2006 * shock region		0.259	
[2 - 24 months]		(0.167)	
Cohort Sept 2004 to Aug 2005 * shock region		-0.0505	
[14 - 36 months]		(0.138)	
Cohort June 2003 to Aug 2004 * shock region		-0.0691	
[26 - 51 months]		(0.175)	
Born after the shock * shock region			0.0547
			(0.122)
Municipality fixed effects	Yes	Yes	Yes
Year of birth fixed effects	Yes	Yes	Yes
Month of birth fixed effects	Yes	Yes	Yes
Observations	12,569	12,572	12,572
R-squared	0.169	0.169	0.169

Robust standard errors are in parentheses. The standard errors are corrected for clustering at the municipality level.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significant at 1% level of confidence.*
All regressions include child, mother and household characteristics.

The impact of the 2006 drought on all "treated" children is not significantly different from zero (Table 3.9, Column 1). However, when interacting the shock variable with the birth cohort, younger children appear to be significantly and negatively affected by the drought while older children are not. Children born during the crop year following the 2006 drought in a deficit region have a 0.283 lower height-for-age z-score. These results corroborate the previous ones: children under one year are more vulnerable to economic shocks than older ones.

As a robustness check, we test the effect of the 2006 climatic conditions on children born after August 31, 2007. These cohorts have never been exposed to the 2006 weather shock (even at time of conception) so that the impact of the shock on these children is expected to be non-existent. Results do not show any systematic bias in our results (Table 3.9, Column 2), the coefficient of the shock variable being not significantly different from zero.

3.6.2. Other robustness checks

An impact limited to rural areas

Rainfall shocks if not generalized to the whole country should have no impact on the income of urban households and food intake of children living in urban areas. As expected, when restricting the sample to children living in urban areas, the rainfall shock variable becomes non-significant (Table 3.10, Columns 1 and 2). In this placebo regression, the height for age z-score of children living in urban areas is unaffected by rainfall shocks in the rainy season preceding their birth date.

TAB. 3.10-Impact of rainfall shocks in prenatal period on restricted samples

Dependent variable: Height for age z-score				
	OLS	Mother FE	OLS	Mother FE
Rainfall shock in prenatal period	0.1828	0.2714	0.5356***	0.6522***
	(0.220)	(0.460)	(0.105)	(0.181)
Child characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes
Mother characteristics	Yes	No	Yes	No
Household characteristics	Yes	No	Yes	No
Municipality fixed effects	Yes	No	Yes	No
Sample	Urban areas	Urban areas	Date of birth certified	Date of birth certified
Observations	1974	768	9575	4668
R-squared	0.144	0.179	0.145	0.152

Robust standard errors are in parentheses. Standard errors are corrected for clustering at the municipality level.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significant at 1% level of confidence.*
All regressions include child, mother and household characteristics

Sensitivity to the child's birth date

To identify rainfall shocks in prenatal period, we need precise information on the year and month of birth of the children. This information is available in the survey. Mothers were asked to show written records (such as child health cards or birth certificates) to the survey team. If the birth certificate was available, the date of birth was taken directly from it. If written records were missing, the age in months was determined using a tool known as the calendar of events. The most useful events are generally related to the agricultural calendar (rainy season, dry season, planting, harvest, etc.) and religious festivals or public holidays. In this case, the birth date may be measured with error. In the estimations presented above, we did not distinguish between children whose date of birth is known with certainty and the others.

To test a potential bias due to measurement error in the child's date of birth, we restrict the sample to the children whose birth date is certified by a written record. Results in Columns 3 and 4 of Table 3.10 confirm our previous findings. The estimated coefficients are significant and even larger when the sample is restricted to those children whose reported birth date is supported by written evidence.

Sensitivity to the measure of shocks

The sensitivity of the main results to the measure of shocks have been tested by calculating the long-term rainfall mean as the average rainfall during the 1995-2008 period, and alternatively, as the average rainfall during the 1995-2002 period prior to children birth. Estimation results (Annex A3.3 and A3.4) are unchanged.

3.6.3. Discussion

Rainfall shocks and diseases

Rainfall is a key determinant of the harvest yield which conditions food availability, income and nutrition over the following twelve months. Rainfall also acts on the prevalence of vector-borne diseases during the rainy season. Vector-borne diseases and food supply are affected by rainfall in opposite directions: a high level of precipitations favors the expansion of malaria and cholera for instance, but is a condition for a good harvest. Our results mainly capture the impact of rainfall through food supply since we measure the impact of rainfall on unborn children at the time of the rainy season. In this respect, our estimates should be regarded as overestimating the global impact of rainfall on health.

Potential selection bias

Like other studies of this type, we are confronted with a potential attrition bias due to migration, selective mortality and conception rate in relation to the rainfall shocks.

Migration is a potential source of attrition bias which direction is undetermined. More vulnerable households may have migrated from rural to urban areas in reaction to a negative rainfall shock. They may also send out children to relatives living in areas preserved from food shortage. Whether wealthier or poorest households migrate is unknown. In the same way, fostered child can be the more or the less healthy (Akresh *et al.* 2009). Unfortunately, the survey does not provide any information that could shed light on this issue.

The estimated impact of a rainfall deficit on child's health is also likely to be underestimated if shocks result in selective mortality. The impact of shocks is estimated on surviving children who may be genetically different according to the nature of the rainfall shock in prenatal period. Large negative shocks are likely to result in increased mortality so that surviving children may be genetically more resistant to deprivation. The survey does not provide information on child mortality nor on miscarriage and still birth. However, descriptive statistics do not show evidence of an attrition bias at the aggregate level.

Weather conditions may also determine parental choice regarding the timing of birth. Some types of parents may decide to delay birth after a negative rainfall shock (or conversely), generating a selection bias. However, the magnitude of this phenomenon should not be overstated since birth control and contraceptive means are not widespread in rural areas of Burkina Faso. Moreover, the within family estimates controlling for parental characteristics should control for this potential bias.

Keeping these potential selection biases in mind, our results should be interpreted as the impact of rainfall shocks on the nutritional status of children conditional on the surviving child to be recorded in the survey (Akresh *et al.* 2011).

3.7. Concluding remarks

The econometric results emphasise four important points. First, the significant impact of rainfall shocks in prenatal period on child health shows that households are not able to smooth income shocks related to weather conditions. Children are vulnerable not only to large negative shocks but also to negative shocks of lesser importance.

Second, young children below 12 months are more vulnerable to economic shocks. The in utero period and the first months of life appear to be a critical period. Negative shocks occurring at a age lower than 12 months should be considered as having a permanent effect. These results are consistent with those of Akresh *et al.* (2012). Based on a sample of children living in the Nahouri region of Burkina Faso, these authors found that children exposed to a negative rainfall shock while in utero or in their first year of life have lower cognitive abilities.

Third, rainfall shocks translate in nutritional shock with a delay. In this respect, a drought has an adverse effect on the nutritional status of children born within 11 months after the shock. This is a consequence of the lack of diversification of rural household income. The farm income which is concentrated over a short period of the year determines the access to food and health care during the rest of the year.

Fourth, results do not confirm the existence of a bias detrimental to girl in resource allocation within households. On the contrary, young boys appear to be more vulnerable to shocks than girls. This finding is consistent with the higher rate of mortality of boys during the neonatal period that is commonly observed in Africa. This gender effect should not be interpreted as reflecting a behavioural but rather a biological phenomenon.

Results have important policy implications. First, they provide additional support for public interventions aiming at protecting rural households from climate shocks. In this respect, promoting the development of weather–based insurance tools appears to be highly desirable. Results also call for strengthening the early warning systems and the aid disposal in case of crop deficit. Second, results have implications on the targeting and timing of assistance in case a negative rainfall shock. Assistance should be more specifically targeted at pregnant women and young children who are the most vulnerable. Distribution of dietary supplement to rural women in case of drought will have a positive impact on the health outcomes of the unborn child. Assistance should be provided as earlier as possible in the crop year and not only during the so-called "hunger season". Third, results call for further research on intra-household resource allocation. The poor nutritional status of children may reflect gender inequality in food access within the household between men and women.

Appendix

17 variables have been used to calculate the household wealth index. Table A3.1 provides the scoring factors of the five principal components. The five factors with an eigenvalue larger than 1 have been kept. The first component accounts for 22 percent of the total variation across the 17 indicators.

TAB. A3.1-Composition of the wealth index

Variable	Component 1	Component 2	Component 3	Component 4	Component 5	Mean	S.d
Radio	0,220	0,002	-0,259	-0,369	0,238	0,742	0,438
Table	0,274	0,175	-0,255	-0,158	0,242	0,380	0,485
Chair	0,350	-0,495	0,123	0,100	-0,019	0,653	0,476
Bed	0,236	0,232	-0,279	-0,087	0,242	0,434	0,496
Cart	0,302	-0,200	0,067	-0,013	-0,137	0,513	0,500
Plough	0,350	-0,495	0,123	0,100	-0,019	0,653	0,476
Phone	0,286	0,178	-0,042	-0,211	-0,091	0,303	0,460
Television	0,235	0,249	0,195	-0,172	-0,214	0,066	0,248
Bicycle	0,173	-0,221	-0,098	-0,138	0,231	0,933	0,250
Motorbike	0,327	0,094	-0,019	-0,157	-0,174	0,333	0,471
Car	0,071	0,135	0,596	-0,153	0,236	0,003	0,053
Walls in cement or stones	0,137	0,266	0,188	0,305	-0,157	0,036	0,187
Improved roof (cement, tiles or cogurrated iron)	0,285	0,178	0,023	0,377	-0,079	0,392	0,488
Improved floor (cement or tiles)	0,261	0,248	0,023	0,412	-0,040	0,226	0,418
Electricity	0,010	0,093	0,545	-0,182	0,424	0,004	0,064
Improved water access (tap water, drinking fontain, piped water)	0,035	0,007	-0,128	0,482	0,627	0,653	0,476
Improved toilet facilities (private toilet or flush toilets)	0,191	0,206	-0,027	-0,032	-0,087	0,156	0,363
Eigenvalue	3,744	1,755	1,148	1,112	1,025		
Share of variance associated	0,220	0,103	0,068	0,065	0,060		

TAB. A3.2-Summary statistics

Variable	Obs	Mean	Std. Dev.	Min	Max
Weight-for-height (WHZ)	12403	-0,62	1,26	-5	4,94
Height-for-age (HAZ)	12572	-1,53	1,64	-6	5,94
Weight-for age (WAZ)	12497	-1,31	1,26	-5,95	5
WHZ<2	12403	0,12	0,33	0	1
HAZ<2	12572	0,39	0,49	0	1
WAZ<2	12497	0,27	0,45	0	1
WHZ<3	12403	0,04	0,19	0	1
HAZ<3	12572	0,16	0,37	0	1
WAZ<3	12497	0,09	0,29	0	1
Child age (in months)	12572	27,14	16,57	0	60
Child sex (male=1)	12572	0,51	0,50	0	1
Twin (=1 if a child has a twin)	12572	0,03	0,16	0	1
Household size	12572	12,05	6,69	2	61
Mother's age (in years)	12572	29,93	7,57	15	60
Household head age	12572	47,88	13,56	17	100
Mother's literacy	12572	0,08	0,27	0	1
Mother's primary education	12572	0,06	0,23	0	1
Mother's secondary education	12572	0,01	0,12	0	1
Mother's other education	12572	0,00	0,05	0	1
Household head literacy	12572	0,10	0,30	0	1
Household head primary education	12572	0,10	0,30	0	1
Household head secondary education	12572	0,03	0,17	0	1
Household head other education	12572	0,03	0,16	0	1
Wealth index	12572	0,01	0,90	-1,41	7,42

TAB. A3.3-Impact of a rainfall shock in the child's birth year using two alternative measures of long-term rainfall mean

Dependent variable : Children's Height for age z-score				
	(1)	(2)	(3)	(4)
Rainfall shock at birth year (T_0)	0.449***	0.5783***	0.481***	0.6139***
	(0.0943)	(0.114)	(0.0987)	(0.121)
T_0 * Girls		-0.2622**		-0.2711**
		(0.120)		(0.138)
Child characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes
Mother characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes
Household characteristics	Yes	Yes	Yes	Yes
Municipality fixed effects	Yes	Yes	Yes	Yes
Long term rainfall mean	1995-2002		1995-2008	
Observations	12572	12572	12572	12572
R-squared	0.124	0.124	0.124	0.124

T_0: Rainfall deviation from mean at birth year
NT_0: Absolute value of negative rainfall deviation from mean at birth year
Robust standard errors are in parentheses. Standard errors are corrected for clustering at the municipality level.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significance at 1% level of confidence.*

TAB. A3.4-Impact of a rainfall shock at age one and two with two estimation of long-term rainfall mean

Dependent variable : Children's Height for age z-score						
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)
Rainfall shock in birth year (T_0)	0.449***			0.481***		
	(0.0943)			(0.0987)		
Rainfall shock at age one (T_1)		0.0152			0.00745	
		(0.115)			(0.122)	
Rainfall shock at age two (T_2)			0.153			0.165
			(0.112)			(0.119)
Municipality fixed effects	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes	Yes
Long term rainfall mean		**1995-2002**			**1995-2008**	
Observations	12572	10164	7370	12572	10164	7370
R-squared	0.124	0.080	0.095	0.124	0.080	0.095

Shock variable: rainfall deviation from mean
Robust standard errors are in parentheses. The standard errors are corrected for clustering at the municipality level.
** indicates significance at 10% level; ** at 5% level and *** significance at 1% level of confidence.*
All regressions include child, mother and household characteristics.

Chapitre 4

Chocs climatiques et bulles spéculatives sur les marchés céréaliers nigériens

Climate Shocks and Speculative Bubbles on Grain Markets in Niger[*]

Résumé

Durant ces vingt dernières années, les prix du mil des marchés nigériens ont connu de spectaculaires hausses ayant des conséquences dramatiques. Les prix semblent alors complètement déconnectés de leur valeur fondamentale. Ces épisodes d'explosions suivis de retournements rapides pourraient être dus à la présence de bulles spéculatives rationnelles. Considérant le mil comme un actif alimentaire, nous développons un modèle de prix et testons la présence de bulles spéculatives pour quinze marchés du mil au Niger. La stratégie économétrique utilisée consiste en l'estimation d'une valeur fondamentale du prix du mil. Nous étudions ensuite les propriétés statistiques des déviations du prix du mil de leur valeur fondamentale. Une batterie de tests ayant pour but d'éprouver l'asymétrie, la voussure ou le processus non linéaire des bulles est mise en place. Ces tests ne permettent pas de rejeter l'hypothèse de présence de bulles rationnelles pour un certain nombre de marchés, autorisant l'identification de phases d'expansion et d'explosions des processus de bulles spéculatives. Les résultats montrent que les petits marchés situés en zones déficitaires et enclavées sont plus susceptibles d'être sujets à la spéculation que des marchés situés dans des zones de production et de consommation importantes.

[*] Ce chapitre est une version d'un article coécrit avec C.Araujo-Bonjean.

4.1. Introduction

Over the past 20 years, grain markets in Niger have experienced numerous large positive price shocks followed by rapid reversals. These shocks, whose mean duration is typically less than a year, are transitory, but constitute a threat to poor households that are dependent on markets for food security. These periods of price spikes sometimes lead to severe food crises, as it was the case in Niger in 2005.

Recurrent episodes of high local food grain prices are mainly related to a rainfall shock and a deficit in domestic production. However, the extent of the food deficit and the price increase are not closely related. This may be due to the difficulty of measuring grain production. Millet is produced by numerous small farms scattered throughout the country, and production is poorly recorded. In fact, production data are revised several times during the growing season and corrected several months after the harvest. Measurement errors may therefore explain the low correlation between prices and production.

Non-competitive markets may also explain the apparent discrepancies between prices and food availability. In developing countries, traders are often considered as responsible for grain price increases. They are blamed for taking advantage of their monopsony power, and for speculative stockholding. However, another explanation can be found in Sen's work on the origin of famines when there is no decline in food availability. Consistently with this later explanation, Ravallion (1985) showed that the 1974 famine in Bangladesh cannot be explained by a rice production deficit, but by stockholders' over-optimistic price expectations. Such market "irrational exuberance" has been shown for stock markets, but this phenomenon has been seldom studied when applied to commodity markets in developing countries.

The presence of rational speculative bubbles can explain the dramatic price increases followed by a sudden reversal that have been observed at different periods of time in Niger grain markets. It may also explain why the early warning system for preventing food crises, which is mainly based on the monitoring of crop growth, has not been effective in anticipating steep rises in prices despite technological advances that allow for more accurate monitoring of harvests.

Rational speculative bubbles result from a self-fulfilling belief based on intrinsically irrelevant information that is not related to market fundamentals (Diba and Grossman 1988). For instance, if the economic actors anticipate an increase in grain price whereas these expectations are not based on changes in the fundamentals, the grain demand will shift the price away from its intrinsic value. A rational bubble is consistent with the efficient market hypothesis and the "no arbitrage" condition. It can be derived from a basic asset pricing model assuming competitive markets and rational expectations with no informational asymmetries. Agents know that the asset is overvalued, but they are prepared to pay more for the asset than its intrinsic value if they expect to sell it at an even higher price. The bubble increases at the required rate of return and bursts when agents' expectations return to normal.

In Niger, grain market investors operate in a highly uncertain environment that is likely to favour self-fulfilling beliefs. Information on climatic and agronomic conditions of crops as well as on economic variables is generally very poor. Interventions from governments and external aid agencies under food risk are often unpredictable. As a result, incomplete or unreliable information provided by the public authorities may fuel speculative bubbles.

Rational speculative bubbles are difficult to detect but there is now an abundant literature which aims to test for the existence of rational bubbles on stock markets. In this chapter, we consider millet as a food asset that can be held for long periods. Using a model for a storable good we show that, like other financial assets, the price of millet depends on a fundamental component and a potential rational bubble. Following Evans (1991) we consider a specific class of rational bubbles *i.e.* periodically and partially collapsing speculative bubbles (PCB). PCBs are non linear processes; they are explosive during the phase of bubble eruption, but they may be stationary over the whole sample period. To test for the presence of such bubbles our empirical strategy consists first of estimating the bubble component of prices - taken as the difference between the millet market price and its fundamental value. Subsequently, we explore the statistical properties of bubbles. First, we use the residual augmented least squares Dickey-Fuller test to correct for skewness and kurtosis. Second, we test for asymmetry in the bubble process by using non linear unit rot tests based on a M-TAR model and on a Markov switching model. Third, rolling ADF tests are conducted to detect explosiveness in bubble dynamics. The results do not reject the presence of rational bubbles on nine markets among the 15 markets under study, but reject the presence of bubbles on Niger main markets.

The chapter is organized in the following manner. Part 4.2 outlines the main characteristics of millet prices during the last two decades. Second part presents the rational bubble model for millet, and the theoretical characteristics of bubbles. The fundamental value of millet is estimated in Part 4.4. Part 4.5 is dedicated to the non linear unit root test.Part 4.6 covers the rolling ADF tests. Part 4.7 concludes.

4.2. Millet price fluctuations in Niger since 1990

In Niger millet is the staple diet for the local population, and the main food crop. It covers 65 % of cultivated land and represents about three quarters of total cereal production (IRD 2009). This is the most suitable crop for the arid and semi-arid areas of Niger. It is a rain fed crop cultivated by small traditional farmers using low input agricultural practices. Millet production is highly vulnerable to pest attacks and adverse weather conditions.

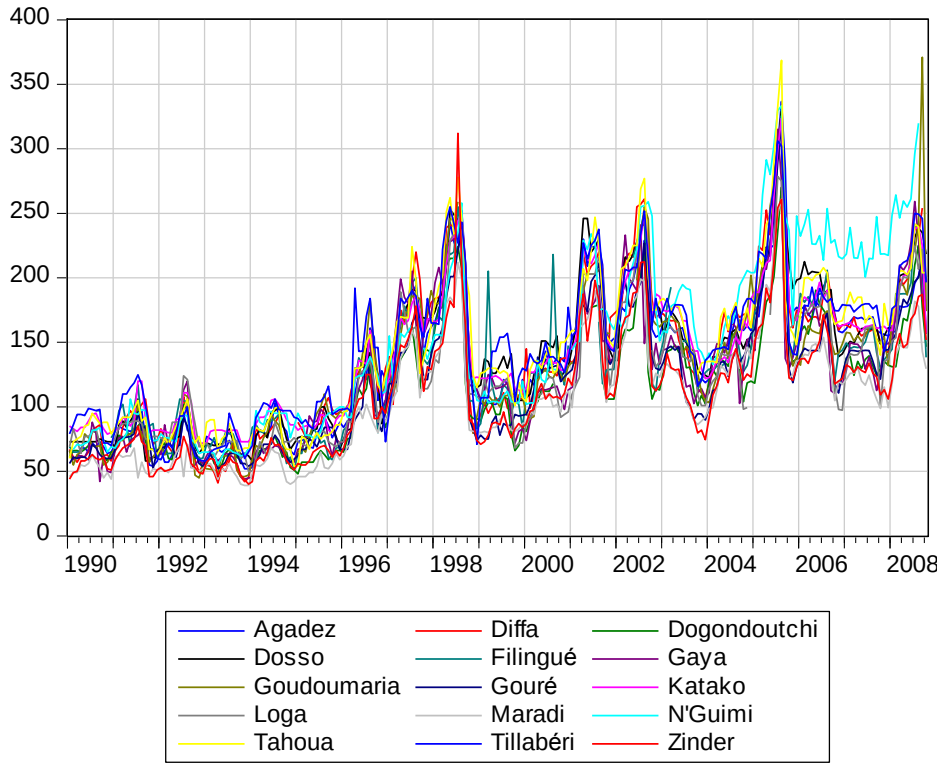
Millet can be stored for more than a year. Three categories of agents hold stocks: farmers, wholesalers and public authorities. Most grain is stored within farms and these stocks are difficult to assess. As a general rule, stocks are built up during the harvest season and held for at least one year. They are intended to cover household's food needs until the next harvest, and meet farm's demand for seeds. That said, many farmers with low production levels are net buyers of grain. Their production may not be sufficient to cover their food needs, or they may be forced to sell millet early in the crop marketing season to meet their cash needs. Wholesalers hold stocks over short periods, generally not exceeding two months, resulting in a high rate of stock turnover (Aker, 2010). Public safety stocks are renewed by tender early in the year[73].

[73] Unfortunately, information on the level of public stocks and dates of operation is not available.

The production cycle generates large seasonal price fluctuations. Millet prices are lower during the harvest and post-harvest season that occurs from September to January. Prices then gradually increase to reach their peak at the end of the lean season[74], from July to September. The magnitude of the seasonal movement in prices is particularly important in Niger. Prices rise by 40% on average between January and August.

Millet is subject to intensive cross-border trade in the Western Africa region, but it is not traded on international markets. Niger is structurally an importer of millet. The country purchase millet mostly from Nigeria, but imports from Mali and Burkina Faso have been growing during the last decade. Because weather conditions are similar within the countries of the sub-region, trans-border trade does not really play a regulating role. The dampening effect of trade on prices is weak, and millet prices are subject to large variations from one year to the next.

FIG. 4.1-Millet prices in Niger, Fcfa/kg, January 1990 to October 2008



Source: SIMA

At the end of the 1980s, a market information system (SIMA) that collects market prices for major agricultural products was implemented in Niger. Market price information is disseminated to producers, consumers and traders through the media. In two decades, SIMA has been accumulating a large amount of data which allow researchers to trace the evolution of food prices in large geographical areas for a wide range of commodities.

[74] The lean season is the period that precedes the harvest during which granaries are depleted.

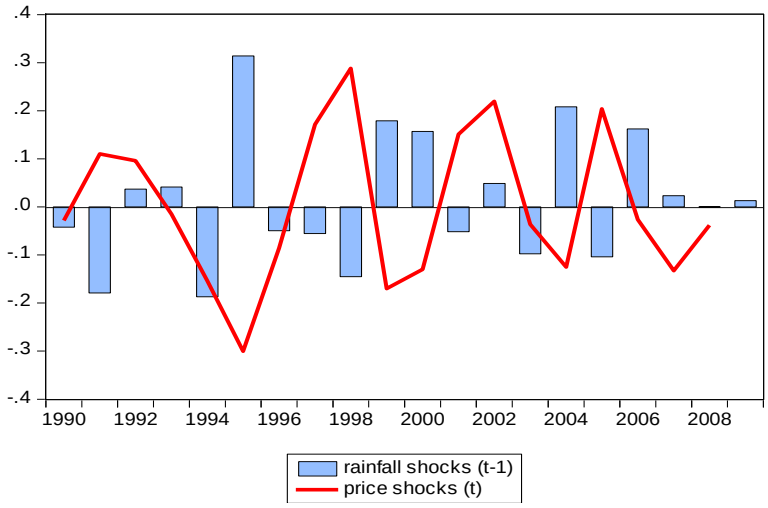
We selected a sample of 15 millet markets from the markets covered by the SIMA. Market selection was based on the quality of available information: markets with a hight proportion of missing data have been dropped from the sample. The selected sample includes a variety of markets that differ according to their location - remoteness, border proximity, production area and locality. The observation period starts in January 1990 and ends in October 2008.

Figure 4.1 displays the evolution of millet prices in the past two decades. Except for N'Guimi at the end of the period, prices follow a common trend punctuated by large positive shocks. Figure 4.2 focuses on the evolution of real millet price in the capital city, Niamey, relative to the cumulated rainfall during the preceding year[75]. Considering that rainfall is the main component of the fundamental value of millet, Figure 4.2 shows periods during which prices deviate from their fundamental value.

Except for the 2008 shock which corresponds to the international food crisis, most episodes of price boom have been recorded after a rainfall deficit. This was the case in 1996-1998 and 2005. The price increase during 1996-1998 matches with three consecutive years of rainfall deficit, the largest price increase being registered in 1997. Prices reached high levels again in 2005, after the 2004 drought. It is worth noting, however, that the severe drought registered during the 1990 rainy season did not result in a sharp price increase in 1991.

The unusual price changes in 1994 are partly the consequence of the Franc CFA devaluation. The severe rainfall deficit recorded during the 1993 rainy season, the most important deficit during the period investigated, was not followed by a sharp increase in millet prices (Figure 4.1). In real terms the millet price fell due to the high level of inflation generated by the devaluation (Figure 4.2).

FIG. 4.2-Price shocks in Niamey and rainfall shocks[76]



Source: SIMA and author's calculations

[75] The rainfall variable is delayed to take the production cycle into account.

[76] Shocks are calculated on an annual basis as the difference between the price (cumulated rainfall) level at year t and the mean price (cumulated rainfall) for the 1990-2008 period. They are expressed as a percentage of the mean.

A more puzzling situation occurred in 2001-2002. After two consecutive years of excess rainfall, a small rainfall deficit generated a sharp price increase in 2001. Moreover, the price kept increasing in 2002, whereas the rainfall level was above its mean. In 1992, millet price registered a positive shock that was not related to a rainfall deficit. These abnormal price evolutions relative to rainfall may reflect the presence of speculative bubbles.

4.3. A rational bubble model for millet

According to the preceding observations, speculative behaviour on millet markets may have exacerbated climate shock effects, leading to price spikes and increased food insecurity. Before proceeding to econometric tests for the existence of bubbles, we develop a simple asset-pricing model assuming rational expectations. We then focus on a specific class of rational bubbles and study their statistical properties.

4.3.1. The millet pricing model

We consider a simple model for millet price with linear supply and demand[77]. Market equilibrium is given by the set of equations (1) – (3).

Net supply (Q) in period t is positively related to the current price of millet:

$$Q_t = a_t + bP_t + \varepsilon_t \qquad b > 0 \qquad (1)$$

where P_t is the millet price level in period t

and a_t is an index that depends on current and lagged values of y_t, a vector of exogenous supply and demand variables.

Farmers and traders withhold supply if they expect the future price to be sufficiently high to compensate for storage costs and losses. Assuming risk-neutral stockholders, demand for stocks in period t (S_t) is positively related to the price spread between the future expected price and the current price:

$$S_t = c(E_tP_{t+1} - P_t) + d_t + w_t, \qquad c > 0 \qquad (2)$$

dt is an index that depends on a vector of variables reflecting the opportunity cost of holding millet.

E_tP_{t+1} is the expected price of millet in period $t+1$

E_t is the conditional expectations operator

ε_t and wt are zero-mean, finite variance, serially uncorrelated disturbance terms. They are for unaccounted variables on the demand and supply side.

[77] This model draws on Ravallion (1985), Pindyck and Rotemberg (1990), Quddus and Becker (2000).

The millet market equilibrium is given by:

$$S_t = Q_t + S_{t-1} \quad (3)$$

S_{t-1} is the initial stock.

The market clearing price solves equation (3) at each point in time so that:

$$E_t P_{t+1} = \lambda P_t + x_t + u_t \quad (4)$$

where : $\lambda = \frac{b+c}{c} > 1$ and $x_t = a_t - d_t$ $\qquad u_t = \varepsilon_t - w_t + S_{t-1}$

x_t is a forcing variable; it is an index that depends on a vector of variables reflecting market fundamentals. u_t is an error term including the initial stocks, which accounts for unobserved variables to the researcher.

Equation (4) relates the current millet price to the next period's expected price, variables determining fundamentals, and to an unobserved variable (u). It is a first order difference equation in *P*. Given that the eigenvalue of the system (λ) is greater than unity, the forward-looking solution of equation (4) for *P* involves two components:

$$P_t = B_t + F_t \quad (5)$$

F_t is the market-fundamentals component and Bt is a potential rational-bubbles component (Blanchard 1979, Blanchard and Watson 1982, Diba and Grossman 1987, 1988).

Under the assumption that $Et(x_{t+j}+\mu_{t+j})$ does not grow at a geometric rate equal or greater than λ, Ft is a convergent sum (Diba and Grossman, 1987):

$$F_t = E_t \sum_{i=0}^{\infty} \lambda^{-(i+1)} x_{t+i} + u_{t+i} \quad (6)$$

The market-fundamentals component of the millet price relates to the expected value of the exogenous variables determining supply and demand.

In contrast to the fundamental component, the bubble part, B_t, is not stationary. B_t is the solution to the homogenous expectational difference equation:

$$E_t B_{t+1} - \lambda B_t = 0 \quad (7)$$

If Bt is different from zero, there exists a rational bubble that is self-fulfilling. The conditional expectations of the bubble are explosive:

$$E_t B_{t+j} = \lambda^j B_t \quad \text{for all j>0} \quad (8)$$

The presence of a self-fulfilling rational bubble does not violate the no-arbitrage condition. The bubble is expected to grow at the required rate of return.

4.3.2. Periodically and partially collapsing bubbles

Following Blanchard and Watson (1982) and Evans (1991), we focus on a class of rational stochastic bubbles that periodically collapse and regenerate: the socalled Periodically Collapsing Bubble (PCB) given by (9a) and (9b):

$$B_{t+1} = \lambda B_t u_{t+1} \quad \text{if } B_t \leq c \quad (9a)$$

$$B_{t+1} = \left[\delta + \frac{\lambda}{\pi}\theta_{t+1}(B_t - \lambda^{-1}\delta)\right] u_{t+1} \quad \text{if } B_t > c \quad (9b)$$

δ and θ are positive parameters. u_{t+1} is an exogenous independently and identically distributed positive random variable with $E_t u_{t+1} = 1$. θ_{t+1} takes the value of 1 with probability π and 0 with probability 1- π, where $0 < \pi < 1$.

The PCB process switches between two regimes depending on the position of the bubble with respect to the threshold value c.

This bubble process satisfies equation (7) since the expected growth rate of the bubble is always λ. For $B_t < c$, the bubble increases slowly at mean rate λ. If B_t rises above the threshold, it expands faster at the mean rate $\lambda\pi^{-1}$, but may collapse with probability 1- π. The bubble grows at a higher rate during expanding phases to compensate the investor for the likelihood of collapse. When the bubble collapses, its growth rate falls to a mean value of δ, and the process resumes (Evans, 1991).

This type of bubbles not only accounts for occasional asset price crashes but also for rapid run-ups in asset prices before a crash.

4.4. The fundamental value of millet

To test for the presence of periodically collapsing bubbles we first need an empirical model for the fundamental value of millet. Following Pindyck and Rottemberg (1990), we assume that forecasts of x_t in equation (6) are based on its current and past values. x_t includes observable exogenous variables that determine millet supply and demand, and all relevant information about future net supply.

Most previous studies have shown that millet markets in Niger are fairly well integrated spatially (Araujo *et al.* 2012). Consequently, the fundamental value of millet in Niger is assumed to be determined at the country level. The fundamental value is only allowed to vary between markets by a constant term. These market specific effects catch differences in price level that are related to the geographical location of markets. In other words, specific effects measure fixed transaction costs associated with the location of markets.

The fundamental value of millet is therefore estimated using panel data for the 15 millet markets for the period 1990-2008. The estimated equation is given by (10):

$$P_{it} = \alpha_1 Rainfall_t + \alpha_2 CumulRainfall_t + \alpha_3 CPI_t + \alpha_4 Gasoline_t + \sum_{s=1}^{12} \varphi_s M_{st} + \varepsilon_i + \nu_{it} \qquad (10)$$

P_{it} is the millet price on market i at time t. $Rainfall_t$ is the monthly rainfall level. This is an information variable that is useful to predict the yield of the future harvest. $Cumul\ rainfall_t$ is the cumulated level of rainfall over the rainy season (from May to October) in the main production area[78]. It takes a constant value from October $t-1$ to September t (the crop year). This is an exogenous variable which aims to capture the state of millet availability for the current period. $Gasoline_t$ is the price of gasoline in Niger. This variable is a proxy for production and trade costs that vary with the oil price. CPI_t is the Niger consumer price index. M_s are monthly dummies that capture seasonal price variations. ε_i are market specific fixed effects. ν_{it} is the error term. It includes all factors not explained by right-hand variables.

The fitted value of P_{it} is taken as a measure of the fundamental value of millet; ν_{it} is the apparent deviation of the price in the i market from its fundamental value at time t.

Estimation results are given in Table 4.1. As expected, gasoline price enters positively in the fundamental equation. The current rainfall level and the cumulated rainfall level, which represent respectively, the future harvest and the current availability of millet, negatively affect the fundamental value of millet. Mean prices in Maradi, Zinder, Dogondoutchi, Gouré, located in the main producing region of Niger, close to the Nigerian border, are below the average price level. The highest mean prices is in N'Guimi, which is located in a remote area, close to the border with Chad. Prices are also higher than average in Niamey (Katako), Niger's main consumption market.

78 Rainfall data come from *Global Air Temperature and Precipitation: Gridded Monthly and Annual Time Series (Version2.01)* interpolated and documented by Cort J. Willmott and Kenji Matsuura (with support from IGES and NASA), University of Deleware. For more information, see Legates *et al.* (1990a et b) and Willmott and Matsuura (1995). The data base gives monthly precipitation for the 1900-2008 period, interpolated to a 0.5 by 0.5 degree grid resolution. The variables *Rainfall* and *Cumulated rainfall* are the mean rainfall level and the mean cumulated rainfall level, repectively, calculated on observations below 14 degrees latitude (considered as the limit of the production area in Niger).

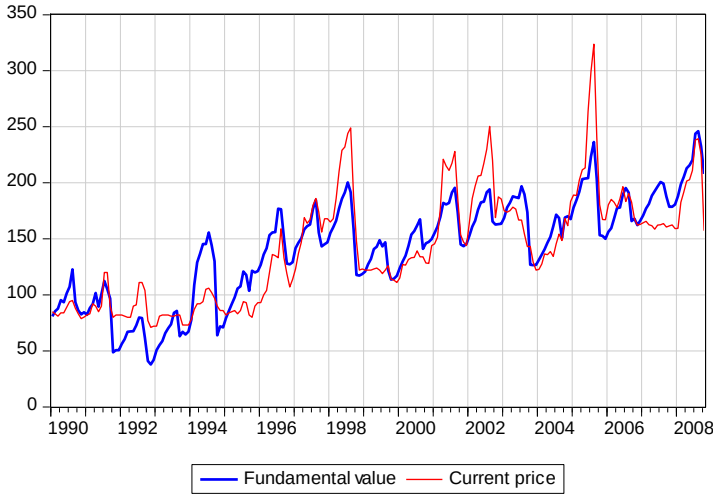
TAB. 4.1-Estimation of the fundamental value of millet

Dependent variable: current millet price		**Fixed effects**	
Gasoline	0.039	Agadez	4.683
	(0.000)	Diffa	7.436
CPI	1.995	Dosso	9.441
	(0.000)	Gaya	-5.337
Cumulated Rainfall	-0.225	Katako (Niamey)	11.846
	(0.000)	Maradi	-25.684
Rainfall	-0.202	Tahoua	14.119
	(0.000)	Zinder	-20.859
Monthly fixed effects	yes	Goudoumaria	1.702
Cross-section fixed effect	yes	Nguimi	19.625
Adjusted R-squared	0.753	Dogondoutchi	-15.798
No. of obs	3331	Loga	-5.704
		Filingue	0.484
		Goure	-11.427
		Tillaberi	15.567

P-value in parenthesis. Stationarity tests are given in the appendix.

As an illustration, Figure 4.3 shows the estimated fundamental component of the millet price in Niamey (Katako market). The deviation between the current price and the fundamental component can be interpreted as the bubble component. This figure highlights four periods during which the millet price in Katako rose dramatically beyond its fundamental value - 1998, 2001, 2002 and 2005. A deeper analysis shows that apparent bubbles break out at the beginning of the lean season, and end with the arrival of the new harvest (Araujo *et al.* 2012). In other words, prices increase exponentially from March/April to July/August. They crash to their initial level after one or two months.

FIG. 4.3-Fundamental component of the millet price in Katako (Niamey) (Fcfa/kg)



The standard ADF test (Table 4.2) rejects the unit root null hypothesis for apparent bubbles in all markets. This test is not very informative, however, when data exhibit both skewness and excess kurtosis which is the cas ehere. The Jarque Bera test rejects normality for all markets except Maradi and Loga, at the 5 % confidence level (Table 4.2). Note that non-normality is consistent with the presence of periodically collapsing bubbles (Taylor and Peel 1998, Payne and Waters 2005).

Therefore, we have implemented the residuals-augmented Dickey-Fuller (RADF) test, developed by Taylor and Peel (1998)[79], which is robust to skewness and kurtosis in the distribution of the residual term. *t*-tests in the RADF equation (Table 4.2) confirm the presence of skewness and kurtosis in the potential bubbles. The RADF test does not reject the unit root hypothesis for four of the 15 markets under study - Dogondoutchi, Gouré, Katako and N'Guimi. This test is more powerful than the ADF test in detecting periodically collapsing bubbles, but it does not alone provide sufficient evidence for the presence of bubbles.

[79] See also Im and Schmidt (2008).

TAB. 4.2-Bubbles' characteristics

	Agadez	Diffa	Dogondoutchi	Dosso	Filingué	Gaya	Goudoumaria	Gouré	Katako	Loga	Maradi	N'Guimi	Tahoua	Tillabéri	Zinder
No of Obs.	226	221	217	226	210	226	215	226	226	216	226	218	226	226	226
Skewness	0.736	0.611	0.326	0.571	0.700	0.433	1.354	0.405	0.501	0.315	-0.027	0.710	1.065	0.504	0.864
Kurtosis	4.307	3.123	2.600	3.350	3.788	3.324	6.371	3.979	3.435	2.777	2.668	3.107	5.518	3.705	7.038
Jarque Bera	36.509	13.872	5.289	13.412	22.589	8.042	167.527	15.223	11.215	4.028	1.067	18.405	102.420	14.257	181.679
Prob	*0.000*	*0.001*	*0.071*	*0.001*	*0.000*	*0.018*	*0.000*	*0.000*	*0.004*	*0.133*	*0.587*	*0.000*	*0.000*	*0.001*	*0.000*
ADF test[1]															
ϕ	-0.166	-0.161	-0.200	-0.150	-0.319	-0.237	-0.276	-0.153	-0.142	-0.160	-0.149	-0.169	-0.213	-0.255	-0.223
t-stat	-4.509	-4.288	-4.760	-4.265	-6.139	-5.487	-5.618	-4.259	-3.975	-4.036	-4.136	-4.346	-5.190	-5.705	-5.280
RADF test[2]															
θ	-0.172	-0.135	-0.101	-0.133	-0.210	-0.181	-0.151	-0.094	-0.099	-	-	-0.123	-0.166	-0.215	-0.159
τ_A	-5.092	-3.973	-2.715	-4.248	-4.444	-4.541	-3.699	-2.767	-3.151	-	-	-3.391	-4.539	-5.210	-4.386
t-stat : Kurtosis	4.223	7.569	8.746	4.787	9.169	6.969	12.666	7.277	7.751	-	-	7.139	8.725	4.116	8.703
t-stat : Skewness	2.426	2.640	0.252	1.398	1.107	2.021	-1.221	1.678	0.609	-	-	-0.004	4.858	1.032	-4.281

[1]: Test equation : $\Delta B_t = \phi B_{t-1} + \sum_{k=1}^{p} \psi_k \Delta B_{t-k} + u_t$

[2] Test equation : : $\Delta B_t = \theta B_{t-1} + \gamma \widehat{w}_t + \xi_t$ (see details in the appendix)

Critical value for τ_A : -3.54 at the 5% level (Sarno and Taylor 2003 for a sample size equal to 156 observations)

4.5. Testing for asymmetry in the bubble process

As shown by many authors (see for instance Evans 1991, Charemza and Deadman 1995, Van Norden and Vigfusson 1996, Waters 2008), linear unit root tests are unable to detect collapsing bubbles which only exhibit characteristic bubble properties during the expansion phase. Therefore, we implement two non linear unit root tests looking for asymmetry in the bubble process.

We first use a generalization of the Dickey-Fuller test proposed by Enders and Granger (1998) and Enders and Siklos (2001) that relies on a momentum threshold autoregressive (M-TAR) model. As shown by Bohl (2003) and Payne and Waters (2005), the M-TAR model is well suited when the adjustment exhibits more momentum in one direction than the other. This is the case for PCBs which increase exponentially until they reach a certain threshold level and suddenly collapse.

The M-TAR equation for the bubble component of millet price (*B*) is given by:

$$\Delta B_t = (1 - I_t)\rho_1 B_{t-1} + I_t \rho_2 B_{t-1} + \sum_{i=1}^{l} \gamma_i \Delta B_{t-i} + \varepsilon_t \qquad (11)$$

I_t is an indicator function that depends on the level of ΔB_{t-1}:

$$I_t = \begin{cases} 1, & if \quad \Delta B_{t-1} \geq \tau \\ 0, & if \quad \Delta B_{t-1} < \tau \end{cases}$$

τ is the unknown threshold value. ε_t is an iid process with zero mean and constant variance.

The M-TAR model allows the speed and direction of adjustment, ϱ_1 and ϱ_2, to depend on the previous period's change in B_t. Following Payne and Waters (2007), our test strategy is based on the test of the null hypothesis of symmetry when the null hypothesis of unit root is rejected. The rejection of the null hypothesis of symmetric adjustment with $|\varrho_2| > |\varrho_1|$ is evidence for the presence of a periodically collapsing bubble. Bohl (2003) demonstrated that this test has sufficient power to detect asymmetry when the DGP is given by the Evans' bubble model. If the estimated coefficient, ϱ_2, is statistically significant and negative, and larger in absolute terms than ϱ_1, there is evidence of a sharp correction when prices rise above a certain threshold relative to their fundamentals.

The threshold value τ is estimated using the Chan (1993) procedure, searching over all potential threshold values so as to minimize the sum of squared errors from the fitted model. The lag length is selected according to the Akaike information criterion.

Under the null hypothesis of a unit root in B_t, $\varrho_1 = \varrho_2 = 0$. The distribution for the test statistic is not standard; the critical values are provided by Enders and Granger (1998) and Enders and Siklos (2001). The null hypothesis of symmetry is tested by the restriction, $\varrho_1 = \varrho_2$ using the usual F-statistics (Φ).

The M-TAR estimation results (Table 4.3) lead to the rejection of the unit root hypothesis for all series. The *F* tests reject symmetry of adjustment at the 5% confidence level for six markets: Dogondoutchi, Filingué, Goudoumaria, Gouré, Tahoua and Zinder. As a consequence, the presence of speculative bubbles cannot be rejected for these markets. We note that symmetry of adjustment is rejected at the 10% confidence level for three other markets: Dosso, Gaya and N-Guimi. Symmetry of adjustment is also rejected for Maradi and Katako, but the coefficients ϱ_1 and ϱ_2 do not satisfy the condition $|\varrho_2| > |\varrho_1|$. These results, therefore, do not provide evidence for speculative bubbles on the Maradi and Katako markets.

TAB. 4.3-Results from the M-TAR model

	Agadez	Diffa	Dogondoutchi	Dosso	Filingué	Gaya	Goudoumaria	Gouré	Katako	Loga	Maradi	N'Guimi	Tahoua	Tillabéri	Zinder
ρ_1	-0.124	-0.190	-0.143	-0.093	-0.226	-0.167	-0.154	-0.040	-0.190	-0.169	-0.198	-0.124	-0.097	-0.286	-0.129
t-stat	-2.471	-4.362	-3.067	-1.951	-3.342	-2.805	-2.439	-0.816	-4.540	-3.684	-4.802	-2.698	-1.568	-4.562	-2.319
ρ_2	-0.218	-0.076	-0.404	-0.220	-0.479	-0.315	-0.461	-0.277	-0.016	-0.118	-0.003	-0.286	-0.303	-0.222	-0.350
t-stat	-4.003	-1.021	-4.463	-4.218	-5.934	-5.035	-6.141	-5.443	-0.240	-1.598	-0.040	-3.892	-5.580	-3.465	-5.470
R^2 adj	0.087	0.081	0.120	0.085	0.187	0.126	0.171	0.116	0.081	0.068	0.090	0.092	0.128	0.125	0.133
threshold	3.714	12.893	11.977	1.526	10.249	5.800	13.239	4.483	10.958	8.209	6.463	13.176	3.347	2.387	5.069
F-tests															
Φ	1.621	1.768	6.566	3.249	5.811	2.953	9.776	11.397	4.697	0.334	5.676	3.484	6.334	0.507	6.818
proba	0.204	0.185	0.011	0.073	0.017	0.087	0.002	0.001	0.031	0.564	0.018	0.063	0.013	0.477	0.010
$\rho_1=\rho_2=0$	11.067	10.033	14.663	10.802	23.193	16.611	21.829	15.147	10.335	8.062	11.529	11.213	16.800	16.411	17.647
No. obs	224	217	209	224	198	224	207	224	224.000	208	224	212	224	224	224

Critical values for H_0: $\rho_1 = \rho_2 = 0$: 5.58 (10 %); 6.62 (5%); 8.82 (1%) (Enders and Siklos, 2001).

An alternative test for asymmetry in the bubble process is given by the Markov switching ADF (MS-ADF) tests developed by Hall *et al.* (1999). This test is based on a two states Markov switching Model allowing for the possibility of two regimes in the data generating process: the data are non-stationary in one regime and stationary in the other, collapsing back towards the fundamental solution. The probability of observing the collapsing regime is assumed to follow a first order Markov process. Evidence that one regime is non-stationary, possibly with an explosive root, while the other is stationary, indicates the presence of a bubble.

The Markov Switching specification, with a stochastic transition from one state to the other, is less restrictive than the M-TAR model, but more than the original model of Evans, where the transition from one state to the other is deterministic, depending on the bubble growth rate. However, the main advantage of the Markov switching model compared to the M-TAR model is to allow for a non-stationary regime.

The Markov switching ADF test equation is given by (12):

$$\Delta B_t = \mu_0(1-S_t) + \mu_1 S_t + [\beta_0(1-S_t) + \beta_1 S_t]B_{t-1} + \sum_{k=1}^{p}[\psi_{0k}(1-S_t) + \psi_{1k}S_t]\Delta B_{t-k} + [\sigma_0(1-S_t) + \sigma_1 S_t]e_t \quad (12)$$

with $e_t \sim N(0,1)$

where S_t is a discrete-valued random variable that can take two values (0 or 1). If $S_t = 0$, the process is in regime 1; if $S_t = 1$, the process is in regime 2. The random sequence $\{S_t\}$ is specified as a homogeneous Markov chain (see Hamilton 1994) with transition probabilities:

$$\Pr\{S_t=1|S_{t-1}=1\}=p;\ \Pr\{S_t=0|S_{t-1}=1\}=1-p;$$
$$\Pr\{S_t=0|S_{t-1}=0\}=q;\ \Pr\{S_t=1|S_{t-1}=0\}=1-q \quad (13)$$

This specification allows all parameters, including the variance of the residual term, to vary according to the regime. The bubble process is expected to be non-stationary, possibly with an explosive root ($\beta_0 \geq 0$), in one regime, and stationary in the other ($\beta_1 < 0$)[80]. The unit root test is based on the t-ratios associated with the maximum likelihood estimates of β_0 and β_1. The null hypotheses $\beta_0=0$ and $\beta_1=0$ are tested against the one-sided alternative $\beta_0>0$, and $\beta_1<0$, respectively. Since the null distribution of the test statistics is unknown, simulated critical values are obtained by parametrically bootstrapping the null model (corresponding to $\beta_0=\beta_1=0$) using the estimates of μ_0, μ_1, ψ_{0k}, ψ_{1k}, σ_0 and σ_{1t}. Estimation results are given in Table 4.4.[81,82].

[80] By convenience the non stationary regime is set to be regime 1 and the stationary regime is set to be regime 2.
[81] MS-ADF test cannot be computed for series with missing values.
[82] Estimations have been performed using the Matlab toolbox: MS_Regress. See: Perlin, M. (2010), "MS_Refgress–the MATLAB Package for Markov regime Switching Models", available at: SSRN: http://ssrn.com/abstract=1714016

TAB. 4.4-Results from the Markov-switching ADF test

	Agadez	**Maradi**	**Zinder**	**Dosso**	**Gaya**	**Tillabéri**	**Katako**	**Goure**	**Tahoua**
β_0	-0.088	-0.023	-0.088	-0.009	-0.035	-0.266	-0.0038	0.032	0.0256
(t-stat)	(-2.258)	(-0.751)	(-2.631)	(-0.250)	(-0.908)	(-6.027)	(-0.129)	(0.330)	(0.610)
β_1	-0.298**	-0.852*	-0.630	-0.333**	-0.515**	-0.668**	-0.562**	-0.64***	-0.923**
(t-stat)	(-4.263)	(-4.423)	(-2.830)	(-3.845)	(-4.806)	(-10.812)	(-4.171)	(-19.36)	(-11.99)
μ_0	-3.222			-1.997		-1.602			1.062
(t-stat)	(-3.916)			(-2.644)		(-1.676)			(1.002)
μ_1	5.987			4.515		48.127			-2.095
(t-stat)	(2.852)			(1.773)		(15.581)			(-0.739)
σ^2_1	46.513	92.533	101.745	47.194	108.148	180.430	60.303	109.937	175.666
(t-stat)	(6.066)	(7.951)	(10.909)	(7.153)	(6.905)	(9.714)	(8.842)	(6.845)	(7.784)
σ^2_2	351.747	284.232	1659.485	436.003	829.100	36.797	460.400	235.501	141.595
(t-stat)	(6.970)	(1.779)	(3.454)	(6.371)	(5.743)	(1.314)	(4.204)	(2.819)	(2.771)
p	0.80	0.31	0.93	0.73	0.81	0.98	0.84	0.86	0.89
(P-value)	(0.00)	(0.08)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)	(0.00)
q	0.74	0.88	0.20	0.51	0.58	0.45	0.26	0.48	0.54
(P-value)	(0.00)	(0.00)	(0.33)	(0.00)	(0.00)	(0.09)	(0.04)	(0.00)	(0.00)
Log likelihood									
	-888.157	-873.014	-884.296	-886.130	-953.400	-917.674	-854.070	-889.367	-919.769
Expected duration of regimes (months):									
Regime 1	4.99	8.47	14.93	3.73	5.21	46.72	6.31	7.02	8.85
Regime 2	3.89	1.46	1.26	2.05	2.39	1.81	1.34	1.92	2.18
Critical value for β_0 t-stat									
10%	1.455	3.763	2.400	1.296	2.397	2.412	1.680	3.389	2.719
5%	1.849	4.423	4.615	1.924	3.675	4.898	2.486	4.578	4.085
1%	3.746	7.553	13.045	5.233	10.649	12.105	4.926	10.050	8.701
Critical value for β_1 t-stat									
10%	-2.919	-3.898	-3.084	-3.008	-2.975	-1.977	-2.632	-3.981	-4.297
5%	-3.391	-5.579	-5.149	-3.825	-3.936	-7.467	-3.554	-4.914	-5.161
1%	-6.463	-13.903	-9.584	-7.040	-13.466	-14.801	-7.214	-12.546	-13.529

Critical values calculated from parametric bootstrap with 500 replications

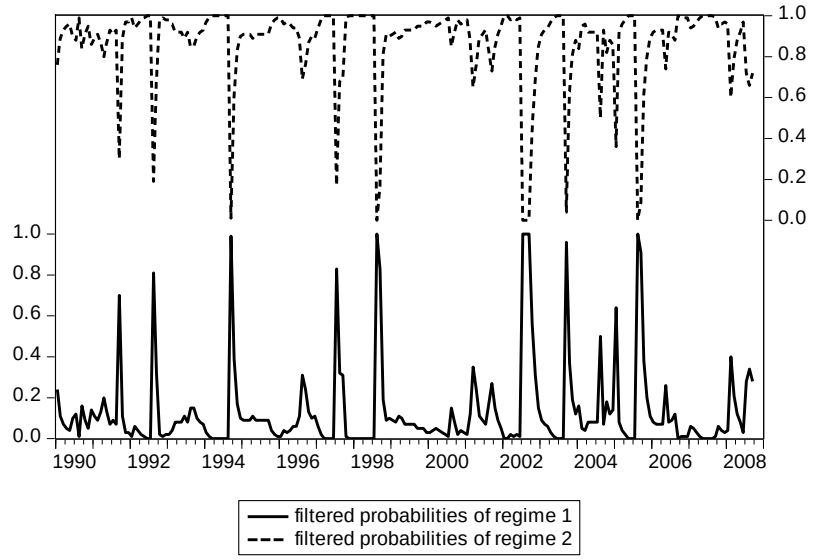
The results in Table 4.4 show two distinct regimes - a unit root regime (regime 1), and a stationary regime (regime 2). In the unit root regime, the coefficient β_0 is close to zero, but negative, except for the bubble processes in Goure and Tahoua. In this regime, t-stats are well above standard values. However, comparing these test statistics to bootstrap critical values, the unit root null hypothesis cannot be rejected for the explosive root alternative for any market.

Regime 2 captures the collapsing phase of bubbles. In this regime, the coefficient β_1 is large in absolute value, indicating a sharp correction in millet price disequilibria. The unit root null hypothesis is rejected for the stationary alternative at the 1% level for Gouré, Tahoua and Tillaberi, and at the 10 % level for the other markets, except for Zinder.

The unit root regime dominates over the whole period. On average, this regime lasts for seven months. The expected duration of the collapsing regime is short, lasting about two months on average. This regime is also characterised by a higher volatility (except for Tillaberi) than the non-stationary regime.

As an illustration, Figure 4.4 depicts the inferred probabilities of being in each regime for the bubble process in Gaya. The model clearly identifies five periods of collapse in the bubble process[83] - September 1994, August 1998, July-September 2002, September 2003 and August 2005. These periods of collapse are roughly the same for the other markets.

FIG. 4.4-Probabilities of expanding and collapsing regimes in Gaya



Results from the switching ADF tests corroborate the previous ones derived from the M-TAR model. They show strong evidence of collapse episodes, but detect only weak evidence of explosive root, with the exception of two series, Goure and Tahoua, both of which present the two salient characteristics of periodically collapsing bubbles. By contrast, the Tillaberi series, which are stationary in both regimes, do not present any bubble characteristics. Results for the other markets are more divergent.

[83] With a probability of being in the collapsing regime larger than 0.95.

The failure of switching ADF tests to detect periods of explosive behaviour in the bubble component of millet prices may be due to the short-lived nature of bubbles. This relates to the low number of observations from explosive periods relative to the total sample size. The tests conducted in the next part of the chapter address this issue.

4.6. Testing for explosive behaviour in the bubble component

Focusing on the expansion phase of bubbles, we implant the rolling ADF test developed by Phillips *et al.* (2009). The rolling ADF test can be used to detect explosive behaviour and the location of the starting and ending dates of the bubble. It is expected to perform better than the previous tests in detecting short-lived bubbles.

The procedure consists of testing iteratively the unit root null hypothesis against the right-tailed alternative hypothesis of explosive process. The test equation is given by (14):

$$\Delta B_t = \mu + \delta B_{t-1} + \sum_{j=1}^{J} \phi_j \Delta B_{t-j} + \varepsilon_t \qquad \varepsilon_t \sim \text{NID}(0,\sigma^2) \tag{14}$$

The unit root null hypothesis is H_0: $\delta = 1$; the right-tailed alternative hypothesis is H_1: $\delta > 1$.

Under the rolling ADF test procedure, equation (14) is estimated repeatedly on a rolling subsample of size *n*. The first subsample includes the first observation to the n^{th} observation. The second subsample includes the second observation to the $(n+1)^{th}$ observation. The ADF_r statistic is computed for each rolling subsample. In order to detect short-lived bubbles the test is implemented for low subsample sizes, keeping in mind that coefficients may be poorly estimated when the sample size is too small.

The beginning date and the collapse date of the explosive process can be identified comparing the rolling ADF test statistics with corresponding critical values. The bubble phase is given by the consecutive time intervals during which the ADF test statistic is significant. More precisely, we consider that the ending date of a bubble is given by the last observation of the sample corresponding to the most significant test statistic. The origination date of the bubble will be the first observation of the sample corresponding to the smaller but significant test statistic. The critical values for each subsample size are computed using Monte Carlo simulations with 100,000 replications (see Appendix A4.2). Test results are reported in Table 4.5 and in Figure A4.1 in the appendix.

TAB. 4.5-Most significant ADF statistics

	AR(1) (tstat)	Bubble period	Sub-sample size
Agadez	0.114**	2003/07 – 2005/08	n = 25
	(0.831)		
	0.039	1995/05 – 1998/08	n = 40
	(0.409)**		
Diffa	0.054	1994/10 – 1998/06	n = 45
	(0.513)**		
Dogondoutchi	0.148	1998/12 – 2002/08	n = 45
	(0.934)**		
Dosso	ns		
Filingué	0.101	2003/08 – 2005/08	n = 25
	(0.816)**		
Gaya	ns		
Goure	0.228	1996/08 – 1998/08	n = 25
	(2.193)***		
Katako	ns		
Loga	0.062	2002/10 -2005/08	n = 35
	(0.586)**		
Maradi	ns		
N'Guimi	0.055	2003/07 – 2005/07	n = 25
	(0.574)**		
Tahoua	0.091	2002/10 – 2005/08	n = 35
	(0.968)**		
	0.039	1994/11 -1998/07	n = 45
	(0.445)**		
Tillaberi	ns		
Zinder	0.115**	1994/12 – 1998/08	n = 45
	(0.713)		

***: significant at the 5% level; ***: significant at the 1% level;*
Lag length selection according to Schwartz information criterion.
ns: non significant

Table 4.5 gives the estimated coefficient (δ), and the corresponding *t*-statistic, for the most significant ADF test, and for different sub-sample sizes. Rolling ADF tests for n=25 do not reject the null of unit root in favour of the right-tailed alternative at the 5% significance level for 5 markets - Dosso, Gaya, Katako, Maradi and Tillaberi. According to these results, there is no significant evidence of speculative bubbles in Niger's main markets. Maradi, Dosso, and Gaya are major markets located in the main producing region; Katako is the main market of the capital, Niamey. Tillaberi is a smaller market, located in a producing region of the western part of Niger, not far from the border of Mali and Burkina Faso.

However, three periods of speculative behaviour can be detected on the other markets. First, Agadez, Filingué and N'Guimi have experienced short-lived bubbles during the 2003-2005 period, while Loga and Tahoua experienced a more persistent bubble episode (from October 2002 to August 2008). Second, Agadez, Diffa, Tahoua and Zinder experienced persistent bubbles during the period running from October 1994 to August 1998, while Gouré experienced a shorter episode of bubble from August 1996 to August 1998. Finally, Dogondoutchi experienced a long bubble episode during 1999 to 2002.

These results support the previous asymmetry test results that detected collapsing phases for Dogondoutchi, Filingué, Gouré, Tahoua, Zinder, and to a lesser extent N'Guimi, but did not show evidence of collapsing phases for Maradi, Katako, Dosso, Gaya and Tillaberi. Results are less clear for Agadez, Diffa, and Loga,with the rolling ADF test detecting expanding phases and the asymmetry test reporting no collapse phases.

4.7. Concluding remarks

Econometric tests do not reject the existence of speculative bubbles of the PCB type for some of the markets under study. According to these results, the 2005 food crisis may be partly caused by speculative behaviour in Agadez, Filingué, Loga, N'Guimi and Tahoua. However, 1994-1998 should be considered as a more important period of speculation; bubbles detected on five markets during this period tend to be more persistent.

Most of the markets that have experienced a bubble episode are located in deficit and remote areas with low income. This is particularly the case for N'Guimi and Diffa, which are both located in a poor region of the eastern part of the country, close to the Chad border. However, bubbles have also been detected in markets that are located in better-off areas in terms of geo-climatic and socio-economic conditions. This is the case of Dogondoutchi, Filingué, Gouré, Loga and Zinder (an important urban centre in the southern part of Niger).

The most important findings concern the main millet markets of Niger which are Niamey (Katako), Maradi, Gaya and Dosso. The tests for asymmetry and for explosiveness in bubble process converge to reject the presence of rational speculative bubbles on these markets at the usual confidence level. This provides evidence that speculative behaviour should not be considered a widespread phenomenon in Niger, nor a source of major food crises.

The results are of particular relevance for the definition of the food security policy in Niger. Actions targeted at deficit and low income areas, which are more prone to speculation, should be undertaken. To that end, a trade expansion program aiming at reducing barriers to trade within the country should be considered a priority.

The limits of this type of analysis are well-known. The tests for speculative bubbles are joint hypothesis tests of an asset price model, and of the presence of bubbles. As a consequence, apparent evidence for bubbles can indicate a mis-specification of the market fundamentals. Also, rejection of the presence of partially collapsing rational bubbles does not rule out the possibility of other types of speculative bubbles.

As a robustness check, the analysis has been repeated using alternative specifications for the fundamental value of millet. First, the international price of rice has been introduced in the millet fundamental equation to take into account possible substitution effects at the consumption level between local and imported cereals. This price is never significant in our specifications. Second, millet production has been introduced in the fundamental equation instead of the cumulative rainfall variable. The results are unchanged, except for N'Guimi which does not exhibit bubble characteristics anymore. Lastly, we note that ADF type tests are invariant to linear transformations of the series. Therefore a mis-specification of the bubble's level does not alter the unit root tests.

Appendix

TAB. A4.1-Unit root tests**.** Sample period: January 1990 to October 2008

Region	Market	Min	Max	Mean	No of Obs.	ADF P.value	KPSS LM-Stat
Millet price (Fcfa/kg) in:							
Agadez	Agadez	52	337	134	226	0,00	0,12
Diffa	Diffa	41	328	138	221	0,00	0,09
Diffa	Goudoumaria	45	371	131	215	0,02	0,08
Diffa	Nguimi	55	333	148	218	0,01	0,06
Dosso	Dogondoutchi	48	270	114	217	0,00	0,08
Dosso	Dosso	58	329	139	226	0,00	0,11
Dosso	Gaya	42	315	124	226	0,00	0,10
Dosso	Loga	50	279	123	216	0,00	0,07
Maradi	Maradi	39	261	104	226	0,00	0,12
Tahoua	Tahoua	54	369	144	226	0,00	0,11
Tillaberi	Filingue	51	326	129	210	0,00	0,09
Tillaberi	Tillaberi	58	306	145	226	0,00	0,11
Zinder	Goure	52	319	118	226	0,00	0,08
Zinder	Zinder	40	312	109	226	0,00	0,12
Niamey	Katako	71	324	141	226	0,00	0,09
CPI (100 = 2005.05)		56.2	133	93.7	226	0.31	0.237
Δ(CPI)		-4.42	9.42	0.28	226	0.00	0.08
Gasoline (Fcfa/l)		210	670	363.3	226	0.24	0.34
Δ(Gasoline)		-75	130	1.91	226	0.00	0.20

ADF test: H_0: I(1) ; KPSS : H_0: I(0). Tests implemented on current price values.

Source: SIMA and authors' calculations.

TAB. A4.2-Simulated critical values for the rolling ADF test

	n=25	n=35	n=45
1 percent	1.196	1.155	1.119
5 percent	0.412	0.380	0.357
10 percent	0.012	-0.026	-0.040

ADF test with no constant and no trend
n: sample size
No. of replications: 100,000

The Residual Augmented Least Squares Dickey-Fuller test (RALS Dickey Fuller or RADF test)

The Residual Augmented Least Squares (RALS) Dickey-Fuller test developed by Taylor and Peel (1998) is robust to skewness and kurtosis in the distribution of the residual term and is more powerful in detecting periodically collapsing bubbles. The RADF test equation is given by:

$$\Delta B_t = \theta B_{t-1} + \gamma w_t + \zeta_t \quad \text{(A1)}$$

where $\hat{u}_t$ are the residuals of the standard DF equation (A2):

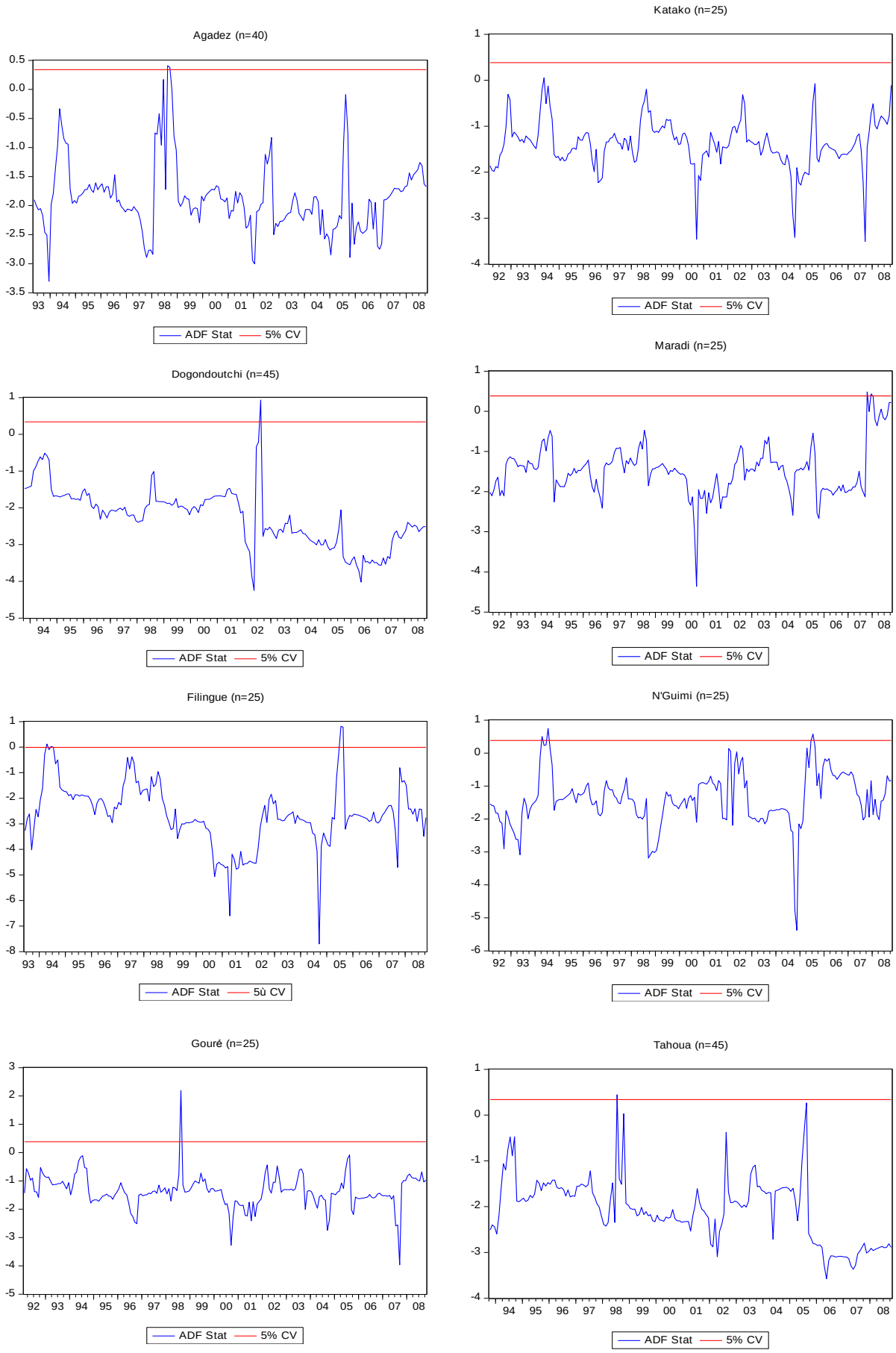
$$\Delta B_t = \phi B_{t-1} + u_t \quad \text{(A2)}$$

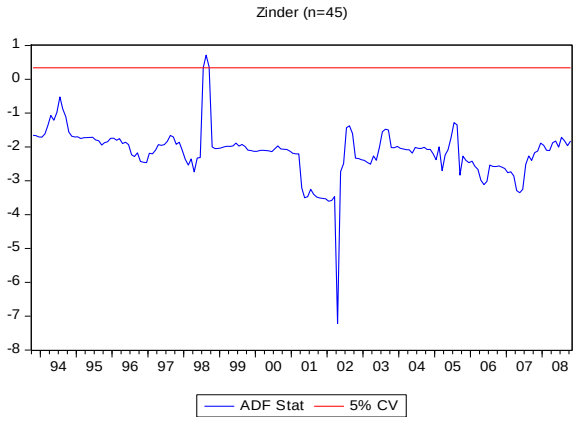
and $\widehat{w}_t = \left[(\hat{u}_t^3 - 3\hat{\sigma}^2\hat{u}_t),\ (\hat{u}_t^2 - \hat{\sigma}^2\right]$. The vector $\widehat{w}_t$ corrects the estimate of θ for skewness and excess kurtosis of the residuals. $\hat{\sigma}^2$ is the estimated variance of u_t; ζ_t is white noise.

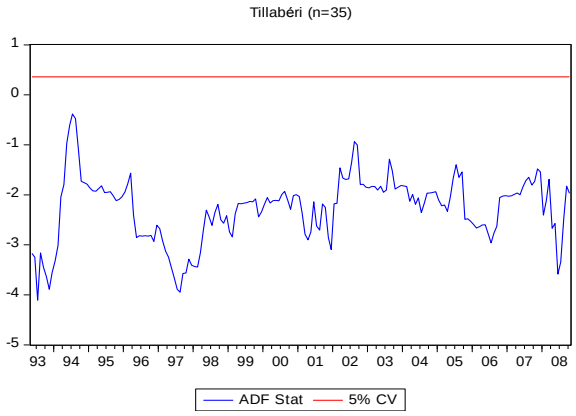
The test statistic is $\tau_A = \hat{\theta} / \sqrt{Var(\hat{\theta})}$

$\hat{\theta}$ is the estimated coefficient in Eq. (12); $Var(\hat{\theta})$ is the variance-covariance matrix of which expression is given by Sarno and Taylor (2003) as well as the critical values for τ_A.

FIG. A4.1-Rolling ADF test result




Zinder (n=45)
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
94 95 96 97 98 99 00 01 02 03 04 05 06 07 08
ADF Stat
5% CV


Tillabéri (n=35)
1
0
-1
-2
-3
-4
-5
93 94 95 96 97 98 99 00 01 02 03 04 05 06 07 08
ADF Stat
5% CV

Conclusion générale

Cette thèse porte sur la façon d'améliorer les connaissances et l'utilisation de données climatiques en économie du développement. Elle mobilise une approche multidisciplinaire, pour utiliser en complément de l'économie les apports d'autres disciplines notamment la géographie, la météorologie, mais aussi la santé et la finance. Elle élabore et exploite des bases de données climatiques ensuite utilisées pour les analyses macroéconomiques et microéconomiques. L'information climatique ainsi valorisée, permet une analyse originale de la vulnérabilité au changement climatique (**partie 1 : Construire une base de données sur le climat pour mesurer la vulnérabilité à son changement**) ou de la sécurité alimentaire (**partie 2 : Evaluer l'impact des chocs pluviométriques sur la sécurité alimentaire**).

La première partie fournit une nouvelle base de données climatiques des pays au niveau mondial pour la période 1900-2008 puis présente la construction d'un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique à partir de cette nouvelle base. Elle répond à un double objectif : procurer des données climatiques nouvelles permettant de renouveler les analyses macroéconomiques et guider l'allocation de l'aide pour l'adaptation au changement climatique.

Le **chapitre 1** présente une nouvelle base de données climatiques nationales. Après avoir passé en revue la littérature des différentes bases climatiques existantes, nous construisons une nouvelle base de données climatiques disponible pour 189 pays au niveau mensuel pendant la période 1900-2008. Nous proposons ensuite différents indicateurs de climat ou de variabilité climatique construits à partir de cette nouvelle base et pouvant être exploités dans des études macroéconomiques.

Le **chapitre 2** répond au problème de l'allocation des ressources d'aide à l'adaptation au changement climatique. Son originalité réside dans l'application à la question environnementale du concept économique de vulnérabilité. Il présente la construction d'un indicateur de vulnérabilité physique au changement climatique. Disponible pour près de 200 pays, il a pour vocation d'être un outil d'aide à l'allocation des ressources pour l'adaptation. Cet indicateur met ainsi en évidence une plus grande vulnérabilité au changement climatique de pays déjà vulnérables économiquement tels que les Pays les Moins Avancés (PMA).

La seconde partie de cette thèse a pour but d'alimenter les connaissances concernant les crises alimentaires, plus particulièrement pour les pays d'Afrique de l'Ouest. Portant respectivement sur le Burkina Faso et le Niger, les chapitres 3 et 4 fournissent des résultats complémentaires sur les mécanismes sous-jacents à une situation de crise. Dans ces deux chapitres, l'information climatique est utilisée pour pallier le manque de données précises sur le revenu des ménages ou les quantités de production céréalières.

Le **chapitre 3** étudie l'état de santé des enfants de moins de cinq ans suite à des épisodes de sécheresse. Les déficits pluviométriques sont considérés comme de bonnes approximations des chocs de revenu des ménages ruraux. Les enfants subissant un choc même peu important durant leurs premières années de vie présentent un score de nutrition (z-score) en moyenne plus faible. Les résultats de l'étude peuvent servir à améliorer le ciblage de l'aide alimentaire. Il est à noter qu'ils ne font pas apparaître de différence de genre dans ces zones. De plus, les enfants de moins d'un an étant les plus vulnérables il semble important qu'ils soient les premiers bénéficiaires de l'aide alimentaire d'urgence et qu'ils fassent l'objet d'un suivi spécifique même en cas de faible perte de récolte puisque les petits déficits pluviométriques affectent leur statut nutritionnel de long terme.

Finalement, le **chapitre 4** montre la présence de bulles spéculatives sur certains marchés céréaliers nigériens. Dans ce chapitre, une valeur fondamentale du prix du mil est calculée notamment à partir de données pluviométriques fournissant une approximation des chocs d'offre de céréales. Puis définissant la bulle comme l'écart entre le prix et sa valeur fondamentale, nous étudions les propriétés statistiques de cet écart afin de mettre en évidence la présence de bulles spéculatives. Ce chapitre fournit de nouvelles clés pour comprendre les phénomènes de hausse de prix déconnectés de l'offre céréalière. Une meilleure intégration des marchés et une plus large diffusion des informations concernant aussi bien la production que les conditions météorologiques devraient permettre d'éviter en partie ces mouvements spéculatifs.

En plus des recommandations politiques propres à chacun de ces chapitres, cette thèse préconise une meilleure compréhension de l'information climatique tant au niveau des sciences économiques que de l'économie réelle. Elle préconise une large diffusion des données climatiques qui sont de véritables enjeux stratégiques et économiques. Correctement utilisées et disséminées, ces données peuvent en effet :

- aider à l'allocation de l'aide pour l'adaptation au changement climatique,

- produire des signaux aux marchés céréaliers et concourir ainsi à leur meilleur fonctionnement,

- participer aux anticipations des agents économiques et à leurs prises de décisions (notamment des agriculteurs).

En complément de ce travail, les récents travaux concernant les assurances climatiques aux agriculteurs (Barnett et Mahul 2007, Barnett *et al.* 2008, Clarke *et al.* 2012) ou l'évaluation économique de la valeur des prévisions météorologiques (Ritter *et al.* 2011) devraient permettre des améliorations majeures des systèmes agricoles dans les pays en développement. De plus, ces recherches s'intègrent parfaitement au concept d'une *« climate smart agriculture*[84] *»* telle qu'elle a été réclamée lors de la 17e Conférence des Parties (COP-17) en décembre 2011 par l'Organisation de Nations Unies pour l'Alimentation et l'Agriculture (FAO) à Durban. À cette occasion l'organisation internationale a soumis de nombreuses propositions visant à relever « *three challenges of ensuring food security, adapting to climate change and contributing to mitigate climate change have to be considered at the same time »*[85] [86]. Elle a ainsi défendu la mise en place de

[84] Définie comme une agriculture qui « augmente la productivité de façon durable, la résilience (adaptation), réduit/élimine les émissions de Gaz à Effet de Serre (GES – atténuation) et aide à l'atteinte de la sécurité alimentaire et des objectifs du développement » (FAO 2010). Cette définition rappelle l'agriculture « écologiquement intensive » recommandée par Griffon (2006, 2010).

[85] « Trois enjeux que sont : assurer la sécurité alimentaire, l'adaptation au changement climatique, et l'atténuation des effets du changement climatique qui doivent être considérées ensemble ».

politiques permettant à la fois la sécurité alimentaire, l'adaptation et l'atténuation au changement climatique. L'organisation internationale réclame également dans cette résolution une coopération internationale en termes de recherche et de capacité de développement liant agriculture, sécurité alimentaire et changement climatique. En ce sens, cette thèse constitue bien une première étape vers l'étude des liens entre sécurité alimentaire et changement climatique grâce à des données climatiques objectives et justement utilisées.

[86] Submission by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) on issues related to agriculture, as outlined in paragraph 69 and 70 of the Outcome of the work of the Ad Hoc Working Group on long-term cooperative action under the Convention, disponible sur le site de l'UNFCCC, consulté en avril 2012: http://unfccc.int/resource/docs/2012/smsn/igo/73.pdf

Bibliographie

ACEMOGLU, D., AND J.A. ROBINSON (2010): 'Why is Africa Poor', *Economic History in Developing Regions*, 25(1), 21-50.

ACEMOGLU, D., S. JOHNSON, AND J.A. ROBINSON (2001): 'The Colonial Origins of Comparative Development: An Empirical Investigation', *American Economic Review*, 91(5), 1369-1401.

ADGER, W.N. (1999): 'Social Vulnerability to Climate Change and Extremes in Coastal Vietnam', *World Development*, 27(2), 249-269.

ADGER, W.N. (2006): 'Vulnerability', *Global Environmental Change*, 16(3), 268-281.

ADGER, W.N., AND N. BROOKS, N. (2003): 'Does environmental change cause vulnerability to natural disasters?', in Pelling (ed.), *Natural Disasters and Development in a Globalizing World*, Routledge, London, UK.

ADGER, W.N., N. BROOKS, G. BENTHAM, M. AGNEW, AND S. ERIKSEN (2004): 'New Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity', Technical Report Number 7. Tyndall Center for Climate Research, Norwich, UK.

ADLER, R.F., G.J. HUFFMAN, A. CHANG, R. FERRARO, P. XIE, J. JANOWIAK, B. RUDOLF, U. SCHNEIDER, S. CURTIS, D. BOLVIN, A. GRUBER, J. SUSSKIND, AND P. ARKIN (2003): 'The Version 2 Global Precipitation Climatology Project (GPCP) Monthly Precipitation Analysis (1979-Present)', *Journal of Hydrometeorology*, 4(6), 1147-1167.

AKER, J. (2010): 'Chocs pluviométriques, marchés et crises alimentaires: l'effet de la sécheresse sur les marchés céréaliers au Niger', *Revue d'Economie du Développement*, 24(1), 71-108.

AKRESH, R., T. BUNDERVOET, AND P. VERWIMP (2009): 'Health and Civil War in Rural Burundi', *Journal of Human Resources*, 44(2), 536-563.

AKRESH, R., L. LUCCHETTI, AND H. THIRUMURTHY (2010): 'Wars and Child Health: Evidence from the Eritrean-Ethiopian Conflict', HiCN Working Papers 89, Households in Conflict Network.

AKRESH, R., P. VERWIMP, AND T. BUNDERVOET (2011): 'Civil War, Crop Failure, and Child Stunting in Rwanda', *Economic Development and Cultural Change,* 59(4), 777-810.

AKRESH, R., E. BAGBY, D. DE WALQUE, AND H. KAZIANG (2012): 'Child Labor, Schooling, and Child Ability', Policy Research Working Paper Series 5965, The World Bank.

ALDERMAN, H. (2011): *No Small Matter. The Impact of Poverty, Shocks and Human Capital Investments in Early Childhood Development*. World Bank, Washington DC.

ALDERMAN, H., AND T. HAQUE (2007): 'Insurance Against Covariate Shocks', Working Paper 95, Africa Human Development Series, World Bank.

ALDERMAN, H., J.R. BEHRMAN, V. LAVY, AND R. MENON (2001): 'Child Health and School Enrollment: A Longitudinal Analysis', *The Journal of Human Resources*, 36(1), 185-205.

ALDERMAN, H., J. HODDINOTT, AND B. KINSEY (2006): 'Long Term Consequences of Early Childhood Malnutrition', *Oxford Economic Papers,* 58(3), 450-474.

ALLEN, K. (2003): 'Vulnerability Reduction and the Community-Based Approach' in Pelling, M., (ed.), *Natural Disasters and Development in a Globalising World*. Routledge, London, 170-184.

ALMOND, D. (2006): 'Is the 1918 Influenza Pandemic Over? Long-term Effects of In Utero Influenza Exposure in the Post-1940 U.S. Population', *Journal of Political Economy*, 114(4), 672-712.

ARAUJO, C., C. ARAUJO BONJEAN, AND S. BRUNELIN (2012): 'Alert at Maradi: Preventing Food Crises by using Price Signals', *World Development*, 40(9), 1882-1894.

BAETTIG, M., M. WILD, AND D. IMBODEN (2007): 'A Climate Change Index: Where Climate Change May be Most Prominent in the 21st Century', *Geophysical Research Letters*, 34.

BANERJEE, A., E. DUFLO, G. POSTEL-VINAY, AND T. WATTS (2007): 'Long Run Health Impacts of Income Shocks: Wine and Phylloxera in 19th Century France', NBER Working Papers 12895, National Bureau of Economic Research, Inc.

BARKER, D.J.P. (1998): *Mothers, Babies, and Health in Later Life,* Churchill Livingstone, Edinburgh, U.K.

BARNETT, B. J, C. B. BARRETT, AND J. R. SKEES (2008): 'Poverty Traps and Index-Based Transfer Products', *World Development*, 36(10), 1766-1785.

BARNETT, B. J., AND O. MAHUL (2007): 'Weather Index Insurance for Agriculture and Rural Areas in Lower-Income Countries', *American Journal of Agricultural Economics*, 89(5), 1241-1247.

BARR, R., S. FANKHAUSER, AND K. HAMILTON (2010): 'Adaptation Investments: a Resource Allocation Framework', *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 15(8), 843-858.

BARRIOS, S., L. BERTINELLI, AND E. STROBL (2010): 'Trends in Rainfall and Economic Growth in Africa: A Neglected Cause of the Growth Tragedy', *Review of Economics and Statistics*, 92(2), 350-366.

BECK, C., J. GRIESER AND B. RUDOLF (2005): 'A New Monthly Precipitation Climatology for the Global Land Areas for the Period 1951 to 2000'. *Climate Status Report 2004*, German Weather Service, Offenbach, Germany, 181-190.

BECKER, G. (1965): 'A Theory of Allocation of Time', *Economic Journal*, 75(299), 493-517.

BECKER, G. (1981): *A Treatise of the Family*, Harvard University Press, Cambridge.

BEEGLE, K., R. DEHEJIA, AND R. GATTI (2006): 'Child Labor and Agricultural Shocks', *Journal of Development Economics,* 81(1), 80-96.

BEHRMAN, J.R., AND E. SKOUFIAS (2004): 'Correlates and Determinants of Child Anthropometrics in Latin America: Background and Overview of the Symposium', *Economics and Human Biology*, 2(3), 335-351.

BIRKMANN, J. (2006): 'Measuring Vulnerability to Promote Disaster resilient Societies: Conceptual Frameworks and definitions' in Birkmann, J. (ed.)*, Measuring Vulnerability to Natural Hazards-Towards Disaster Resilient Societies*, United Nations University Press, Tokyo, 9-54.

BIRKMANN, J. (2007): 'Risk and vulnerability indicators at different scales: Applicability, usefulness and policy implications', *Environmental Hazards*, 7(1), 20-31.

BIRKMANN, J., AND B. WISNER (2006): 'Measuring the Un-Measurable - The Challenge of Vulnerability', Source 05/ (2006): United Nations University, Institute for Environment and Human Security, Bonn.

BLAIKIE, P. M. (1994): *At risk: Natural Hazards, People's Vulnerability, and Disasters*, Routledge.

BLANCHARD, O.J. (1979): 'Speculative Bubbles, Crashes and Rational Expectations', *Economics Letters*, 3(4), 387-389.

BLANCHARD, O.J., AND M.W. WATSON (1982): 'Bubbles, Rational Expectations and Financial Markets', NBER Working Papers 945, National Bureau of Economic Research, Inc.

BLOOM, D.E., AND J.D. SACHS (1998): 'Geography, Demography, and Economic Growth in Africa', *Brookings Papers on Economic Activity*, 1998(2), 207-295.

BOGARDI, J., AND J. BIRKMANN (2004): 'Vulnerability Assessment: The first step towards a sustainable risk reduction' in Malzhan, D., and T. Plapp (ed.) *Disaster and Society- From Hazard Assessment to Risk Reduction*, Logos Verlag, Berlin, 75-82.

BOHL, M. T. (2003): 'Periodically Collapsing Bubbles in the US Stock Market?', *International Review of Economics and Finance*, 12(3), 385-397.

BROHAN, P., J. KENNEDY, I. HARRIS, S.F.B. TETT, AND P.D. JONES (2006): 'Uncertainty Estimates in Regional and Global Observed Temperature Changes: a New Dataset from 1850', *Journal of Geophysical. Research,* 111, D12106.

BROOKS, N. (2003): 'Vulnerability, Risk and Adaptation: A conceptual framework', Working Paper 38, Tyndall Centre Research for Climate Change, University of East Anglia, Norwich, UK.

BROOKS, N., W.N. ADGER, AND P.M. KELLY (2005): 'The Determinants of Vulnerability and Adaptive Capacity at the National Level and the Implications for Adaptation', *Global Environmental Change*, 15(2), 151-163.

BRÜCKNER, M. (2010): 'Identifying Least Developed Countries-the Role of Climate Change Vulnerability' Background note, Committee for development Policy Secretariat, unpublished.

BRÜCKNER, M., AND A. CICCONE (2007): 'Growth, Democracy, and Civil War', CEPR Discussion Papers 6568, C.E.P.R. Discussion Papers.

BRÜCKNER, M., AND A. CICCONE (2011): 'Rain and the Democratic Window of Opportunity', *Econometrica,* Econometric Society, 79(3), 923-947.

BUOB, S., AND G. STEPHAN (2011): 'To Mitigate or to Adapt: how to combat with global climate change', *European Journal of Political Economy,* 27(1), 1-16.

BURKE, M.B., E. MIGUEL, S. SATYANATH, J.A. DYKEMA, AND D. B. LOBELL (2009): 'Warming Increases the Risk of Civil War in Africa', Proceedings of the National Academy of Sciences, 106(49), 20670-20674.

BUYS, P., U. DEICHMANN, C. MEISNER, T.T. THAT, AND D. WHEELER (2007): 'Country Stakes in Climate Change Negotiations: Two Dimensions of Vulnerability', World Bank Policy Research Working Paper 4300, World Bank, Washington, DC.

CARDONA, O.D. (2003): 'The Need for Rethinking the Concepts of Vulnerability and Risk from a Holistic Perspective: a necessary review and criticism for effective risk management' in Bankoff, G., G. Frerks, and D. Hilhorst (ed.), *Mapping Vulnerability: Disasters, Development and People*, Inter-American Development Bank, Washington, D.C.

CHAN, K.S., (1993): 'Consistency and Limiting Distribution of the Least Squares Estimator of a Threshold Autoregressive Model*', Annals. Statistics,* 21(1), 520-533.

CHAREMZA, W.W., AND D.F. DEADMAN (1995): 'Speculative Bubbles with Stochastic Explosive Roots: The Failure of Unit Root Testing', *Journal of Empirical Finance*, 2(2), 153-163.

CHRISTIAENSEN, L., V. HOFMANN AND A. SARRIS (2007): 'Gauging the welfare effects of shocks in rural Tanzania', World Bank Policy Research Working Paper, 4406.

CLARKE, D.J.,O. MAHUL, K. N. RAO, AND N. VERMA (2012): ' Weather Based Crop Insurance in India', Policy Research Working Paper 5985, World Bank.

COMMITTEE FOR DEVELOPMENT POLICY AND DEPARTMENT OF SOCIAL AND ECONOMIC AFFAIRS (CDP) (2008): *Handbook on the Least developed Country Category: Inclusion, Graduation, and Special Measures*, United Nations.

CONWAY, D., C. MOULD AND W. BEWKET (2004): 'Over one century of Rainfall and Temperature Observations in Addis Ababa, Ethiopia', *International Journal of Climatology*, 24(1), 77-91.

CONWAY, D., E. ALLISON, R. FELSTEAD AND M. GOULDEN (2005): 'Rainfall Variability in East Africa: implications for natural resources management and livelihoods', *Philosophical Transaction. Series A*, 363(1826), 49-54.

CULLEN, S.L, H. M. DE MENOCAL, P. B. HEMMING, S. HEMMING, G. BROWN, F. H. GUILDERSON, AND T F. SIROCKO (2000): 'Climate Change and the Collapse of the Akkadian Empire: Evidence from the deep-sea', *Geology*, 28 (4), 379-382.

CUTTER, S.L., B.J. BORUFF, AND W.L. SHIRLEY (1996): 'Vulnerability to Environmental Hazards', *Progress in Human Geography*, 20(4), 529-539.

DAI, A., P.J. LAMB, K.E. TRENBERTH, M. HULME, P.D. JONES, AND P. XIE (2004): 'The Recent Sahel Drought is Real', *International Journal of Climatology*, 24(11), 1323-1331.

DAI, A., AND A.D. DEL GENIO (1997): 'Surface Observed Global Land Precipitation Variations during 1900-1988', *Journal of Climate*, 10(11), 29432962.

DASGUPTA, S., B. LAPLANTE, C. MEISNER, D. WHEELER, AND J. YAN (2009): 'The Impact of Sea Level Rise on Developing Countries: a Comparative Analysis', *Climatic Change*, 93(3-4), 379-388.

DE JANVRY, A., F. FINAN, E. SADOULET, AND R. VAKIS (2006): 'Can conditional cash transfer programs serve as safety nets in keeping children at school and from working when exposed to shocks?', *Journal of Development Economics,* 79(2), 349-373.

DE SCHUTTER, O. (2010): '*L'économie politique de la faim. Garantir le droit à l'alimentation dans un monde de de ressources rares'*, Leçon inaugurale du groupe ESA 2010, Angers.

DEATON, A. (1992): 'Saving and Income Smoothing in Cote d'Ivoire', *Journal of African Economies*, 1(1), 1-23.

DELL, M., B.F. JONES, AND B.A. OLKEN (2008): 'Climate Change and Economic Growth: Evidence from the Last Half Century', NBER Working Paper 14132, National Bureau of Economic Research, Inc.

DELL, M., B.F. JONES, AND B.A. OLKEN (2009): 'Temperature and Income: Reconciling New Cross-Sectional and Panel Estimates', *American Economic Association Papers and Proceedings*, 99(2), 198-204.

DERCON, S. (2004): 'Growth and shocks: evidence from rural Ethiopia', *Journal of Development Economics*, 74(2), 309-329.

DERCON, S., AND J. HODDINOTT (2003): 'Health, Shocks and Poverty Persistence', UNU-WIDER Research Paper, World Institute for Development Economic Research (UNU-WIDER).

DERCON, S., AND L. CHRISTIAENSEN (2011): 'Consumption Risk, Technology Adoption and Poverty Traps: Evidence from Ethiopia', *Journal of Development Economics*, 96(2), 159-173.

DERCON, S., J. HODDINOTT, AND T. WOLDEHANNA (2005): 'Shocks and Consumption in 15 Ethiopian Villages, 1999-2004', *Journal of African Economies*, 14(4), 559-585.

DESCHENES, O., AND E. MORETTI (2007): 'Extreme Weather Events, Mortality, and Migration', NBER Working Papers 13227, National Bureau of Economic Research, Inc.

DESCHENES, O., AND M. GREENSTONE (2007): 'The Economic Impacts of Climate Change: Evidence from Agricultural Output and Random Fluctuations in Weather', *American Economic Review*, 97(1), 354-385.

DIAMOND, J. (1997): 'Location, location, location: The first farmers', *Science,* 278, 1243-1244.

DIAMOND, J. (2005): *Collapse: How societies choose to fail or succeed*, Viking, New York.

DIBA, B.T., AND H. I. GROSSMAN (1987): 'On the Inception of Rational Bubbles', *The Quarterly Journal of Economics*, 102(3), 697-700.

DIBA, B.T., AND H. I. GROSSMAN (1988): 'Explosive Rational Bubbles in Stock Prices?', *The American Economic Review*, 78(3), 520-530.

DIFFENBAUGH, N., F. GIORGI, L. RAYMOND, AND X. BI (2007): 'Indicators of 21st century socioclimatic exposure', *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 104(51), 20195.

DOBBING, J. (1976): 'Vulnerable Periods in Brain Growth and Somatic Growth' in Roberts, D.F., and A.M. Thomson (ed.), *The Biology of Human Fetal Growth*, Taylor and Francis, London, 137-147.

DOWNING, T. E, AND A. PATWARDHAN (2005): 'Assessing Vulnerability for Climate Adaptation' in Lim, B., E. Spanger-Siegfried, I. Burton, E. Malone, and S. Huq (ed.), *Adaptation Policy Frameworks for Climate Change: Developing Strategies, Policies and Measures*, Cambridge University Press, Cambridge and New York, 67-90.

DOWNING, T., M. WATTS, AND H. BOHLE (1995): 'Climate Change and Food Insecurity: towards a Sociology and Geography of Vulnerability' in Downing, T. (ed.), *Climate Change and World Food Security,* Springer, Berlin, 183-206.

DURYEA, S., D. LAM, AND D. LEVISON (2007): 'Effects of Economic Shocks on Children's Employment and Schooling in Brazil', *Journal of Development Econonomics*, 84(1), 188-214.

EAKIN, H., AND A.L. LUERS (2006): 'Assessing the Vulnerability of Social-Environmental Systems', *Annual Review of Environment and Resources,* 31(1), 365-394.

EASTERLY, W., AND R. LEVINE (2003): 'Tropics, Germs, and Crops: how endowments influence economic development', *Journal of Monetary Economics*, 50(1), 3-39.

ENDERS, G.W., AND C.W.J. GRANGER (1998): 'Unit Root Tests and Asymmetric Adjustment with an Example Using the Term Structure of Interest Rates', *Journal of Business and Economic Statistics*, 16(3), 304-311.

ENDERS, G.W., AND P. SIKLOS (2001): 'Cointegration and Threshold Adjustment', *Journal of Business and Economic Statistics*, 19(2), 166-176.

ERIKSEN, S., AND P. KELLY (2007): 'Developing Credible Vulnerability Indicators for Climate Adaptation Policy Assessment', *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12 (4), 495-524.

ESTY, D.C., M. LEVY, T. SREBOTNJAK, AND A. DE SHERBININ (2005): *2005 Environmental Sustainability Index: Benchmarking National Environmental Stewardship*, Center for Environmental Law & Policy, New Haven, Yale.

EVANS, G. W. (1991): 'Pitfalls in Testing for Explosive Bubbles in Asset Prices', *American Economic Review*, 81(4), 922-930.

FANKHAUSER, S. (1995): *Valuing Climate Change: The Economics of the Greenhouse Effect,* Earthscan, London.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO) (2011): *L'état de l'insécurité alimentaire dans le monde Comment la volatilité des cours internationaux porte-t-elle atteinte à l'économie et à la sécurité alimentaire des pays?,* FAO 2011, Rome, Italie.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO) (2010): *"Climate-Smart" Agriculture: Policies, Practices and Financing for Food Security, Adaptation and Mitigation,* FAO 2010, Rome, Italie.

FERREIRA, F.H.G., AND N. SCHADY (2009): 'Aggregate Economic Shocks, Child Schooling and Child Health', *The World Bank Research Observer*, 24(2), 147-181.

FOLLAND, C.K., T.R. KARL, J.R. CHRISTY, R.A. CLARKE, G.V. GRUZA, J. JOUZEL, M.E. MANN, J. OERLEMANS, M.J. SALINGER, AND S.W. WANG (2001): 'Observed Climate Variability and Change', in Houghton, J.T. et al., *Climate Change (2001): The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK.

FOSTER, A.D. (1995): 'Prices, Credit Markets and Child Growth in Low-Income Rural Areas', *The Economic Journal,* 105(430), 551-570.

FÜSSEL, H. M. (2007): 'Vulnerability: a Generally Applicable Conceptual Framework for Climate Change research', *Global Environmental Change*, 17(2), 155-167.

FÜSSEL, H.M. (2009): 'Review and Quantitative Analysis of Indices of Climate Change Exposure, Adaptive Capacity, Sensitivity, and Impacts, Background note to the World Development Report 2010', World Bank, Washington, DC.

FÜSSEL, H.M. (2010): 'How Inequitable is the Global Distribution of Responsibility, Capability, and Vulnerability to Climate Change: A comprehensive indicator-based assessment', *Global Environmental Change*, 20(4), 597-611.

FÜSSEL, H.M., AND R. KLEIN (2006): 'Climate Change Vulnerability Assessments: An evolution of conceptual thinking', *Climatic Change*, 75(3), 301-329.

GAJIGO, O., AND B. SCHWAB (2012): 'The Rhythm of the Rains: Seasonal Effects on Child Health in The Gambia', 2012 Conference, August 18-24, 2012, Foz do Iguacu, Brazil 125788, International Association of Agricultural Economists.

GALL, M. (2007): *Indices of Social Vulnerability to Natural Hazards: A Comparative Evaluation*, PhD Thesis. Department of Geography, University of South Carolina.

GALLUP, J.L., A.D. MELLINGER, AND J.D. SACHS (1998): 'Geography and Economic Development', NBER Working Papers 6849, National Bureau of Economic Research, Inc.

GALLUP, J.L., AND J.D. SACHS (1998): 'The Economic Burden of Malaria' Unpublished paper, Harvard Center for International Development,

GALLUP, J.L., AND J.D. SACHS (2001): 'The Economic Burden of Malaria', *The American Journal of Tropical Medicine and Hygiene*, 64(1, 2) 85-96.

GARENNE, M. (2002): 'Différence entre filles et garçons : une revue des indicateurs sanitaires en Afrique sub-saharienne', Dossier du CEPED n°70, Paris, 79p.

GIORGI, F. (2006): 'Climate Change Hot-Spots', *Geophysical Research Letters*, 33, L08707.

GITHEKO, A. K (2007): 'Malaria, climate change and possible impacts on population in Africa', in Carël M. and J. Glynn (ed.), *HIV, Resurgent Infections and Population Change in Africa*, Chapter 4, Springer.

GOOVAERTS, P. (1997*): Geostatitics for Natural Resources Evaluation*, Oxford University Press.

GORGENS, T., X. MENG, AND R. VAITHIANATHAN (2012): 'Stunting and Selection Effects of Famine: a case study of the Great Chinese Famine', *Journal of Development Economics*, 97(1), 99-111.

GRIESER, J, AND C. BECK, (2006): 'Variability and Triggering Factors of Observed Global Mean Land-Surface Precipitation since 1951', *DWD, Klimastatusbericht KSB 2005*, 131-138.

GRIESER, J., R. GOMMES, S.COFIELD, AND M. BERNARDI (2006): 'World Maps of Climatological Net Primary Production of Biomass NPP', http://www.juergen-grieser.de/downloads/NetPrimaryProduction/npp.htm.

GRIFFON, M. (2006): *Nourrir la planète*, Odile Jacob, Paris.

GRIFFON, M. (2010): *Pour des agricultures écologiquement intensives,* Editions de l'Aube, Paris.

GUILLAUMONT, P. (2007): 'La vulnérabilité économique, défi persistant à la croissance africaine', *African Development Review,* 19 (1), 123-162.

GUILLAUMONT, P. (2008): 'Adapting Aid Allocation Criteria to Development Goals. An Essay for the UN Development Cooperation Forum*',* Ferdi Working Paper.

GUILLAUMONT, P. (2009a): 'An Economic Vulnerability Index: Its design and use for international development policy', *Oxford Development Studies*, 37(3), 193-227.

GUILLAUMONT, P. (2009b): *Caught in a trap. Identifying the least developed countries*, Economica, Paris.

GUILLAUMONT, P., AND L. CHAUVET (2001): 'Aid and Performance: a reassessment', *Journal of Development Studies*, 37(6), 66-92.

GUILLAUMONT, P., AND S. GUILLAUMONT JEANNENEY (2010): 'Big Push versus Absorptive Capacity: How to Reconcile the Two Approaches", in G. Mavrotas (ed.), *Foreign Aid for Development Issues, Challenges, and the New Agenda.* WIDER Studies in Development Economics, Oxford University Press (originally UNU-WIDER Discussion Paper N. 2007/05).

GUILLAUMONT, P., S. GUILLAUMONT JEANNENEY, AND L. WAGNER (2010): 'How to take into account vulnerability in aid allocation criteria and lack of human capital as well: improving the performance based allocation', Ferdi Working Paper.

HALL, R., AND C.I. JONES (1999): 'Why Do Some Countries Produce So Much More Output per Worker than Others?', *Quarterly Journal of Economics*, 114(1), 83-116.

HALL, S.G., Z. PSARADAKIS, AND M. SOLA (1999): 'Detecting Periodically Collapsing Bubbles: a Markov-Switching Unit Root Test', *Journal of Applied Econometrics*, 14(2), 143-154.

HAMILTON, J.D. (1994): *Time Series Analysis,* Princeton University Press, Princeton.

HINKEL, J. (2008): *Transdisciplinary knowledge integration. Cases from integrated assessment and vulnerability assessment*, Ph.D. thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands.

HINKEL, J. (2011): 'Indicators of Vulnerability and Adaptive Capacity: Towards a clarification of the science-policy interface', *Global Environmental Change*, 21 (1), 198-208.

HODDINOTT, J., AND B. KINSEY (2001): 'Child Growth in the Time of Drought', *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 63(4), 409-436.

HULME, M. (1996): 'Recent Climatic Change in the World's Dry Lands', *Geophysical Research Letters*, 23(1), 61 -64.

HULME, M., R. DOHERTY, T. NGARA AND M. NEW, (2005): *Global warming and African climate change. Climate Change and Africa*, P.S Low Ed., Cambridge University Press, Cambridge, 29-40.

IM, K.S., AND P. SCHMIDT (2008): 'More Efficient Estimation Under Non-normality When Higher Moments do not Depend on the Regressors, Using Residual Augmented Least Squares', *Journal of Econometrics*, 144(1), 219-233.

IONESCU, C., R.J.T. KLEIN, J. HINKEL, AND K.S.K. KUMAR (2009): 'Towards a Formal Framework of Vulnerability to Climate Change', *Environmental Modeling and Assessment*, 14(1), 1-16.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC (2007a): *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Glossary Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation, and Vulnerability*, Cambridge University Press, Cambridge.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, IPCC (2007b): 'Summary for Policymakers' in: Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson (ed.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Cambridge University Press, Cambridge, UK, 7-22.

INSTITUT DE RECHERCHE POUR LE DEVELOPPEMENT, IRD (2009): Actualité Scientifique, Fiche n°325, juillet 2009.

JACOBY, H.G., AND E. SKOUFIAS (1997): 'Risk, Financial Markets, and Human Capital in a Developing Country', *The Review of Economic Studies*, 64(3), 311-335.

JALAN, J. AND M. RAVALLION (1998): 'Transient Poverty in Post Reform Rural China', *Journal of Comparative Economics*, 26(2), 338-357.

JALAN, J. AND M. RAVALLION (2000): 'Is Transient Poverty Different? Evidence for rural China', *The Journal of Development Studies*, 36(6), 82-99.

JALAN, J., AND M. RAVALLION (2001): 'Behavioral Responses to Risk in Rural China', *Journal of Development Economics*, 66(1), 23-49.

JANSSEN, M., AND E. OSTROM (2006): 'Resilience, Vulnerability and Adaptation: A cross-cutting theme of the international human dimensions program on global environmental change', *Global Environmental Change*, 16(3), 237-239.

JENSEN, R. (2000): 'Agricultural Volatility and Investments in Children', *The American Economic Review*, 90(2), 399-404.

JONES, P.D. (1994): 'Hemispheric Surface Air Temperature Variations: a reanalysis and an update to 1993', *Journal of Climate*, 7(11), 1794-1802.

JONES, P.D., AND A. MOBERG (2003): 'Hemispheric and Large-Scale Surface Air Temperature Variations: An extensive revision and an update to 2001', *Journal of Climate,* 16(2), 206-223.

JONES, P.D., AND M. HULME (1996): 'Calculating Regional Climatic Time Series for Temperature and Precipitation: Methods and Illustrations', *International Journal of Climatology*, 16(4), 361-377.

JONES, P.D., AND T.M.L. WIGLEY, (2010): 'Estimation of Global Temperature Trends: What's important and what isn't', *Climatic Change*, 100(1), 59-69.

JONES, P.D., S.C.B. RAPER, AND T.M.L. WIGLEY (1986a): 'Southern Hemisphere Surface Air Temperature Variations: 1851-1984', *Journal of Climate and Applied Meteorology,* 25(9), 1213-1230.

JONES, P.D., S.C.B. RAPER, R.S. BRADLEY, H.F. DIAZ, P.M. KELLY, AND T.M.L. WIGLEY (1986b): 'Northern Hemisphere Surface Air Temperature Variations: 1851-1984', *Journal of Climate and Applied Meteorology,* 25(2), 161-179.

JONES, P.D., S.C.B. RAPER, B.S.G. CHERRY, C.M. GOODESS, AND T.M.L. WIGLEY (1986c): 'A Grid Point Surface Air Temperature Data Set for the Southern Hemisphere 1851-1984', *Technical Report* TR027, U.S. Dept. of Energy, Carbon Dioxide Research Division.

JONES, P.D., T.J. OSBORN, AND K.R. BRIFFA (1997): 'Estimating Sampling Errors in Large-Scale Temperature Averages', *Journal of Climate*, 10(10), 2548-2568.

JONES, P.D., T.J. OSBORN, K. R. BRIFFA, C.K. FOLLAND, B. HORTON, L.V. ALEXANDER, D.E. PARKER, AND N. RAYNER (2001): 'Adjusting for Sampling Density in Grid-Box Land and Ocean Surface Temperature Time Series', *Journal of Geophysical Research*, 106(4), 3371-3380.

JONES, P.D., D.H. LISTER, T.J. OSBORN, C. HARPHAM, M. SALMON, AND C. MORICE (2012): 'Hemispheric and Large-Scale Land-Surface Air Temperature Variations: An extensive revision and an update to 2012', *Journal of Geophysical Research*, 117, 1-29.

JONES, P.G., AND P.K. THORNTON (2003): 'The Potential Impacts of Climate Change on Maize Production in Africa and Latin America in 2055', *Global Environmental Change*, 13(1), 51-59.

JONES, R.N., AND R. BOER (2005): 'Assessing Current Climate Risks', Technical Paper, 4, Adaptation policy frameworks for climate change. Developing strategies policies and measures. United Nations Development Program, Global Environment Facility. New York: Cambridge University Press, 91-117.

JONES, R.N., P. DETTMANN, G. PARK, M. ROGERS, AND T. WHITE (2007): 'The Relationship between Adaptation and Mitigation in managing Climate Change Risks: a regional response from North Central Victoria, Australia', *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(5), 685-712.

KALY, U.L., C.R. PRATT, AND J. MITCHELL (2004): 'The Environmental Vulnerability Index (EVI)', SOPAC Technical Report 384, South Pacific Applied Geoscience Commission, Suva, Fiji.

KASSOUF, A., AND B. SENAUER (1996): 'Direct and Indirect Effect of Parental Education on Malnutrition among Children in Brazil: A full income approach', *Economic Development and Cultural Change*, 44(4), 817-838.

KAZIANGA, H., AND C. UDRY (2006): 'Consumption Smoothing? Livestock, insurance and drought in rural Burkina Faso', *Journal of Development Economics*, 79(2), 413-446.

KELLY, P.M., AND W.N. ADGER (2000): 'Theory and Practice in Assessing Vulnerability to Climate Change and Facilitating Adaptation', *Climatic Change*, 47(4), 325-352.

KRAEMER, S. (2000): 'The fragile male', British Medical Journal, 321, 1609-1612.

KRIGE, D.G. (1951): 'A Statistical Approach to Some Basic Mine Valuation Problems on the Witwatersrand', *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa,* 52(6), 119-139.

LANDES, D.S. (1998): *The Wealth and Poverty of Nations: Why Some Are So Rich and Some So Poor*? W.W. Norton & Co., New York.

LEGATES, D.R., AND C.J. WILLMOTT (1990a): 'Mean Seasonal and Spatial Variability in Global Surface Air Temperature', *Theoretical and Applied Climatology*, 41(1-2), 11-21.

LEGATES, D.R., AND C.J. WILLMOTT (1990b): 'Mean Seasonal and Spatial Variability in Gauge-Corrected, Global Precipitation', *International Journal of Climatology*, 10(2), 111-127.

LENTES, P., M. PETER, AND F. HOLMANN (2010): 'Regionalization of Climatic Factors and Income Indicators for Milk production in Honduras', *Ecological Economics*, 69(3), 539-552.

LINNEMAYR, S., H. ALDERMAN, AND A. KA (2008): 'Determinants of Malnutrition in Senegal: Individual, household, community variables, and their interaction', *Economics and Human Biology*, 6(2), 252-263.

LIVERMAN, D.M. (1990): 'Vulnerability to Global Environmental Change' in Kasperson R.E., et al. (ed.), *Understanding Global Environmental Change*, The Earth Transformed Program Worcester, MA, 8-23.

LOKSHIN, M., AND M. RAVALLION (2000): 'Short-lived Shocks with Long-lived Impacts? - Household income dynamics in a transition economy', Policy Research Working Paper Series 2459, The World Bank.

LONERGAN, S., K. GUSTAVSON, AND M. HARROWER (1999): 'Mapping Human Insecurity' in Lonergen, S. (ed.), *Environmental Change, Adaptation, and Security*. NATO, Kluwer, Dordrecht, 397-413.

MACCINI, S., AND D. YANG (2009): 'Under the Weather: Health, Schooling, and Economic Consequences of Early-Life Rainfall', *American Economic Review*, 99(3), 1006-1026.

MANSOURI, B. (2004): 'Impact of Drought and Fiscal Policy on Private Consumption, Private Investment and Economic Growth in Morocco: an empirical analysis', Workshop on The Prospects of Arab Economic Cooperation to Boost, Savings and Investment. Alexandria, Egypt.

MARCOUX, A. (2002): 'Sex Differentials in Undernutrition: A look at survey evidence', *Population and Development Review*, 28(2), 275-284.

MARTORELL, R. (1995): 'Results and Implications of the INCAP Follow-up Study', *The Journal of Nutrition*, 125(4 Suppl), 1127-1138.

MARTORELL, R. (1997): 'Undernutrition During Pregnancy and Early Childhood: consequences for cognitive and behavioral development', in Young, M.E. (ed.) *Early child development: investing in our children's future*, Elsevier Science BV, Amsterdam and New York, 39-83.

MARTORELL, R. (1999): 'The Nature of Child Malnutrition and its Long-term Implications', *Food and Nutrition Bulletin*, 20(3), 288-292.

MARTORELL, R., AND J. P. HABICHT (1986): 'Growth in Early Childhood in Developing Countries', in Falkner, F., and J. Tanner (ed.), *Human Growth: A Comprehensive Treatise*, vol. 3 (2nd ed.), Plenum Press, New-York, 241-262.

MARTORELL, R., K.L. KHAN, AND D.G. SCHROEDER (1994): 'Reversibility of Stunting: Epidemiological findings in children from developing countries', *European Journal of Clinical Nutrition*, 48(Supl.1), 45-57.

MATHERON, G. (1962) : 'Traité de géostatistique appliquée : Tome I' in Technip E. (ed.), *Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières*, n°14, Paris.

MCCARTHY, J.J., O.F. CANZIANI, N.A. LEARY, D.J. DOKKEN, AND K.S. WHITE (2001): *Climate Change 2001*, Cambridge Univ. Press, Cambridge, U.K.

MCMICHAEL, A.J., R.E. WOODRUFF, AND S. HALES (2006): 'Climate change and human health: present and future risks', *The Lancet,* 367(1), 859-869.

MCSWEENEY, C., G. LIZCANO, M. NEW AND X. LU (2010): 'The UNDP Climate Change Country Profiles', *Bulletin of the American Meteorological Society,* 91(2), 157-166.

MEESE, G., R. KOK, M. LEWIS, AND D. WYON (1982): 'Effects of Moderate Cold and Heat Stress on Factory Workers in Southern Africa', *South Africa Journal of Science*, 78, 189-197.

MENDELSOHN, R., A. DINAR, AND A. SANGHI (2001): 'The Effect of Development on the Climate Sensitivity of Agriculture', *Environmental and Development Economics*, 6(1), 85-101.

MIGUEL, E., S. SATYANATH, AND E. SERGENTI (2004): 'Economic Shocks and Civil Conflict: An Instrumental Variables Approach', *Journal of Political Economy*, 112(4), 725-753.

MIGUEL, E., AND S. SATYANATH (2010): 'Understanding Transitory Rainfall Shocks Economic Growth and Civil Conflict', NBER Working Papers 16461, National Bureau of Economic Research, Inc.

MIGUEL, E., AND S. SATYANATH (2011) 'Re-examining Economic Shocks and Civil Conflict'; *American Economic Journal: Applied Economics*, 3(4), 228-232.

MILLER, F., H. OSBAHR, E. BOYD, F. THOMALLA, S. BHARWANI, G. ZIERVOGEL, B. WALKER, J. BIRKMANN, S. VAN DER LEEUW, J. ROCKSTRÖM, J. HINKEL, T. DOWNING, C. FOLKE, AND D. NELSON (2010): 'Resilience and Vulnerability: complementary or conflicting concepts ?', *Ecology and Society*, 15(3),11.

MIRZA, M. (2003): 'Climate Change and Extreme Weather Events: can developing countries adapt?'*, Climate Policy*, 3(3), 233-248.

MITCHELL, T.D., M. HULME, AND M. NEW (2002): 'Climate Data for Political Areas', *Area,* 34(1), 109-112.

MITCHELL, T.D., T.R. CARTER, P.D. JONES, M. HULME, AND M. NEW (2004): A Comprehensive Set of High-Resolution Grids of Monthly Climate for Europe and the Globe: the observed record 1901-2000 and 16 scenarios 2001-2100' , Technical Report Tyndall Working Paper 55, Tyndall Centre for Climate Change Research, UEA, Norwich.

MONTESQUIEU, C. de (1748): *De l'Esprit des Lois* in Œuvres complètes, La Pléiade, 1949-1951, Gallimard, Paris.

MORDUCH, J. (1995): 'Income Smoothing and Consumption Smoothing', *Journal of Economic Perspectives*, 9(3), 103-114.

MORDUCH, J. (1999): 'Between the Market and State: Can Informal Insurance Patch the Safety Net?', *World Bank Research Observer*, 14(2), 187-207.

MOSS, R.H., A.L. BRENKERT, AND E.L. MALONE (2001): 'Vulnerability to Climate Change: A Quantitative Approach', *Technical Report* PNNL-SA-33642. Pacific Northwest National Laboratory.

NEW, M., M. HULME, AND P.D. JONES (1999): 'Representing Twentieth Century Space-Time Climate Variability. Part I: development of a 1961-1990 mean monthly terrestrial climatology', *Journal of Climate*, 12(3), 829-856.

NEW, M., M. HULME, AND P.D. JONES (2000): 'Representing Twentieth Century Space-Time Climate Variability. Part II: development of a 1901-1996 monthly grids of terrestrial surface climate', *Journal of Climate,* 13(13), 2217-2238.

NEW, M., D. LISTER, M. HULME, AND I. MAKIN (2002): 'A High-Resolution Data Set of Surface Climate Over Global Land Areas', *Climate Research,* 21, 1-25.

NICHOLLS, R.J., F.M.J. HOOZEMANS, AND M. MARCHAND (1999): 'Increasing Flood Risk and Wetland Losses due to Global Sea-level Rise: regional and global analyses', *Global Environmental Change*, 9(supl.1), 69-87.

NORDHAUS, W. (2006): 'Geography and Macroeconomics: New data and new findings', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of Americ*a, 103, 3510-3517.

NORDHAUS, W.D., AND J. BOYER (2000): *Warming the World: Economic Models of Global Warming*, MIT Press, Cambridge.

O'BRIEN, K., S. ERIKSEN, A. SCHJOLDEN, AND L. NYGAARD (2004): 'What's in a word? Conflicting interpretations of vulnerability in climate change research', CICERO Working Paper 04, CICERO, Oslo, 1-16.

O'BRIEN, K., S. ERIKSEN, L.P NYGAARD, AND A. SCHJOLDEN (2007): 'Why Different Interpretations of Vulnerability Matter in Climate Change Discourses', *Climate Policy*, 7(1), 73-88.

OLMOS, S. (2001): 'Vulnerability and Adaptation to Climate Change: Concepts, Issues, Assessment Methods', *Climate Change Knowledge Network:* http://www.cckn.net.

PARRY, M.L., O.F. CANZIANI, J.P. PALUTIKOF, AND CO-AUTHORS (2007): *Technical Summary. Climate Change (2007): Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,* Cambridge University Press, Cambridge, UK, 23-78.

PAYNE, J.E., AND G.A. WATERS (2005): 'REIT Markets: Periodically Collapsing Negative Bubbles?', *Applied Financial Economics Letters*, 1(2), 65-69.

PAYNE, J.E., AND G.A. WATERS (2007): 'Have Equity REITs Experienced PeriodicallyCollapsing Bubbles?', *The Journal of real estate finance and economics,* 34(2), 207-224.

PETERSON, T.C., AND R.S. VOSE (1997): 'An overview of the Global Historical Climatology Network temperature database', *Bulletin of the American Meteorological Society*, 78(12), 2837-2849.

PHILLIPS, P., Y. WU, AND J. YU (2009): 'Explosive Behaviour in the 1990s Nasdaq: When did exuberance escalate asset values?', Cowles Foundation discussion Paper 1699, Cowles Foundation for Research in Economics, Yale University.

PINDYCK, R., AND J. ROTEMBERG (1990): 'The excess Co-Movement of Commodity Prices', *The Economic Journal*, 100(403), 1173-1189.

PITT, M., AND M. ROSENZWEIG (1985): 'Health and Nutrient Consumption across and within Farm Households', *Review of Economics and Statistics*, 67(2), 212-223.

PROWSE, M. (2003): 'Towards a clearer understanding of vulnerability in relation to chronic poverty', CPRC Working Paper 24, Chronic Poverty Research Centre, University of Manchester, Manchester, UK.

QUDDUS, M., AND C. BECKER (2000): 'Speculative Price Bubbles in the Rice Market and the 1974 Bangladesh Famine', *Journal of Economic Development*, 25(2), 155-175.

RAVALLION, M. (1985): 'The performance of Rice price Markets in Bangladesh During the 1974 Famine', *The Economic Journal*, 95(377), 15-29.

RICHARD, Y., N. FAUCHEREAU, I. POCCARD, M. ROUAULT AND S. TRZASKA, (2001): '20th Century Droughts in Southern Africa: spatial and temporal variability, teleconnections with oceanic and atmospheric conditions', *International Journal of Climatology*, 21(7), 873-885.

RITTER, M., O. MUSSHOFF, AND M. ODENING (2011): 'Meteorological Forecasts and the Pricing of Temperature Futures', *The Journal of derivatives*, 19(2), 45-60.

RODRIK, D. (2003): 'Growth Strategies', Economics working papers 17, Department of Economics, Johannes Kepler University Linz, Austria.

RODRIK, D., AND A. SUBRAMANIAN (2003): 'La primauté des institutions : ce que cela veut dire', *Finance et développement,* juin

RODRIK, D., A. SUBRAMANIAN, AND F. TREBBI (2004): 'Institutions Rule: The Primacy of Institutions over Geography and Integration in Economic Development', *Journal of Economic Growth*, 9(2), 131-165.

ROSENZWEIG, M., AND H. BINSWANGER (1993): 'Wealth, Weather Risk and the Composition and Profitability of Agricultural Investments', *Economic Journal,* 103(416), 56-78.

ROSENZWEIG, M., AND K. WOLPIN (1993a): 'Intergenerational Support and the Life-Cycle Incomes of Young Men and Their Parents: Human Capital Investments, Coresidence, and Intergenerational Financial Transfers' , *Journal of Labor Economics*, 11(1), 84-112.

ROSENZWEIG, M., AND K. WOLPIN (1993b): 'Credit Market Constraints, Consumption Smoothing, and the Accumulation of Durable Production Assets in Low-Income Countries: Investments in Bullocks in India', *Journal of Political Economy*, 101(2), 223-244.

SACHS, J.D., A. MELLINGER, AND J. GALLUP (2000): 'Climate, Coastal Proximity, and Development' in Gordon L., G.L. Clark, M.P. Feldman, and M.S. Gertler (ed.) *Oxford Handbook of Economic Geography*, Oxford University Press, Oxford.

SACHS, J.D., AND A.M. WARNER (1997a): 'Sources of Slow Growth in African Economies', *Journal of African Economies*, 6(3), 335-376.

SACHS, J.D., AND A.M. WARNER (1997b): 'Fundamental Sources of Long Run Growth', *American Economic Review*, 87(2), 184-188.

SAHN, D.E., AND H. ALDERMAN (1997): 'On the Determinants of Nutrition in Mozambique: The Importance of Age-Specific Effects', *World Development*, 25(4), 577-588.

SARNO, L., AND M.P. TAYLOR (2003): 'An Empirical Investigation of Asset Price Bubbles in Latin American Emerging Financial Markets', *Applied Financial Economics*, 13(9), 635-643.

SARRIS, A., AND P. KARFAKIS (2006): 'Household vulnerability in rural Tanzania', FAO Commodities and Trade Policy Research Working Paper, 17, Rome, Italy.

SEN, A. (1981): *Poverty and famines. An Essay on Entitlements and Deprivation*, Clarendon Press, Oxford.

SHEPARD, D. (1968): *A two-dimensional interpolation function for irregularly spaced data*, 23rd ACM National Conference, Brandon Syst. Press, Princeton, USA, 517-524.

SKOUFIAS, E., AND K. VINHA (2012): 'Climate variability and child heigh in rural Mexico', *Economics and Human Biology,* 10(1), 54-73.

SLINGO, J.M., A.J. CHALLINOR, B.J. HOSKINS, AND T.R. WHEELER (2005): 'Introduction: Food Crops in a Changing Climate', *Philosophical Transactions of the Royal Society Biology*, 360, 1983-1989.

SMIT, B., AND J. WANDEL (2006): 'Adaptation, Adaptive Capacity and Vulnerability', *Global Environmental Change*, 16(3), 282-292.

STRAUSS, J., AND D. THOMAS (1998): 'Health, Nutrition, and Economic Development', *Journal of Economic Literature*, 36(2), 766-817.

STRAUSS, J., AND D. THOMAS (2008): 'Health Over the Life Course' in Schultz T. and J. Strauss (ed.), *Handbook of Development Economics*, 4, North Holland Press, Amsterdam, 3375-3474.

SULTAN, B., C. BARON, M. DINGKUHN, B. SARR, AND S. JANICOT (2005): 'La variabilité climatique en Afrique de l'Ouest aux échelles saisonnière et intra-saisonnière. II : applications à la sensibilité des rendements agricoles au Sahel', *Sécheresse*, 16(1), 23-33.

SVEDBERG, P. (1990): 'Undernutrition in Sub-Saharan Africa: Is there a gender bias?', *Journal of Development Studies*, 26(3), 469-86.

TARHULE, A, AND P.J. LAMB (2003): 'Climate Research and Seasonal Forecasting for West Africans: perceptions, dissemination, and use?' *Bulletin of the American Meteorological Society*, 84(12), 1741-1759.

TAYLOR, M. P., AND D. A. PEEL (1998): 'Periodically Collapsing Stock Price Bubbles: A robust test', *Economics Letters*, 61, 221-228.

THOMAS, D.S.G., AND C. TWYMAN (2005): 'Equity and Justice in Climate Change Adaptation amongst Natural-Resource-dependent Societies', *Global Environmental Change*, 15(2), 115-124.

THYWISSEN, K. (2006): 'Components of Risk: a Comparative Glossary', *Series of UNU-EHS*, Bonn.

TIMMERMAN, P. (1981): 'Vulnerability, Resilience and the Collapse of Society', Environmental Monograph, 1.

TOL, R.S.J., AND G.W. YOHE (2007): 'The Weakest Link Hypothesis for Adaptive Capacity: An empirical test', *Global Environmental Change*, 17 (2), 218-227.

TOWNSEND, R. (1995): 'Consumption Insurance: An evaluation of risk-bearing systems in low-income countries', *Journal of Economic Perspectives*, 9(3), 83-102.

TURNER, B. L., R.E. KASPERSON, P.A. MATSON, J.J. MCCARTHY, R.W. CORELL, L. CHRISTENSEN, N. ECKLEY, J.X. KASPERSON, A. LUERS, M.L. MARTELLO, C. POLSKY, A. PULSIPHER, AND A. SCHILLER (2003): 'A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science', *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of Amer*ica, 100, 8074.

UNITED NATIONS COMMITTEE FOR DEVELOPMENT PLANNING (UNCDP) (1994): Report on the 29th session E/1994/22, supplement 2. Un Department of Economic and Social Affairs, United Nations, New York.

UNITED NATIONS DEVELOPMENT PROGRAM /OFFICE TO COMBAT DESERTIFICATION AND DROUGHT, UNDP/ UNSO (1999): '*An Assessment of Population Levels in the World's Drylands: Aridity Zones and Dryland Populations*', Office to Combat Desertification and Drought. New York.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM, UNEP, (2002): *Global Environment Outlook*, Vol. 3. Earthscan, London.

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAM/GLOBAL RESOURCE INFORMATION DATABASE (1991): 'Global digital data sets for land degradation studies: a GIS approach' by U. Deichmann and L. Eklundh. GRID Case Study Series 4. UNEP/GEMS and GRID

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, UNFCCC (2008a): Ad Hoc Working Group on Long-term Cooperative Action under the Convention. First session. Bangkok, 31 March to 4 April (2008): FCCC/AWGLCA/(2008):/MISC.1.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, UNFCCC (2008b): Ad Hoc Working Group on Long-term Cooperative Action Under the Convention. Third session. Accra, 21-27 August (2008): FCCC/AWGLCA/(2008):/MISC.2/Add.1.

UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE, UNFCCC (2008c), Rapport de la vingt-neuvième session de l'Organe subsidiaire de conseil scientifique et technologique, tenue à Poznan du 1er au 10 décembre (2008):

VAN NORDEN, S., AND R. VIGFUSSON (1996): 'Avoiding the Pitfalls: Can Regime-Switching Tests Detect Bubbles?', Working Paper 11, Bank of Canada.

WAM, H. K. (2009): 'Economists, Time to Team up with the Ecologists!', *Ecological Economics*, 69(4), 675-679.

WAMANI, H., A.N. ÅSTRØM, S. PETERSON, J.K. TUMWINE, AND T. TYLLESKÄR (2007): 'Boys Are More Stunted than Girls in Sub-Saharan Africa: A meta-analysis of 16 demographic and health surveys', *BMC Pediatrics,* 7, 1-17.

WATERS, G.A. (2008): 'Unit Root Testing for Bubbles: a Resurrection?', *Economics Letters*, 101(3), 279-281.

WHEELER, D. (2011): 'Quantifying Vulnerability to Climate Change: Implications for Adaptation Assistance', CGD Working Paper 240, Center for Global Development Washington, D.C.

WILLMOTT, C.J., AND K. MATSUURA (1995): 'Smart Interpolation of Annually Averaged Air Temperature in the United States', *Journal of Applied Meteorology*, 34(12), 2577-2586.

WILLMOTT, C.J., AND K. MATSUURA (2005): 'Advantages of the Mean Absolute Error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing Average Model Performance', *Climate Research*, 30(1), 79-82.

WILLMOTT, C.J., AND K. MATSUURA (2006): 'On the use of Dimensioned Measures of Error to Evaluate the Performance of Spatial Interpolators', *International Journal of Geographical Information Science*, 20(1), 89-102.

WILLMOTT, C.J., AND S.M. ROBESON (1995): 'Climatologically Aided Interpolation (CAI) of Terrestrial Air Temperature', *International Journal of Climatology*, 15(2), 221-229.

WILLMOTT, C.J., C.M. ROWE, AND W.D. PHILPOT (1985): 'Small-scale Climate Maps: A sensitivity analysis of some common assumptions associated with grid-point interpolation and contouring', *American Cartographer*, 12(1), 5-16.

WISNER, B. (2004): *At Risk: Natural Hazards, People's Vulnerability and Disasters*. London. Routledge.

WORLD BANK (2008): *World Development Report 2008: Agriculture for Development*, The World Bank, Washington.

WORLD BANK (2010): *World Development Report 2010: Development and Climate Change*. The World Bank, Washington.

YAMANO Y., L.CHRISTIANSEN, AND H. ALDERMAN (2005): 'Child Growth, Shocks, and Food Aid in Rural Ethiopia', *American Journal of Agricultural Economics*, 87(2), 273-288.

YOHE, G., E. MALONE, A. BRENKERT, M. SCHLESINGER, H. MEIJ, AND X. XING (2006a): 'Global Distributions of Vulnerability to Climate Change', *Integrated Assessment,* 6 (3), 35-44.

YOHE, G., E. MALONE, A. BRENKERT, M. SCHLESINGER, H. MEIJ, X. XING, AND D. LEE (2006b): 'A Synthetic Assessment of the Global Distribution of Vulnerability to Climate Change from the IPCC Perspective that Reflects Exposure and Adaptive Capacity', CIESIN (Center for International Earth Science Information Network), Columbia University, Palisades, New York. http://sedac.ciesin.columbia.edu/mva/ccv/ [access date: September 2011]